

ACTA ACADEMIAE NYIREGYHAZIENSIS

7.

**MŰSZAKI TUDOMÁNY AZ ÉSZAK-KELET
MAGYARORSZÁGI RÉGIÓBAN 2022**



NYÍREGYHÁZA, 2022

ACTA ACADEMIAE NYIREGYHAZIENSIS

A Nyíregyházi Egyetem sorozata

7. kötet

**MŰSZAKI TUDOMÁNY AZ ÉSZAKKELET-
MAGYARORSZÁGI RÉGIÓBAN 2022**

Szerkesztette:

Páy Gábor

Sorozatszerkesztő:

János István, Minya Károly

Borítóterv:

Béres Tamás

Felelős kiadó:

Halkóné dr. Rudolf Éva

© Nyíregyházi Egyetem

© A szerzők

ISSN: 2416-2981

ISBN: 978-615-6032-57-7

Nyíregyháza, 2022



NYÍREGYHÁZI
EGYETEM



*Műszaki tudomány az északkelet-
magyarországi régióban 2022*

KONFERENCIA- KIADVÁNY

*Nyíregyházi Egyetem
Műszaki és Agrártudományi Intézet*

2022. június 2.

A konferencia szervezői:
a Magyar Tudományos Akadémia (MTA)
Debreceni Területi Bizottság (DAB) Műszaki Szakbizottsága
és a
Nyíregyházi Egyetem
Műszaki és Agrártudományi Intézete

A konferencia programbizottsága:
Dr. Kocsis Imre elnök, Dr. Szodrai Ferenc titkár

Dr. Szigeti Ferenc, Dr. Dezső Gergely, Dr. Kovács Zoltán, Dr. Mankovits Tamás, Dr. Szűcs Péter, Dr. Palcsu László, Dr. Buday Tamás, Dr. Békési Bertold, Dr. Kavas László

A konferencia szervezőbizottsága:

**Dr. Szigeti Ferenc, Dr. Kovács Zoltán, Dr. Dezső Gergely,
Dr. Páy Gábor, Lajtos István**

A kötet szakmai lektorai:

Antal Tamás, Békési Bertold, Békési László, Budai István, Buday Tamás, Csáky Imre, Dezső Gergely, Kavas László, Kerekes Benedek, Kocsis Imre, L. Szabó Gábor, Laczkó Győző, Magyar Tamás, McIntosh Richard William, Nagyné dr. habil. Kondor Rita, Pálinkás Sándor, Páy Gábor, Sarvajcz Kornél, Sikolya László, Szabó Béla, Szilvássy László, Szodrai Ferenc, Tömöri Mihály, Varga Béla, Varga Gyula

Szerkesztőbizottság:

Dr. Szigeti Ferenc, Dr. Kovács Zoltán, Dr. Páy Gábor

Szerkesztő:

Dr. Páy Gábor

TARTALOMJEGYZÉK

ELŐSZÓ	9
PLENÁRIS ELŐADÁS	10
Dezső Gergely: Material test, microstructure and size accuracy investigations on parts produced by additive manufacturing at University of Nyíregyháza.....	11
AGRÁR–MŰSZAKI SZEKCIÓ	17
Antal Tamás – Alexa Regina: Különböző körülmények között tárolt zöldségzárítványok eltarthatósági vizsgálata.....	18
Beszeda Imre – Stonawski Tamás: Vigyázz a borod egészségére (is)!.....	24
Irinyiné Oláh Katalin – Gyuró Vanessa: A levélkártevők monitorozása különböző tormafajtákon.....	30
Kiss Zsolt Péter: Development of a test facility for modelling the soil physics effects of tyres.....	36
Nagy János – Stock Bence: Függesztett, felső hajtású fűkaszák átalakításának vizsgálata félig függesztett kivitelűvé.....	42
Tarekné Tilistyák Judit – Tarek Mohamed: A zöldséglevelek fermentálásának tapasztalatai.....	50
Tóth Csilla – Apagyi Vivien: Az allelopátia szerepe a csillagfürtállományok (<i>Lupinus albus</i> L.) gyomflórájának alakulásában.....	56
Uri Zsuzsanna – Abonyiné Kántor Anita – Holb Imre: Az almamoly kártételének vizsgálata ökológiai almaültetvényben.....	62
Vigh Szabolcs: A lisztek sikértartalmának és savfokának minőségi vizsgálatai.....	68
ENERGETIKAI SZEKCIÓ	74
Bodnár István: Napelemek állapotfelmérése és károsodásvizsgálata.....	75
Boros Rafael Ruben – Bodnár István: Napeleminverter tervezése és szimulálása.....	81
Hancz Gabriella: A klímaadaptációt célzó intézkedések várható eredményei a városi szintű stratégiai dokumentumokban, különös tekintettel a városi zöldinfrastruktúra módszereire.....	87
Kozsely Gábor – Bodnár István: Sérült napelemek funkcionális működésének vizsgálata.....	93
Matusz-Kalász Dávid: A napenergia szerepe a magyarországi villamosenergia-termelésben.....	99
Tóth József Barnabás – Fesztóry Ottó: A fosszilis és megújuló energiák helyzete Magyarországon.....	105

GÉPÉSZETI SZEKCIÓ	111
Baksa Attila – Ecsedi István – Lengyel Ákos József – Gönczi Dávid: Saint-Venant torsion of a pseudo elliptical cross section.....	112
Bodzás Sándor – Szanyi Gyöngyi: Analysis of plain and face milling technologies.....	118
Bodzás Sándor – Tiba Zsolt – Menyhárt József – Békési Zsolt – Kertész József: Design and finite element analysis of planetary gear drives by the number of planet gears.....	126
Szigeti Ferenc – Dezső Gergely – Kósa Péter – Páy Gábor: 3D nyomtatással készített próbatestek szerkezetének és felületi tulajdonságainak vizsgálata.....	132
Szoboszlai András – Budai István: Cellás szerkezetű, poliszacharid-mátrixú kapszula fejlesztése gyógyászati felhasználásra.....	138
KÖRNYEZETTUDOMÁNYI SZEKCIÓ I.	145
Dócs Roland – Baracza Mátyás Krisztián: Multiple steel capillary model: A new method of pressure drop modelling in porous rocks.....	146
Kárpi Marcell – Szilágyiné Sebők Szilvia – Zákányiné Mészáros Renáta: Északkelet-magyarországi esettanulmány az aktuális fosszilis energiahasználati módok geotermikus energiával történő kiváltásáról.....	152
Kárpi Marcell – Szilágyiné Sebők Szilvia – Zákányiné Mészáros Renáta: A Bayes-háló alkalmazhatósága a felhagyott kutak újraindításából származó geotermikus hőhasználat klímaváltozásra kifejtett hatásának vizsgálatára.....	158
Kovács Zoltán – Lajtos István – Vass Róbert: Szabolcs-Szatmár-Bereg megye ÜHG-kibocsátásának alakulása 2012–2018 között.....	164
Pintér-Móricz Ákos – Hompoth Szabolcs – Czagány Máté – Baumli Péter: A nedvesíthetőség és a zéta-potenciál közötti kapcsolat kísérleti vizsgálata.....	170
Somogyiné Molnár Judit: Kőzetfizikai modellek az akusztikus terjedési sebesség és a porozitás nyomásfüggésének leírására.....	176
Varga Gyula – Baracza Krisztián: A CO ₂ -dús környezet hatása a mesterségesen konszolidált magminták petrofizikai tulajdonságaira.....	183
KÖRNYEZETTUDOMÁNYI SZEKCIÓ II.	189
Buday Tamás – Bertalan Eszter Viola: A szondamező paramétereinek hatása a geotermikus hőszivattyús potenciálra.....	190
Hajnal Andor – Csige István – Szabó Szilárd – Szabó György – Mester Tamás: A trágyázás okozta talajvízszennyezés kutatása növénytermesztési kísérleti telepeken.....	196

Kiss Nikolett Éva – Tamás János – Nagy Attila: A brojlercsirketartás környezeti terhelésének meghatározása	202
Simon László: Fitoremediációs kutatások a Nyíregyházi Egyetemen.....	208
Zákányi Balázs – Móricz Ferenc – Turai Endre – Mádai Viktor – Szűcs Péter: A Bükk előterében lévő, felhagyott szénhidrogénkutak értékelése geotermikus hővisszanyerés alkalmazására.....	216
Zákányi Balázs – Nyíri Gábor – Szűcs Péter: Hulladékhő-tárolás lehetőségének vizsgálata porózus rendszerekben.....	222
MECHATRONIKA SZEKCIÓ	228
Ferenczi István – Ferenczi Ildikó: Frekvenciaváltóval hajtott háromfázisú aszinkronmotorok távoli vezérlési lehetősége NI MyRIO eszközzel.....	229
Kis Károly Árpád – Sarvajcz Kornél: Drónautomatizálás ipari vagyónvédelmi és mezőgazdasági célra való felhasználáshoz.....	235
MÉRNÖKPEDAGÓGIA SZEKCIÓ	243
Árvai-Homolya Szilvia: Mérnökhallgatók online matematikaoktatásának tapasztalatai.....	244
Dezső Gergely: Integration of robotics into education	250
Sikolya László: Szakirányú továbbképzési szakok a Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézetében.....	256
Szilvásiné dr. Rozgonyi Erika: Az ábrázoló geometria oktatásának aspektusai.....	262
MŰSZAKI MENEDZSMENT SZEKCIÓ	268
Zákányi Balázs – Bereczky Attila – Zákányiné dr. Mészáros Renáta: Javaslatok a lakott területi fakivágás jogszabályi háttérének módosításához.....	269
Zákányi Balázs – Bereczky Attila – Zákányiné dr. Mészáros Renáta: Lakott területi fakivágás során felmerülő kockázatok és balesetek bemutatása esettanulmányokon keresztül.....	275
Zákányi Balázs Zsolt – Tóth Gyula – Zákányiné Mészáros Renáta: A víziközmű-ágazatban beszállással végzett munkák hazai szabályozása és gyakorlata.....	281
Zákányi Balázs Zsolt – Tóth Gyula – Zákányiné Mészáros Renáta: A víziközmű-ágazatban beszállással végzett munkák beszállási engedélyének kidolgozása és kiadásának gyakorlata.....	287
REPÜLÉSTUDOMÁNYI SZEKCIÓ	293
Békési Bertold – Láng Károly: Új technológiák a repülőgép-karbantartásban.....	294

Békési Bertold – Major Gábor: A drónok konfigurációi, alkalmazásai területei.....	301
Békési Bertold – Marosi Márk: Az Airbus H145M helikopter robotpilóta-rendszere.....	308
Major Gábor: Drónok a jövő korszerű repülőterein.....	316
Major Gábor – Tóth Zoltán: Drónpilótának lenni nem megterhelő semmilyen módon..., vagy mégis?.....	322
Rozgonyi László: Analysis on Seaplane Drag Components and Reduction.....	327
Szilágyi Dénes: A légi közlekedés szerepe megyénk életében és a Kárpátok Eurorégióhoz történi kapcsolódásban.....	333
Szilvássy László: Az orosz–ukrán háborúban alkalmazott repülőfedélzeti hiperszonikus rakéta.....	340
Ujjady András – Békési Bertold – Kavas László: 20. századi magyar repülőgépgyártás- fejlődés – gyártók, fejlesztők és karbantartó vállalatok.....	345

Előszó

2022. június 2-án a Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézetében került megrendezésre a „Műszaki tudomány az északkelet-magyarországi régióban 2022” című konferencia, amelynek a 2006-ban elindult rendezvénysorozat története során intézményünk immár 4. alkalommal adott helyet.

A Magyar Tudományos Akadémia (MTA) Debreceni Területi Bizottság (DAB) Műszaki Szakbizottsága és a Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézete által közösen szervezett konferencián a régió műszaki felsőoktatási intézményeinek oktatói és kutatói bemutatták az elmúlt időszakban elért legújabb kutatási-fejlesztési eredményeiket. Nagy örömünkre szolgált, hogy a megelőző időszak online előadás-sorozatai és rendezvényei után ismét jelenléti formában tarthattuk meg a konferenciát, így személyes találkozási, konzultációs és kapcsolatépítési lehetőséget biztosíthattunk az előadáson részt vevő, jelentős számú előadó és érdeklődő számára. A Debreceni Egyetem, a Miskolci Egyetem, a Nemzeti Közszolgálati Egyetem, valamint a Nyíregyházi Egyetem oktatói és kutatói a plenáris előadásokat követően 8 szekcióban adtak számot – főként a gyakorlatorientált kutatási területeiken született – eredményeikről. Biztosak vagyunk abban, hogy a konferencia nagyban elősegítette a régió egyetemei közötti kapcsolatok erősítését. Reméljük és bízunk benne, hogy a szekcióelőadások között az egyes szakterületeken kibontakozott szakmai viták, elemzések elősegítik majd az új együttműködéseket, és további innovációkat eredményeznek.

A konferencián elhangzott előadások témáit bővebben bemutató – jelen kiadványban megjelenő – tanulmányokat szakmai lektorok véleményezték, akiknek áldozatos és segítőkész munkáját ezúton is megköszönjük. A konferencia szerkesztőbizottságának nevében köszönjük továbbá minden szerzőnek, hogy beküldték tanulmányaikat, és az Acta Academiae Nyiregyhaziensis különszámát választották tudományos eredményeik bemutatására. Mindemellett természetesen köszönettel tartozunk minden – a kötet előkészítésében, szerkesztésében és megjelentetésében – segítséget nyújtó munkatársunknak szakszerű és pontos munkájukért.

Meggyőződésünk, hogy a Nyíregyházi Egyetem „Acta 7” különszámaként megjelenő jelen kiadvány lehetővé teszi a konferencián elhangzott előadások mélyebb megértését, a körültekintően összeállított szakmai anyagok felhasználhatók lesznek az egyetemeken folyó kutatások továbbfejlesztése során, és új együttműködéseket is generálnak majd a részt vevő egyetemek kutatói között.

Dr. Kovács Zoltán
intézetigazgató
Műszaki és Agrártudományi Intézet

Dr. Szigeti Ferenc
DAB Műszaki Szakbizottság
Gépészeti Munkabizottság elnöke

PLENÁRIS ELŐADÁS

Material test, microstructure and size accuracy investigations on parts produced by additive manufacturing at University of Nyíregyháza

Gergely Dezső

University of Nyíregyháza, Institute of Engineering and Agriculture, Department of Physics and Production Engineering, Sóstói road 31/b, Nyíregyháza, H-4400, Hungary, dezso.gergely@nye.hu

Abstract: Additive manufacturing shows continuously emerging trends worldwide regarding technological development, fields of applications and business market. This large family of technologies enables the user to produce directly parts with almost arbitrary geometry just from electronic body model by a single equipment without tool change and adjustments. Beside the advantage of high geometrical flexibility, nowadays additive manufacturing is not applicable to produce ready to use wares. Usually postprocessing is necessary. Laboratory at University of Nyíregyháza deals with two kinds of additive manufacturing technologies, an ink-jet type one, PolyJet, and selective laser melting of metallic materials. In this paper we present an overview of our results of investigations on size and shape accuracy, microstructure, surface hardness, surface roughness. We demonstrate that the quality of additively manufactured parts depends on three main group of factors: process parameters, manufacturing orientation and postprocessing.

Keywords: additive manufacturing, selective laser melting, size accuracy, hardness, surface roughness, microstructure

1. INTRODUCTION

1.1. Additive manufacturing

Additive manufacturing (AM) technologies today are applied in many different fields of production industry worldwide. It is not limited to mechanical engineering, but spread to vehicle, nuclear industry, architecture, medicine, pharmacy, rag-trade, food industry, arts and many more [1] [2]. AM allows user to produce parts with almost arbitrary geometry directly from CAD model with a single machine without need of retooling of making moulds. This shortens the production cycle, usually environmentally conscious and has the advantage of cost-effective scheduled piece production or customized piece production, which may answer logistical challenges in several high added value fields of industry.

AM consists of three main steps. Generating electronic body model is the first step. Actually it is independent from manufacturing, and it does not need special software. However, designers have to be aware of what method is to be used for manufacturing, and its limitations need to be considered. Second phase is slicing. It means that electronic body model is decomposed into layers, which builds up the whole model like the deck of cards is made up of cards. Slicing is a pure electronic manipulation. Materialization follows in the third step, which is manufacturing itself. A special machine, namely the AM machine creates layers sequentially upon each other while eventually the part is built up. AM technologies differ from each other in how the third step works.

Today AM technologies are classified into seven classes, namely vat photopolymerisation, material jetting, binder jetting, material extrusion, powder bed fusion, sheet lamination, directed energy deposition [3].

In our work we applied two AM technologies: a special material jetting technology namely PolyJet, and selective laser melting.

1.2. PolyJet technology

PolyJet technology was originally developed by an industrial company Objet, which later merged with Stratasys. In this AN technology liquid phase photopolymer resin is used as feedstock. Two kinds of resin are model ad support material. Printing head outshoots simultaneously and rigorously controlled a swarm of small droplets (some micrometers in diameter) which land on the surface of tray, and later on the upper surface of the half-ready part. Strong ultraviolet light makes the material cure rapidly.

An OBJET Eden 350V is installed at our laboratory (Figure 1). Our machine can produce parts from a single material in a certain manufacturing cycle. There are many different materials which differ from each other in color, mechanical behavior and level of quality control, latter means that some materials are applicable for medical appliances.

Figure 2 demonstrates the main phases of the manufacturing. On the left side body models imported into slicing software are visible. This software communicates with printing machine and sends to it data sets of layers. In the middle a photo of manufacturing machine in work can be seen. The right side of the figure shows parts printed after cleaning.

In this technology the user can adjust a few manufacturing parameters of circumstances. Layer thickness can be switched between 16 and 30 micrometers. Usage of support material can be changed by choosing mate or glossy mode of operation.

Figure 3. shows manufacturing steps of a rotor of a small scale wind rotor. In this project we strongly utilized that AM has the advantage of manufacturing arbitrary geometry. Wind rotors have standards, but the designers have to build up numerically the shape of a rotor [4].



Figure 1. OBJET Eden 350V AM machine



Figure 2. Three stages of additive manufacturing by Objet Eden 350V machine: preparing geometry in electronic format (STL) and importing it into the slicing software, manufacturing, models printed after cleaning

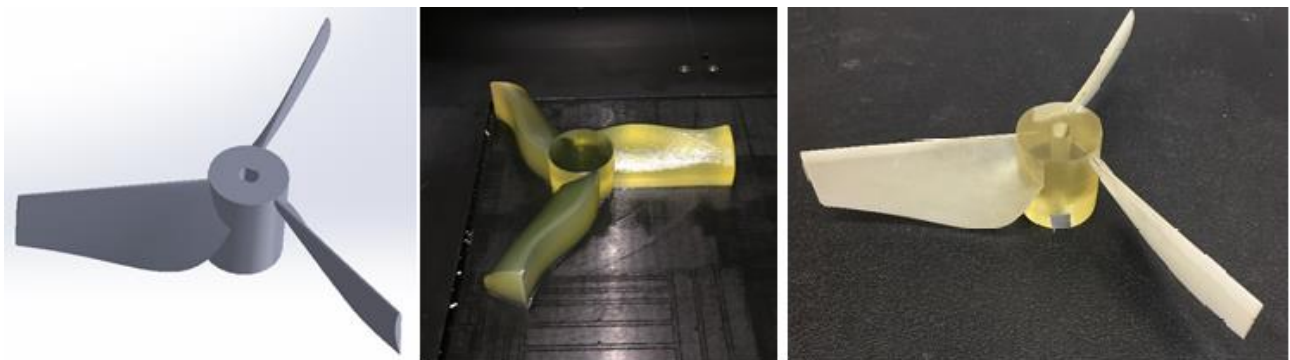


Figure 3. Additive manufacturing of the rotor of a small scale wind generator: body model, printed part on the tray at the end of manufacturing still surrounded by support material, after cleaning

1.3. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy

Second area of our work is related to metal selective laser melting (SLM) technology. Sometimes it is called direct metal selective laser technology and abbreviated as DMSLM. In the future we will refer to this technology briefly as SLM because in this paper no other type of laser melting is mentioned.

SLM belongs to large family of powder bed solidification technologies. Here we are talking about only SLM applied to metals. This manufacturing procedure starts with metallic powder which has particle size of 20-80 micrometers. The

first step of manufacturing is forming a thin layer of powder by a blade. Then the laser beam scans the layer of powder according to a special pattern and melts it. Particles melt together inside a layer and also melt to the underlying previously melted layer. This cycle repeats until the part is ready.

SLM technology uses high energy density, high temperature, temperature gradients and rates occur in the specimen. This usually leads to large in-process and also residual thermal stress. Residual stress means a challenge because it can distort the shape of the part, may cause cracks and breaks so it may lead to failure of the whole process. Today solutions of avoiding such failures are continuously developed.

In our experiments Ti6Al4V ELI material was investigated. This was given because we were the members of a consortium in a research project aiming development of orthopedic medical implants. Ti6Al4V is a chemically resistant, biocompatible material with good mass-strength ratio. However, this material is hard to machine with classical methods, has poor tribological features and brittle.

We applied an EOS 290M 400W equipment for AM of metallic specimens.

Metallic parts produced by SLM technology are not ready to use. In most cases surface quality or density of pore defects needs to be modified. We focused on surface quality, and performed experiments on surface quality improvement. We will discuss it later.

1.4. Factors affecting quality of produced parts

In case of metal SLM the user can modify one or more of several processing parameters. Infill laser power, infill laser scanning speed and layer thickness are the parameters which have the strongest effect of the quality of the manufactured part.

Figure 4 shows a schematic overview how processing parameters influence the quality of the manufactured parts in case of SLM. What is most important to see is, that there are several quality properties of the part, and almost each of processing parameters influence those. This means that production parameters can be optimized if only target quality properties are already selected.

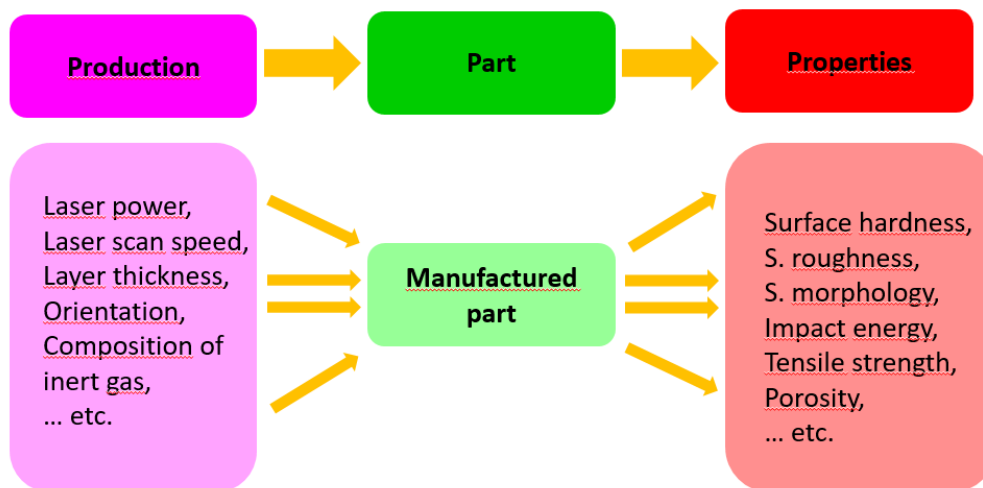


Figure 4. A schematic overview of factors determining quality of manufactured part, and variety of properties

2. SIZE AND SHAPE ACCURACY INVESTIGATIONS

Size and shape accuracy of additive manufacturing is not comparable with ones of classical subtractive technologies. This is why it is reasonable to investigate it.

2.1. Photopolymer resin parts

Photopolymer resin parts have relatively good surface qualities, so in this case we studied only size and shape accuracy. Cubic test specimens were manufactured. Distance of opposite surfaces in five points and planar shape accuracy was measured. We have proven that PolyJet technology produces parts with size accuracy as it was given in the user's manual, but an isotropy can be shown out [5].

2.2. Surface morphology of Ti6Al4V parts

Metallic parts manufactured by SLM have special morphology. Figure 5 shows an electron microscopic image of the surface of a Ti6Al4V specimen as it was manufactured. It is visible that most part of the body melted together. However, on the surface there are metal particles which did not melt completely. This results in significant protrusion on the surface which influences surface roughness. Furthermore, a large number of not melted metal particles can be observed on the surface. Those remained not because lack of cleaning, but because of adhesion. It means that phenomena at high temperature binds metal particles to the hot metal surface strongly enough so that neither those melted in, nor those can be cleaned.

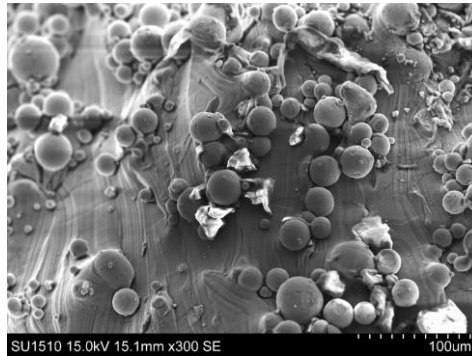


Figure 5. Surface morphology of a sample manufactured from Ti6Al4V alloy by SLM technology. Completely melted metal, partly melted metal particles and not melted but adhered particles are visible.

2.3. Dimensional accuracy of Ti6Al4V parts

Dimensional accuracy of metallic parts manufactured by SLM was studied in two kinds of bodies: ones enclosed by planar and cylindrical surfaces [6]. SLM proved to be much more anisotropic than PolyJet technology. Both cylindrical and brick-like specimens were manufactured in two different orientations: horizontal and vertical (Figure 6). In all cases horizontal specimens were visibly distorted by thermal stress effects, what's more some of those was cracked. vertically oriented specimens had good size accuracy, and those were not bended along their symmetry axis. In case of vertical manufacturing orientation we performed a measurement series of circular runout [7]. It has been shown that circular runout of vertically manufactured cylindrical test specimens is low.



Figure 6. Cuboid and cylindrical test specimens produced by the SLM machine in horizontal and vertical orientation

3. STUDY ON STRENGTH AND MICROSTRUCTURE OF PHOTOPOLYMER RESIN PARTS

Strength and microstructure of photopolymer resin specimens were studied simultaneously. It turned out that impact energy of resin is low, it means this material is brittle. When it breaks it produces broken surfaces which can be observed well by optical and electron microscopes [8].

Figure 7 shows typical surfaces of tensile test specimens. On Figure 7/A one can see the original layered structure of the material. Layers are manufactured onto each other. Top surface of the specimen is smoother than side surfaces, which are perpendicular to layers. Figure 7/B shows a broken surface of a tensile test specimen manufactured in vertical direction. It means that tensile load was perpendicular to layers formed during manufacturing process. When it cracked layers separated from each other. Pattern of fracture is radial. This refers to brittle-type fracture.

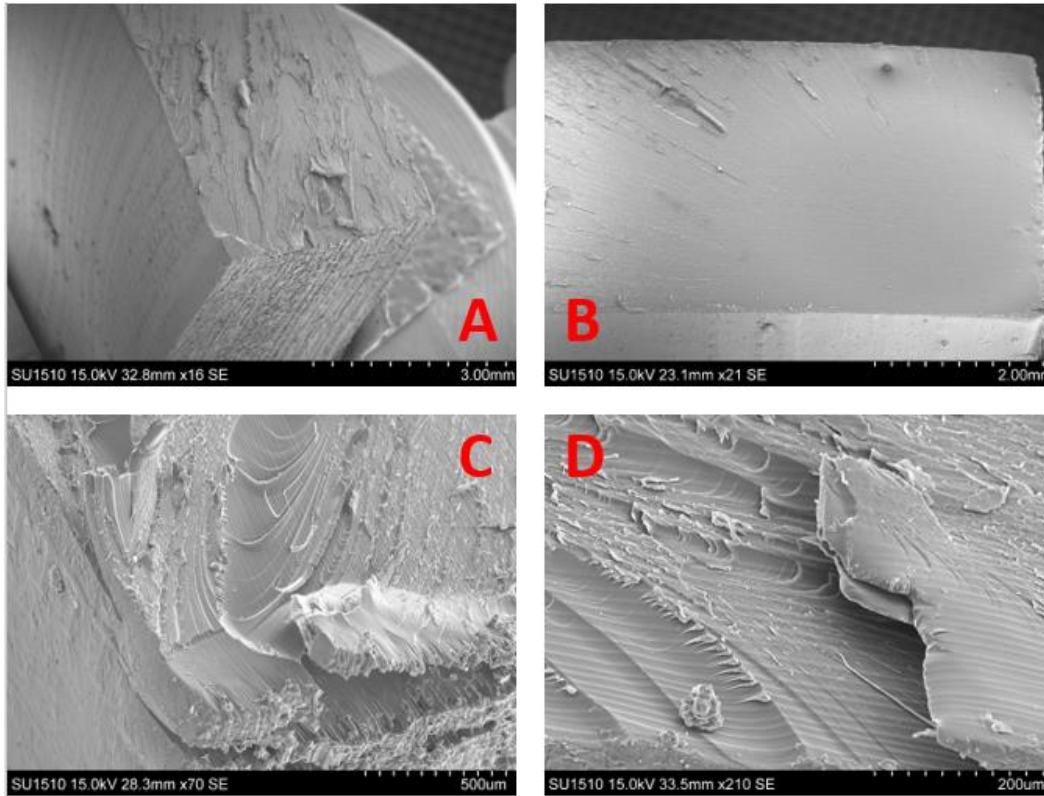


Figure 7. Broken surfaces of photopolymer resin manufactured by an Objet Eden 350V after tensile test, A: layered structure is well visible, B: radial break when load applied perpendicular to layer planes, C: layers tear when those are loaded in the plane of themselves, D: a structure which reveals crack propagation

Figure 7/C demonstrates a detail of a broken surface of a tensile test specimen manufactured in horizontal direction. It means that tensile load fall into the plane of layers created during production. In this case mechanism of failure went through in a completely different way from 7/B case. Layers in the material first elongated, then it tore. Figure 7/D shows a structure which formed under crack propagation.

Since both manufacturing procedure and microstructure are anisotropic, tensile strength and impact energy of specimens depends on manufacturing orientation.

4. SURFACE QUALITY IMPROVEMENT OF METALLIC PARTS

We have performed an experiment for surface roughness improvement of Ti6Al4V parts manufactured by SLM. Surface roughness was modified by sliding friction diamond burnishing [9]. Diamond burnishing is a relatively simple method for surface modification, which has double effect. First, it modifies surface morphology so that decreases surface roughness. Second, it increases surface hardness by making the surface more compact. This is why it is applied for not only additively manufactured parts, but for commercially manufactured specimens.

Our design of experiment involved two set of factors. The first set consisted of two production parameters: laser power, laser scan speed. The second set contained three manufacturing parameters: feed, velocity and force. Altogether there are five factors. Each factor had two levels. We performed a full factorial experiment.

Surface roughness was measured by two-dimensional and three-dimensional methods. Surface roughness parameters were measured before and after burnishing. By this we can separate effects of production parameters and post-processing manufacturing parameters to surface roughness.

We defined surface roughness improvement ratio for description of change.

It was pointed out that surface roughness improvement ratio is a function of both group of factors. On the one hand, it means that laser power and laser scanning speed applied during manufacturing influences machineability. On the other hand, burnishing parameters are also relevant in surface improvement.

Generally, it was demonstrated that higher burnishing force, higher feed and lower velocity results in better surface roughness improvement. It has to be noted also that samples manufactured with the same input energy density showed different surface roughness improvement ratio. It means that energy input itself cannot be applied for prediction of surface quality improvement.

5. SUMMARY

In this paper we presented an overview of research on certain AM methods and related postprocessing at the University of Nyíregyháza.

Two AM technologies are in the focus of our research activity.

PolyJet technology performed by an Objet machine was studied first. We investigated anisotropy of dimensional accuracy, surface roughness, impact energy and tensile strength.

SLM of Ti6Al4V was studied in a consortium. Dimensional accuracy was measured for different types of test specimens. We paid special attention to surface quality improvement by sliding friction diamond burnishing.

In the future microstructural and material properties are planned to be studied.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was co-supported by project entitled „Research of osteosynthesis of implants and development trabecular structure using additive manufacturing”, and with identification number: GINOP-2.2.1-15-2017-00055.

This project was supported by the Scientific Council of the University of Nyíregyháza.

This research was funded by National Research, Development and Innovation Fund of 515 Hungary, financed under the K_17 funding scheme, grant number NKFI-125117.

Surface roughness measurements were performed at University of Miskolc, Institute of Production Engineering. Cooperation of prof. Gyula Varga is warmly acknowledged.

Test specimens produced by PolyJet technology were manufactured at Additive Manufacturing Laboratory at University of Nyíregyháza.

Metal additively manufactured test specimens were manufactured at Biomechanical Laboratory at University of Debrecen, Hungary within the research work of the project.

Material tests were performed at Material Tests Laboratory at University of Nyíregyháza, special thanks to prof. Ferenc Szigeti and assistant Péter Kósa.

Electron microscopic investigations were performed and shots were taken at Electron Microscopic Laboratory at University of Nyíregyháza, we express our gratitude to assistant Attila Sipos.

REFERENCES

- [1] B. Blakey-Milner *et al.*, ‘Metal additive manufacturing in aerospace: A review’, *Mater. Des.*, vol. 209, p. 110008, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [2] Felhő C., Dudás I., and Varga G., ‘A rapid-prototyping eljárások orvosi alkalmazási lehetőségei’, *Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka*, vol. 1. (2005), pp. 289–282, 2005, doi: 10.36243/fmtu-2005.67.
- [3] P. Stavropoulos and P. Foteinopoulos, ‘Modelling of additive manufacturing processes: a review and classification’, *Manuf. Rev.*, vol. 5, p. 2, 2018, doi: 10.1051/mfreview/2017014.
- [4] G. Dezső and D. Molnár, ‘Design, additive manufacturing and experimental study on small scale wind rotors’, *Acta Tech. Corviniensis – Bull. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 29–34, 2020.
- [5] G. Dezső, A. Százvai, and P. Kósa, ‘Additív gyártással készített testek alakhelyességének vizsgálata’, *Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka*, vol. 1. (2012), pp. 99–102, 2012, doi: 10.36243/fmtu-2012.027.
- [6] G. Dezső and P. Kósa, ‘Dimensional and shape accuracy of cylindrical and rectangular parallelepiped-like parts made by selective laser melting technology’, *Ann. Fac. Eng. Hunedoara - Int. J. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 39–45, 2020.
- [7] G. Dezső and P. Kósa, ‘Effect of manufacturing parameters on circular runout of selective laser melted metallic parts’, *Ann. Fac. Eng. Hunedoara - Int. J. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 59–63, 2021.
- [8] G. Dezső and F. Szigeti, ‘Microscopic investigation on material structure of broken additively manufactured parts’, *Appl. Mech. Mater.*, vol. 808, pp. 175–180, Nov. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.808.175.
- [9] G. Varga, G. Dezső, and F. Szigeti, ‘Surface roughness improvement by sliding friction burnishing of parts produced by selective laser melting of ti6al4v titanium alloy’, *Machines*, vol. 10, no. 5, p. 400, May 2022, doi: 10.3390/machines10050400.

AGRÁR MŰSZAKI SZEKCIÓ

Különböző körülmények között tárolt zöldségzárítványok eltarthatósági vizsgálata

Shelf life testing of dried vegetables stored under different conditions

Antal Tamás^{1*} – Alexa Regina

¹ Nyíregyházi Egyetem, 4400 Nyíregyháza, Kótaji u. 9–11. E-mail: antal.tamas@nye.hu

Összefoglaló: Ebben a tanulmányban a sárgarépa- és a csemegekukorica-szárítványokkal végzett tárolási kísérlet eredményeit mutatjuk be. A felhasznált szárítási módszerek többek között az egyfokozatú fagyasztva szárítás, a kétfokozatú vákuum elő- és fagyasztva utószárítás, illetve az infravörös-fagyasztva szárítás voltak. A szárított termékeket a vízelvonási művelet után azonnal PE-csomagolásba helyeztük, a tárolásuk hűtőszekrényben és légtér szabályozás nélküli szobában történt 5 hónapon keresztül. A minták nedvességtartalmát havonta megmértük gravimetriás módszerrel. A tárolási terminus végén a különböző körülmények között tárolt szárítványokat érzékszervi vizsgálat alá vontuk. A tesztelést 12 panel – férfiak és nők – végezte el 1–5 pontos skála segítségével. A nedvességtartalmi adatok szerint a vizsgálat alá vont termékek tárolására a szobahőmérsékleten történő tárolás a megfelelő. Az érzékszervi vizsgálatba bevont személyek megítélése alapján a szárított sárgarépa és csemegekukorica porítható, ropogós, száraz, és a színük is megfelelő. A szárítási eljárások közül a vákuum elő- és fagyasztva utószárítás a javasolt vízelvonási megoldás a vizsgált termékek tárolását és érzékszervi tulajdonságait tekintve.

Kulcsszavak: liofilizálás, kombinált szárítás, sárgarépa, csemegekukorica, tárolás, érzékszervi vizsgálat

Abstract: This paper presents the results of a storage experiment on dried carrots and sweet corn. The drying methods used included single-stage freeze drying, two-stage vacuum pre-drying and freeze finish-drying, and infrared freeze drying. The dried products were placed in PE packaging immediately after the dehydration operation and stored in a refrigerator and in a room without air control for 5 months. The moisture content of the samples was measured monthly using gravimetric methods. At the end of the storage period, the dried products stored under different conditions were subjected to a sensory analysis. Testing was carried out by 12 panels – men and women – using a 1–5 point scale. According to the moisture content data, storage at room temperature is appropriate for the products under investigation. According to the persons involved in the organoleptic examination, the dried carrots and sweetcorn are powderable, crisp, dry and of a suitable color. Among the drying processes, vacuum pre-drying and freeze finish-drying are the recommended dehydration solutions for the storage and organoleptic properties of the products under investigation.

Keywords: lyophilization, combined drying, carrot, sweet corn, storage, organoleptic testing

1. BEVEZETÉS

A szárítás a vízelvonáson alapszik, tehát a víz elpárologtatásával csökkentik a nyersanyagban lévő víztartalmat. Ahhoz, hogy a mikroorganizmusok sejteket tudjanak felépíteni, tápanyagot tudjanak felvenni és az alapvető élettéveségükhöz (anyagcsere-folyamatok, szaporodás) vízre van szükség. Az élelmiszeripari anyagok összes víztartalmából csak a szabad vizet tudják felvenni, vagyis a kémiailag vagy fizikailag nem kötött állapotú vizet [1].

A szakirodalom szerint a szárítványok szakszerű tárolására nagy hangsúlyt kell fektetni [2]. A tárolás a dehidratált élelmiszerek esetében ömlesztve is történhet, azonban ebben az esetben különös figyelmet kell fordítani a helyes tárolásra. Fontos, hogy hűvös, páramentes helyen történjen a tárolás annak érdekében, hogy ne keletkezzenek páracseppek a termék felületén, ami a baktériumok elszaporodását segítené, illetve a termék minőségét csökkentené [3].

A kutatómunkában az alábbi célokat tűztük ki: (1) A megfelelő tárolási mód kiválasztása a szárított termékek számára. (2) A késztermék érzékszervi és nedvességtartalmi vizsgálata által megtalálni a megfelelő szárítási módot a drága üzemeltetési költségű liofilizálás helyett.

2. ANYAG ÉS MÓDSZERTAN

2.1. Nyersanyag

A sárgarépa mintákat megmostuk, majd meghámoztuk. A nyersanyag tisztítását követően 5 mm vastagságú karikákra szeleteltük fel. A feldolgozott nyersanyagot 5x100 g-os adagokra osztottuk fel (JHK-500 típusú digitális mérleg, Jadever Scale Ltd., Tajvan).

A csemegekukorica fagyasztott állapotban került megvásárlásra. A csemegekukorica előkészítése a kiolvasztás volt. Mivel nem igényelt további műveletet, szintén 5x100 g-os adagokra porcióztuk (JHK-500 típusú digitális mérleg $\pm 0,1$ g pontossággal), majd következett a nyersanyag szárítása.

2.2. Szárítási módszerek

A sárgarépaszeletek és a csemegekukorica szárítását három különböző vízfelvonási programmal végeztük el, azaz egyfokozatú fagyasztva szárítással, és az ún. hibrid vagy kombinált szárítással: infravörös szárítás – fagyasztva szárítás és vákuumszárítás – fagyasztva szárítás kapcsolattal. A szárítóberendezések tálcáira a nyersanyagot egy rétegben helyeztük el. A kísérletben felhasznált anyagok szárítását tömegállandóságig végeztük (csemegekukorica és sárgarépa: 5,71 és 15,41% n.b.). A szárítást minden esetben háromszori ismétléssel hajtottuk végre, a dolgozatban az átlagértékeket jelenítettük meg.

A fagyasztva szárítás (FD) művelete Armfield FT33 (Armfield Ltd., Egyesült Királyság) típusú berendezéssel lett végrehajtva. A minták szárítása az alábbi paraméterekkel jellemezhető: A szárítókamra hőmérséklete (a művelet végén): 22 °C. A minták átlaghőmérséklete (a művelet végén): 20 °C – beszűrő hőelemmel mérve. A kondenzátorkamra hőmérséklete (a művelet alatt folyamatosan): -48–-52 °C. A munkakamra nyomása: 86-95 Pa.

A kombinált vízfelvonás berendezései: Az infravörös szárítás (MIR) szárítószekrényben lett végrehajtva, a szárító tetején található két darab kvarcüveg infravörös cső, egyenként 400 W teljesítményűek. Az emitterek által kibocsátott sugárzás hullámhossza 2.4–3.0 μm tartományba esik. Az alkalmazott hőintenzitás 3 kW m⁻², mely 40 °C-os szárítólevegő-hőmérsékletnek felel meg. A szárítandó anyagot az infravörös csövek alatt 15 cm-re helyeztük el. Ezáltal egy intenzívebb száradást értünk el, az anyag megégése nélkül. A szárítás során az anyag tömegét a tálca alá helyezett digitális mérleg segítségével folyamatosan mértük (Precisa, Precisa Instruments AG, Switzerland, $\pm 0,01$ g pontossággal).

A vákuumszárítás (VD): A mintákat vákuumban (Kambic VS-50C modell, Kambic Lab. Eq., Semic, Szlovénia) 40 °C-on szárítottuk. A vákuumszárítóban a szárítási folyamat alatt a nyomás 7 kPa volt. A minta tömegét a szárítás során digitális mérleggel (JKH-500 modell) mértük.

MIR-FD és VD-FD: A minták előszárítását az infravörös (MIR) és vákuumszárítóban (VD) végeztük el 4, 6 perc és 2, 3 óra alatt. Ezután közvetlenül átraktuk az előszárított mintákat a liofilizáló (FD) berendezésbe. A szárítási kísérletben alkalmazott szárítási programot az 1. táblázatban közöljük.

1. táblázat. A szárítási program a sárgarépa és csemegekukorica vízfelvonására

Megnevezés	Előszárítási idő	Előszárítási hőmérséklet	Utószárítási idő	Utószárítási hőmérséklet	Szárítási idő
FD	–	–	–	–	23 óra
4minMIR-FD	4 perc	40 °C	14 óra	20 °C	14 óra
6minMIR-FD	6 perc	40 °C	13 óra	20 °C	13 óra
2hVD-FD	2 óra	40 °C	15 óra	20 °C	17 óra
3hVD-FD	3 óra	40 °C	13 óra	20 °C	16 óra

Forrás: saját szerkesztés

A különböző szárítási technikákkal előállított sárgarépa- és csemegekukorica-mintákat a szárítási folyamat után azonnal polietilén fóliába csomagoltuk.

2.3. Tárolás

A szárítmányok egy része a vizsgálati időszak alatt kompresszoros hűtőberendezésben került tárolásra, melynek típusa LEHEL HB 160. A szárítmányok másik része szobahőmérsékleten, laboratóriumi körülmények között volt tárolva. A hőmérséklet és a levegő páratartalmának mérése mindkét esetben digitális hőmérővel történt havi rendszerességgel.

2.4. A nedvességtartalom meghatározása

A nyersanyag és a szárítmány nedvességtartalmi vizsgálata nedves bázisban kifejezve (százalékban megadva) gravimetriás módszerrel történt. A meghatározás során meg kell mérni az anyag nedves (természetes) tömegét, ezt követi a (105 °C-on szárítószekrényben történő) tömegállandóságig való szárítás, majd a száraz tömeg mérése. A nedvességtartalmat a tömegkülönbségből lehet kiszámítani.

A termékek nedvességtartalmának meghatározása LP-306 típusú szárítószekrényben (Budapest, Labor-MIM) történt. A nedvességtartalom meghatározását havi rendszerességgel hajtottuk végre, minden esetben kétszeres ismétléssel.

2.5. Organoleptikus vizsgálat

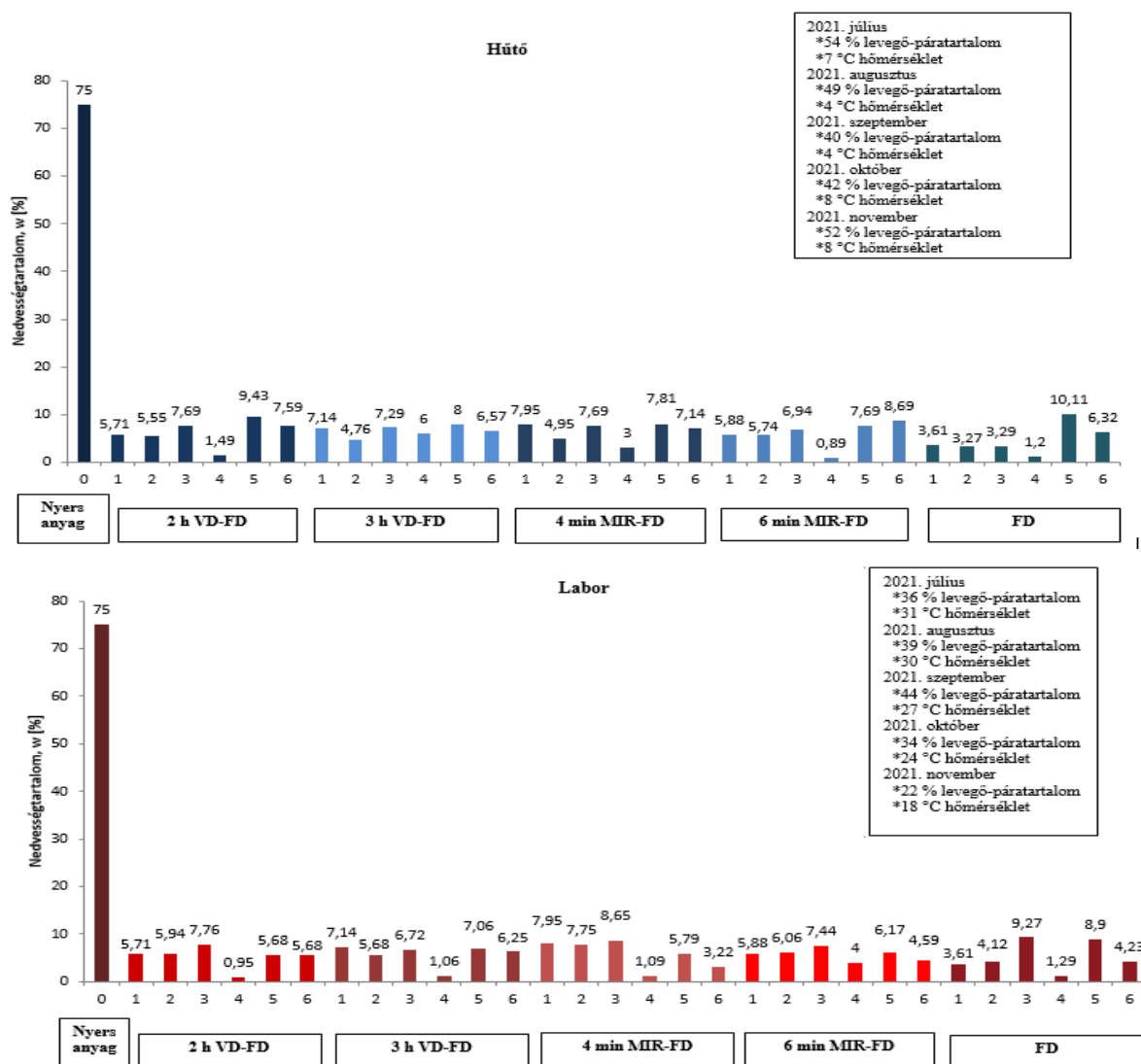
Érzékszervi vagy organoleptikus vizsgálatot a tárolási folyamat végén, az 5. hónap után végeztük el. A tesztek során a tapintás, az ízlelés és a látás érzékszerveire hagyatkoztunk. A következő anyagi jellemzőket vizsgáltuk: ropogósság, poríthatóság, ragadósság, puhaság, keménység, nedvesség, szárazság, zsugorodás, fakulás és barnulás.

A tesztek oktatás után 2 nő és 10 férfi végezte el, az alábbi életkor-intervallumokkal rendelkeztek: 21–43 év. A pontozási skála 1–5 közötti volt [4]. Elsősorban öt fő termékjellemzőre fókuszáltunk (súlyozás): ropogósság, poríthatóság, szárazság, zsugorodás és barnulás, melyek a fogyasztói elvárások alapján lettek kiválasztva.

3. MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

3.1. Az anyag nedvességtartalmának változása a tárolás alatt

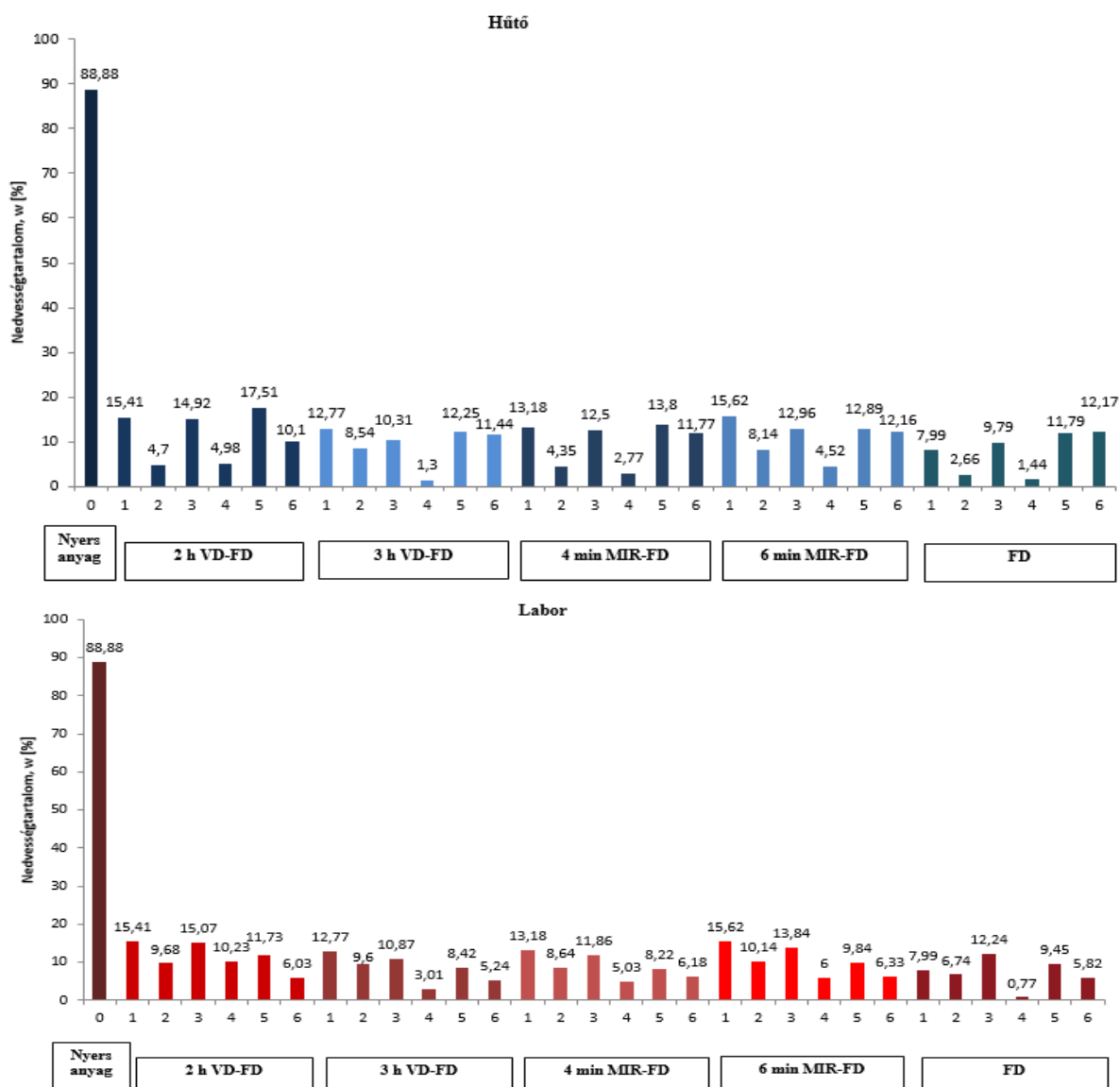
Az 1. ábrán nyomon követhető a különböző szárítási eljárásokkal tartósított csemegekukorica nedvességtartalmának (nedves bázisban megadva) változása a hűtőberendezésben és szobahőmérsékleten (labor) 5 hónapon át tartó tárolás során. Az abszcisszán található „0”-ás adat a nyersanyag nedvességtartalmát jelzi, az „1”-es szám felett pedig a szárítmány nedvességtartalmi adata látható – közvetlenül a vízelvonás után, „2–6” jelzések pedig az 5 hónapos tárolási időszak alatt mért nedvességtartalmat mutatják havi lebontásokban. Az 1. ábra jobb felső részén látható továbbá havi lebontásokban a mérés napján az adott tárolási környezet relatív páratartalma és hőmérséklete.



1. ábra. A csemegekukorica nedvességtartalmának változása a tárolási idő függvényében (Forrás: saját szerkesztés)

A mérési eredmények alapján megállapítottuk, hogy a hűtőberendezésben tárolt csemegekukorica-minták nedvességtartalma (2–6 adator) a legkiegyensúlyozottabb a 3hVD-FD szárítási módszerrel dehidrált mintáknál volt. A szabályozott légtér nélküli helyiségben (labor) a 2hVD-FD és 6minMIR-FD vízelvonási eljárásokkal tartósított kukoricamintáknál volt legkevésbé megfigyelhető a nagymértékű vízfelvételi és -leadási ingadozás.

A 2. ábrán megfigyelhető a különböző szárítási eljárásokkal tartósított sárgarépaszeletek nedvességtartalmának (nedves bázisban megadva) változása a hűtőberendezésben és szobahőmérsékleten (labor) 5 hónapon át tartó tárolás során.



2. ábra. A sárgarépa nedvességtartalmának változása a tárolási idő függvényében (Forrás: saját szerkesztés)

A mérési eredmények alapján megállapítottuk, hogy a hűtőberendezésben tárolt sárgarépa minták nedvességleadása és -felvétele (2–6 adatsor) a 3hVD-FD és 6minMIR-FD szárítási módszereknél a legkevésbé intenzív. A szabályozott légtér nélküli helyiségben (labor) a 3hVD-FD és 4minMIR-FD vízlevonási eljárásokkal tartósított sárgarépaszeleteknél volt legkevésbé megfigyelhető az intenzív vízfelvételi és -leadási ingadozás.

3.2. Az organoleptikus vizsgálat eredményei

A 2. és 3. táblázat tartalmazza a különböző szárítási eljárásokkal kezelt csemegekukorica és sárgarépa érzékszervi vizsgálatának eredményeit. Mindkét táblázatban piros színnel jelöltük azokat a tulajdonságokat, amelyek nagyobb érdeklődésre tarthatnak számot a fogyasztó számára. A pontozási skála szélső értékeit tekintve az „1”-es érték azt jelenti, hogy nem jellemző/rendkívül gyenge, szegényes, az „5”-ös pedig a kitűnőt jelenti.

A csemegekukorica esetében a szobahőmérsékleten tárolt 2hVD-FD és 6minMIR-FD minták kapták a fogyasztói elvárásokat figyelembe véve a legkedvezőbb pontszámokat (2. táblázat).

A szárított sárgarépa érzékszervi vizsgálata a csemegekukoricához hasonló eredményt hozott, azaz a 2hVD-FD, FD és 6minMIR-FD szobahőmérsékleten tárolt minták kapták a fogyasztói elvárásokat figyelembe véve a legkedvezőbb pontszámokat (3. táblázat).

2. táblázat. A csemegekukorica-szárítmány érzékszervi vizsgálata

		Hűtőberendezésben tárolt szárítmány						Szobahőmérsékleten tárolt szárítmány							
		4 min	6 min	2 h VD- MIR-FD	3 h VD- FD	3 h VD- FD	3 h VD- FD	2 h VD- FD	6 min	4 min	FD	Minta számozás			
	FD	3,58	4,41	3,91	4,33	4,25	4,41	4,41	4,5	4,33	4,33	Ropogós	4,33	4,25	1,41
	FD	4,33	4,41	4,16	4,08	4,75	4,83	4,75	4,66	4,41	4,41	Porítható	4,25	4,41	1,16
	FD	1,5	1,58	1,33	1,75	1,25	1	1,25	1,08	1,16	1,16	Ragadós	1,41	1,16	1,66
	FD	2,25	2,08	2,25	2,33	2,25	2,33	2,16	2,91	2,5	2,41	Puha	1,66	2,41	2,41
	FD	1,16	1,16	1,5	1,25	1,08	1,16	1,08	1,08	1,25	1,5	Kemény	2,41	1,25	2,58
	FD	4,75	4,5	4,33	4,66	4,66	4,5	4,66	4,75	4,66	4,58	Nedves	1,5	4,58	4,58
	FD	1,83	2,58	2	2,16	1,75	1,5	1,75	1,91	2,33	1,41	Száraz	4,58	1,41	1,41
	FD	3	1,91	3,58	3,5	4	3,66	3,66	2,91	3,08	4,5	Zsugorodás	1,41	4,5	4,5
	FD	1,91	2,5	1,41	1,25	1,25	1,33	1,33	2,75	2,58	1	Szín: fakulás	4,5	1	1
	FD	4,16	4,41	4,16	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	Szín: barnulás	4,08	4,08	4,08

(Forrás:saját szerkesztés)

3. táblázat. A sárgarépa-szárítmány érzékszervi vizsgálata

		Szobahőmérsékleten tárolt szárítmány						Szobahőmérsékleten tárolt szárítmány							
		4 min	6 min	2 h VD- MIR-FD	3 h VD- FD	3 h VD- FD	3 h VD- FD	2 h VD- FD	6 min	4 min	FD	Minta számozás			
	FD	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	Ropogós	4,08	3,91	1,33
	FD	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	Porítható	3,91	3,18	1,33
	FD	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	Ragadós	1,33	1,25	1,25
	FD	4,58	4,58	4,58	4,58	4,58	4,58	4,58	4,58	4,58	4,58	Puha	1,16	4,58	4,58
	FD	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	Kemény	4,58	1,16	1,16
	FD	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	Nedves	1,25	1,25	1,25
	FD	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	Száraz	4,91	4,91	4,91
	FD	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	Zsugorodás	2	2	2
	FD	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	Szín: fakulás	4,41	4,41	4,41
	FD	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	Szín: barnulás	1	1	1

Hűtőberendezésben tárolt szárítmány	6 min MIR-FD	4,5	3,25	1,16	1,25	4,66	1,16	4,57	3,08	1,66	1,08
	2 h VD-FD	4,52	3,28	1,33	1,5	4,25	1,25	4,58	2,08	3,25	1,16
	3 h VD-FD	4,08	2,58	1,5	1,25	4,75	1,16	4,91	3,5	1,91	1,25
	3 h VD-FD	2	1,75	2,41	2,58	3,16	1,83	4,5	3,75	1,58	1,25
	2 h VD-FD	2,58	1,91	1,83	1,91	3	1,41	4,16	2,41	3,25	1,16
	6 min MIR-FD	3	1,83	2	1,66	3,83	1,25	4,75	2,5	1,58	1,66
	4 min MIR-FD	2,5	1,91	2,16	1,66	3,75	1,41	4,75	2,5	1,58	1,08
	FD	3,08	2,75	2,08	1,91	3,25	1,33	4,58	1,33	4,66	1,08

(Forrás:saját szerkesztés)

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Az eltarthatósági vizsgálat eredményei alapján a következő megállapításokra jutottunk:

A sárgarépa-szárítmány tárolása során megfigyeltük, hogy itt intenzívebb a nedvesség vándorlása (az anyag likacsos, porózus szerkezete miatt).

A csemegekukorica esetében megállapítottuk, hogy az alacsony nedvességtartalom miatt kismértékű a nedvességleadás és -felvétel a tárolás alatt a másik termékhez hasonlítva.

A tárolási eredmények alapján a vizsgálat alá vont termékek tárolására a szobahőmérsékleten történő tárolás a megfelelő (kisebb mértékű az anyag nedvességleadása és -felvétele).

Az érzékszervi vizsgálatba bevon 12 fő megítélése alapján a szárított sárgarépa és csemegekukorica porítható, ropogós, száraz, és a színük is megfelelő. A fogyasztói megítélés alapján a szárítmányok tartósításra a VD-FD szárítás a legmegfelelőbb az FD mellett.

Az organoleptikus vizsgálatok nem mutattak kimagasló eltérést a szobahőmérsékleten és a hűtőberendezésben tárolt termékek között.

Összegezve a kutatás eredményeit megállapítottuk, hogy a vákuum elő- és fagyasztva utószárítás a javasolt szárítási megoldás a vizsgált termékek tárolását és érzékszervi tulajdonságait tekintve.

A 2h VD-FD szárítási megoldás 26%-kal, a 3h VD-FD szárítási mód pedig 30,4%-kal csökkentette a liofilizálás működési idejét.

Köszönetnyilvánítás

A szakcikk a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] I. Juhász-Karakas, I. Kuthyné Juhász, Z. Maknics, B. Tolnainé Szabó, Élelmiszer-tartósítás, Vác: Duna-Mix, 2012.
- [2] L. Dong Sun és G. L. Robertson, "Interactive influence of decision criteria, packaging film, storage temperature and humidity on shelf life of packaged dried vegetables," Food Packaging and Shelf Life, 28, 100674, 2021.
- [3] E. Szenes, Gyümölcsök és zöldségek szárítása, aszalása. Budapest: Integra-Projekt Kft., 1992.

- [4] Ö. Vajda, Az élelmiszerek érzékszervi bírálatának elméleti és gyakorlati kérdései II., Budapest Vegyészeti és Élelmiszervizsgáló Intézete, 1969.

Vigyázz a borod egészségére (is)!

Take care of the health of your wine

Beszeda Imre^{1} – Stonawski Tamás²*

¹ Nyíregyházi Egyetem, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b., beszeda.imre@nye.hu
² Nyíregyházi Egyetem, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b., stonawski.tamas@nye.hu

Összefoglaló: Elképzelni is nehéz, hogyan képes egy oldat több mint 2500 komponenst megtartani anélkül, hogy idő előtt kicsapódnának belőle az alkotóelemei. Ez a különleges oldat, a bor számos folyamat eredményeképpen jön létre, ami közben anyagkiválás, melléktermékek, seprű, zárványgázok, bor-sók keletkeznek. Ezek a komponensek nem mindig kívánatosak a borban, tehát nem kell sajnálni, hogy csökken a komponensszám. A megmaradt komponensek viszont a bor érésénél már jelentősen nem csökkennek, de ehhez megfelelő körülményeket kell biztosítani (állandó hőmérséklet, nyugalom stb). Ha adottak is a megfelelő körülmények, a bornak a fogyasztóhoz valahogyan el kell jutnia. A bor tárolására nagy figyelmet szenteltek már eleink is, de a rázkódásmentes szállítás még a mai napig is várat magára. Sokéves tapasztalat alapján a következő öt legfontosabb hatás teheti tönkre a bort: hőfok, páratartalom, fény, levegőminőség/szellőzés, rázkódás. Méréseket végeztünk annak érdekében, hogy megvizsgáljuk, milyen hatással van a borra a két legkevésbé kiküszöbölhető tényező, a hőmérséklet-változás, illetve a mozgás és a rázkódás.

Kulcsszavak: bor, tárolás, hőmérséklet, rázkódás, a bor minősége

Abstract: It is hard to imagine how a solution can retain more than 2500 components without precipitation of its components. This special solution, the wine, is the result of a number of processes, during which several substances are formed, by-products, precipitates, wine lees, gases, salts. These components are not necessarily desirable in wine, so there is no need to regret the reduction in the number of ingredients. However, the remaining components are no longer significantly reduced during the maturation of the wine, but appropriate conditions (constant temperature, rest, etc.) must be provided for this. Even if the right conditions exist, the wine must be transported to the consumer somehow. Our ancestors have already paid great attention to the storage of wines, but vibration-free transport is still to come. Based on many years of experience, the following five effects can ruin a wine: temperature, humidity, light, air quality / ventilation, vibration. Measurements have been performed to examine the effect of the two least preventable factors on the wine, the temperature change and transportation and vibration.

Keywords: wine, storage, temperature, shaking, wine quality

1. BEVEZETÉS

Elképzelni is nehéz, hogyan képes egy oldat több mint 2500 komponenst megtartani anélkül, hogy idő előtt kicsapódnának belőle az alkotóelemei. Ez a különleges oldat, amit az oldatok királyának is neveznek, a bor. A szőlő újjászületésének is nevezett, ősrétről ismert alkoholos ital számos folyamat eredményeképpen jön létre, ami közben többször keletkezik anyagkiválás, melléktermék, seprű, egyéb zárványgázok, bor-sók. Ezek a komponensek nem mindig kívánatosak a borban, tehát nem kell sajnálni, hogy csökken a komponensszám. A megmaradt komponensek viszont a bor érésénél már jelentősen nem csökkennek, de ehhez a megfelelő körülményeket is biztosítani kell (állandó hőmérséklet, páratartalom, sötétség és nyugalom). Ha biztosítottak is a megfelelő körülmények, a bornak a fogyasztóhoz valahogyan el kell jutnia. A borok tárolására nagy figyelmet szenteltek már eleink is, de a rázkódásmentes szállítás sokat váratott és várat még a mai napig is magára.

A bor tárolására és szállítására kezdetben amforákat és állatbórból készült borostömlőket használtak. Hűvös kamrában (*cella vinaria*) tárolták jól bedugaszolva [1]. A rómaiak a harmadik században kezdték el használni a hordókat a gallokkal való kereskedelmi és katonai kapcsolataik eredményeként, akik már több évszázada hordót készítettek [2]. Az ókorban a római provinciákból szállított borok rugózás nélküli, macskaköves és földutakon az éjjeli és nappali hőingadozás közepette érték el a központot akár több hét alatt. Valamelyest javult a helyzet a légkondicionálás és a rugalmas futóművek által, de teljesen ma sem zárható ki a fenti két hatás.

Sok-sok éves tapasztalat alapján a következő öt legfontosabb hatás teheti tönkre a bort [3]:

Hőfok: A bor első számú ellensége a meleg, aminek hatására a bor gyorsabban öregszik, és visszafordíthatatlan párolt aromák alakulnak ki. Szaknyelven ez az ún. „főtt” bor. Bár kevésbé ártalmas, mint a meleg: az alacsony hőmérséklet is károsíthatja a bort. A túl hideg hőmérsékletű borospince leállítja az öregedés folyamatát, a bor megfagyásától mégis óvakodni kell, mert oxidálódik, vízízüvé válik, keserű utóízekkel [4].

Páratartalom: A túl alacsony páratartalomban a borosüvegek dugói idővel kiszáradnak és megrepednek, ami a bor oxidációjához vezet. A túl nedves pincék viszont hajlamosak a „rossz” penészre. Ideális a 60%-os (+/-10%) relatív páratartalom.

Fény: Bár az üvegpalack sötétebb színe némi védelmet nyújt, a bort mégsem szabad túlzott mennyiségű fénynek kitenni, mivel az ultraibolya-sugárzás lebonthatja azokat az összetett molekulákat, amelyek hozzájárulnak a bor kívánatos ízéhez. Az UV-fénynek való kitettség a túlfőtt káposzta, a nedves karton és a szennyvíz ízét okozza, és Light Strike [3] néven is ismert. Jó megoldás ezek kiküszöbölésére a sötét a pince, izzólámpák használata a fénycsövek helyett, mert azok kisebb mennyiségű UV-fényt bocsátanak ki.

Levegőminőség/szellőzés: Mivel a bor a parafán keresztül lélegzik, idővel oxigént enged be, fontos, hogy a borospincében a levegő tiszta legyen. Ellenkező esetben fennáll annak a veszélye, hogy megváltozik a bor íze és illata. Egyes molekulák jóindulatúak, míg mások, mint például a friss festékekben és tisztítószerekben lévő kémiai vegyületek, károsabbak. Az aromás élelmiszerek, például a fokhagyma, bizonyos zöldségek, de a kitelettetett muskátli illatanyagai is beszívároghatnak a borba.

Rázkódás: A bor érése során üledék képződik (jellemzően tanninok a vörösborok esetén) [4]. A túlzott rezgések kémiai reakciókat idéznek elő az érlelt, finom borok palackjaiban, amelyek megváltoztatják a szerves savakat és a tanninokat, miközben tompítják az ízt. Kerüljük tehát a palackok szükségtelen mozgatását, pakolgatását! Bár nehéz lehet teljesen kiküszöbölni a rezgéseket, különösen városi környezetben, a legjobb, ha a borokat a háztartási gépektől, lépcsőházaktól és felújítás alatt álló épületektől távol tároljuk.

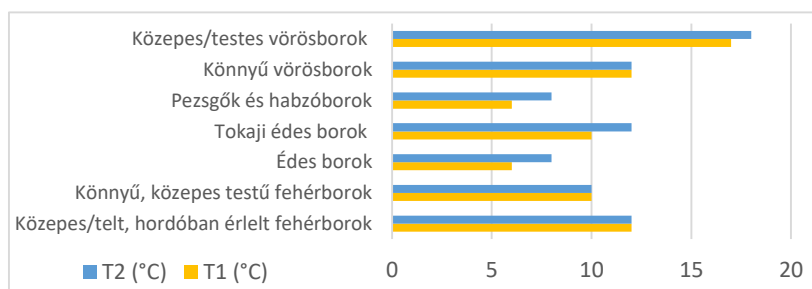
Sok szó esik a borok egészségünkre gyakorolt hatásáról, sokszor megosztó formákban. A cikkünkben most a borok egészségére vonatkozó környezeti hatásokkal foglalkozunk, azaz a fent felsorolt öt hatás közül kettőt vettünk górcső alá, hogy megvizsgáljuk, milyen hatással van a borra a két legkevésbé kiküszöbölhető tényező, a hőmérséklet-változás, illetve a mozgatás és a rázkódás. Méréseinket 2022. januárjában egy mátészalkai borospincében végeztük el a K2 Cuvée 2020 vörösborral, amely egy nemzetközi borversenyen 2022-ben aranyérmet nyert.

2. A MÉRÉSEK

Korábbi vizsgálataink [5] alapján elmondhatjuk, hogy a hőmérséklet-változás hatására megváltozik a borok vezetőképessége és pH-értéke. A következő mérésorozatunkban egy „körfolyamatot” hajtottunk végre a hőmérséklet függvényében a bormintával. A pincehidegről fokozatosan felmelegített bort visszahűtöttük a kiindulási hőmérsékletre, és arra voltunk kíváncsiak, hogy a korábbi méréseinkben mért paraméterek is felveszik-e a kezdeti értéküket a folyamat végén. A csökkenő hőmérséklet hatását hasonlóképpen vizsgáltuk. A pincehidegről -7 °C-ig is lehűtöttük a bort, majd pincehidegre visszamelegítettük a folyamat végén. Mindkét folyamat után empirikusan is megvizsgáltuk a bormintát. Egyfajta bor szerepelt a kísérleteinkben, így az ízelelésnél könnyebb volt viszonyítani a kiindulási ponthoz, ill. a mérés során ezzel egyéb tényezőket is kizárhattunk.

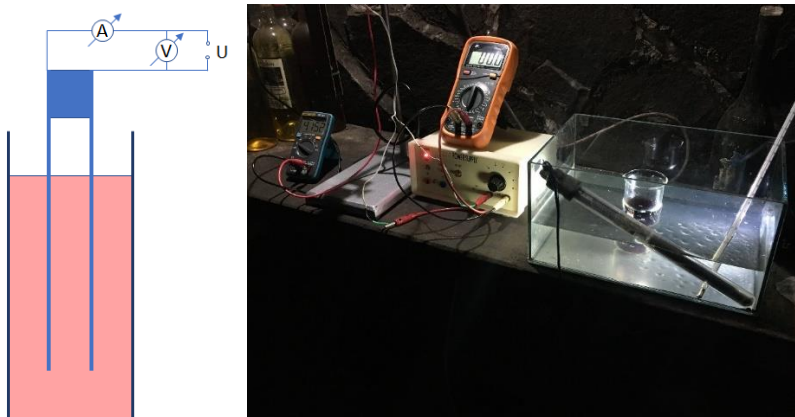
2.1. A hőmérsékletváltozás hatása a borra

Közismert, hogy a borok élvezeti tartalma csak bizonyos hőmérsékleti tartományban éri el a csúcspontját, amit az 1. ábra illusztrál. Azt már csak mi tesszük hozzá, hogy a boltokban általában nem fogyasztási hőmérsékleten tárolják a palackokat, tehát nemcsak a pihentetés, de a behűtés miatt is érdemes előre gondolkodni. Ugyanis az esetek többségében nincs lehetőség a borok temperált szállítására, nyáron gyakran túl meleg, télen esetleg túl hideg körülmények közé kerülnek, akár hosszabb időre. Természetesen a lehető leginkább kerülni kell a hőmérsékleti szélsőségeket, például hűtő- vagy termostáskák segítségével, de a borok minőségének megőrzése érdekében az is fontos, hogy túlzott felmelegedés vagy lehűlés után lehetőségük legyen csak lassan, fokozatosan visszatérni a számukra optimális hőfokra: a radiátort és a fagyasztót ne hívjuk segítségül [6]!



1. ábra. A borok élvezeti tartalma csak bizonyos hőmérsékleti tartományban éri el a csúcspontját. T1 az alsó, T2 a felső hőmérsékleti határ. [7] alapján készítve

Korábbi méréseinkből bebizonyosodott, hogy a hőmérséklet növelésével a borok vezetőképessége nő, pH-értéke csökken [5]. A méréseket egy, a pincét el nem hagyó K2 Cuvée-vel végeztük el 14 °C-tól 77 °C-ig, kb. 10 °C-onként megmérve a vezetőképességet és a pH-értéket. Arra voltunk kíváncsiak, ha e magas hőfokról a bort visszahűtjük a kiindulási hőmérsékletre, vajon a mért két érték és a bor élvezeti értéke is visszaáll-e az eredetire. Az elektromos vezetőképességet a 2. ábrán bemutatott elrendezésben, az [5]-ben részletezettek szerint mértük (árammérésre Aneng AN8002, feszültségmérésre SMA64 tip. multimétereket alkalmazva).



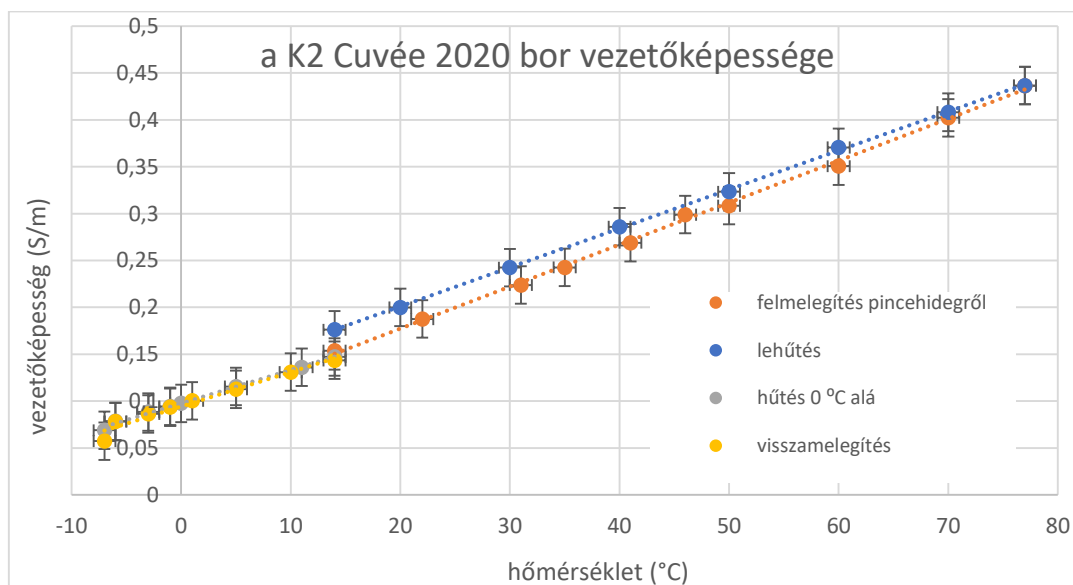
2. ábra. Az elvi kapcsolási rajz és a borospincében összeállított áramkör a vízfürdővel [5]

A melegítést vízfürdővel végeztük. Az alacsony hőmérsékleti tartományban külön méréseket végeztünk, a hűtést egy háztartási Zanussi hűtőgéppel (fagyasztóval) oldottuk meg.

2.1.1. A vezetőképesség- és pH-mérések eredményei

A vezetőképesség-mérések eredményeit a 3. ábra, míg a pH-mérések eredményeit a 4. ábra mutatja. Ezek alapján az alábbiakat állapíthatjuk meg. Az elektromos vezetőképesség határozottan lineáris hőmérsékletfüggést mutat mind a 14 °C → 77 °C, mind a 77 °C → 14 °C tartományban, és hibahatáron belül visszaállt a kiindulási értékre. Ugyanezt láthatjuk a 14 °C → -7 °C és -7 °C → 14 °C hőmérséklet-tartományban is, ráadásul ugyanakkora meredekséggel.

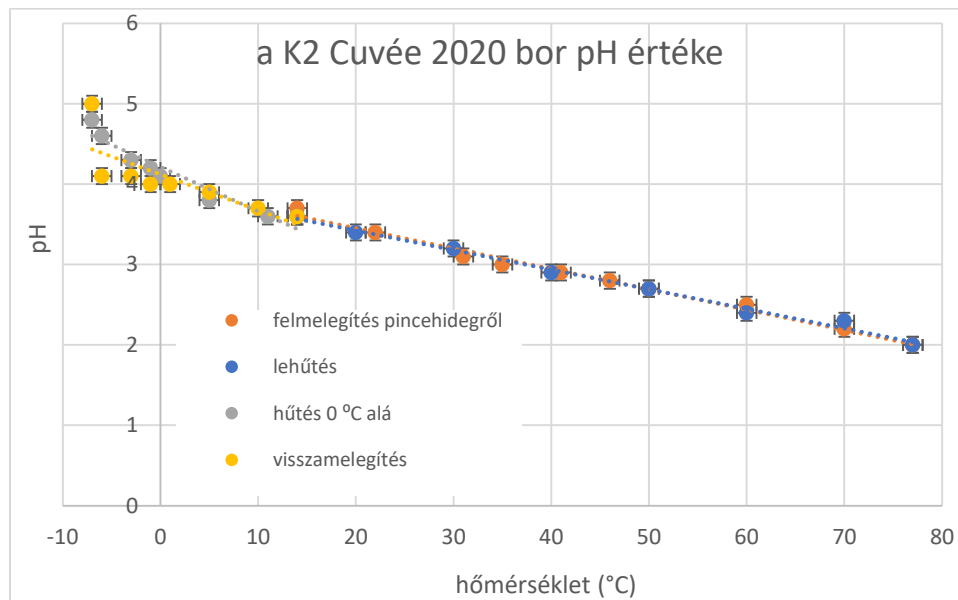
Ez alapján arra következtethetünk, hogy a bor összetételében nem következett be olyan változás, ami az elektromos vezetőképesség biztosításában szerepet játszó ionok számának vagy milyenségének irreverzibilis változását okozta volna.



3. ábra. A két ciklus vezetőképesség-hőmérséklet grafikonja (14 °C – -7 °C – 14 °C, ill. 14 °C – -7 °C – 14 °C)

A pH-érték változására hasonló megfigyeléseket tehetünk: bármilyen irányban is változtatjuk a hőmérsékletet, a pH-értéke visszatér a 14 °C-on mért kiindulási értékre. Itt meg kell jegyezni, hogy alacsony (-5 °C alatti) hőmérsékleten bizonytalanság látható a pH-értékekben, ami abból adódott, hogy ezen a hőmérsékleten a bor elkezdett megfagyni, kásásodni, és ez a jég a pH-mérőre is kezdett ráfagyni, ami miatt a mérés itt pontatlan lett.

A következtetés a fentebbihez hasonló: a hőmérséklet növelése vagy csökkentése sem okoz irreverzibilis változást a bor ionos összetételében.



4. ábra. A két ciklus pH-hőmérséklet-grafikonja (14 °C – 77 °C – 14 °C, ill. 14 °C – -7 °C – 14 °C).

Összességében megállapíthatjuk, hogy sokkal szélesebb tartományban is érvényes az [5]-ben megfogalmazott tapasztalat, miszerint a hőmérséklet növelésével a borok vezetőképessége nő, pH-értéke csökken, ráadásul a folyamat inverze is igaz. A vezetőképesség és a pH-érték igen nagy változáson ment keresztül, de a „körfolyamat” kezdetére visszaérve a vizsgált értékek is felvették a kiindulási értéküket, azaz nem volt rájuk hatással a szélsőséges hőmérséklet-változás. Ezek alapján azt gondolhatnánk, hogy az ilyen szélsőséges hőmérséklet-változásoknak nincs hatása a borra, de ennek határozottan ellentmondanak az empirikus vizsgálatokkal szerzett tapasztalataink (ld. lejjebb).

2.1.2. Empirikus vizsgálatok

Az empirikus vizsgálatok szerint a borminták élvezeti értékei jelentősen csökkentek mind a melegítés, mind a drasztikus hűtés után. A vizsgálatot mindig 14 °C-ra visszahűtött/visszamelegített állapotban végeztük, melynek konkrét tapasztalatai az alábbiak voltak.

A felmelegített, majd visszahűtött bor

A minta 77 °C hőmérsékletnél elkezdett habosodni, mozgatással érezhetően hígult.

Ízlelésre: „híg”, vizenyős, ízetlen (vízízű), sőt inkább rossz ízű, de a fás jellege valamennyire megmaradt, „savanyú víz” hatású.

Szaglásra: hasonló illatok, mint a kiindulási állapotban, de jóval tompábbak, gyengébbek.

Színre: kevésbé mélyvörös, világosabb, mattabb.

Összefoglalva: a bor szétesett, a markáns savak eltűntek, savanyúvíz-jellege lett.

A lehűtött, majd visszamelegített bor

A vizsgálat során 10 mintát helyeztünk el a mélyhűtőben. A mintákat 10 percenként vettük ki a hűtőszekrényből, majd megvártuk, míg visszamelegednek 18 °C-ra. A kivételkor az első minta hőmérséklete 0 °C, míg az utolsó mintáé -7 °C volt. A kásásodás 70 perces hűtés után -6 °C-nál következett be, 100 percnyi hűtés után már nehezen lehetett a hőmérőt a jegesedés miatt a mintába helyezni.

Ízlelésre: a -3 °C-ig hűtött bor vékonyodni kezd, testessége csökken, vizessé kezd válni. Ezek a tulajdonságok csak fokozódnak a további hűtéssel. A csersavak viszonylag megmaradnak, de a kásásodás kezdetével az ízanyagok jelentős része eltűnik.

Szaglásra: hasonló illatok, mint a kiindulási állapotban, de jóval tompábbak, gyengébbek. -3 °C-tól jelentősen tompulnak, majd a kásásodásnál illatcsökkenés következik be. -6–7 °C-nál az illóolajok és az alkoholillat teljesen eltűnik.

Színre: a kásásodás után világosodik és bemattul.

Valószínűleg olyan összetettebb molekulák változásaiban keresendő az állagromlás magyarázata, ami nincs, vagy csak elenyésző módon van hatással a vezetőképességre és a pH-értékre.

2.2. A rázkódás hatása a borra

Gyakran halljuk a köznap nyelvben, hogy a bor „török” vagy „megtörök”, de a borászatban a törés valamilyen oxidációs (barnatörés, fehértörés, feketetörés) és redukciós folyamatokat jelent (rezetörés) [8].

Néhány kísérlettel azt is vizsgáltuk, hogy milyen hatással van az utaztatás, szállítás a borra. Bizonyos szakírásokban azt olvashatjuk, hogy a bornak legalább egy nap nyugalomra, fektetésre van szüksége a szállítás után, hogy aztán eredeti, legjobb formájában kóstolhassuk (például érkezzenek egy vidéki pincészettől a fővárosi borkereskedésig vagy akár külföldről postai úton). Szállításkor óhatatlanul rázkódik az ital, és elemei (savak, alkohol, tannin) felrázódnak, az összhatás pedig diszharmonikussá válhat a kóstoláskor. Főként igaz ez a komoly beltartalommal rendelkező vörösborokra. Itt a szüretlen borokban üledékkiválások is történhetnek, ami a felkavarodás miatt ront az élvezeti értékén. Ugyanakkor nem muszáj pihentetni azokat a borokat, amelyek csak rövidebb, rázkódásmentes utat tettek meg [6].

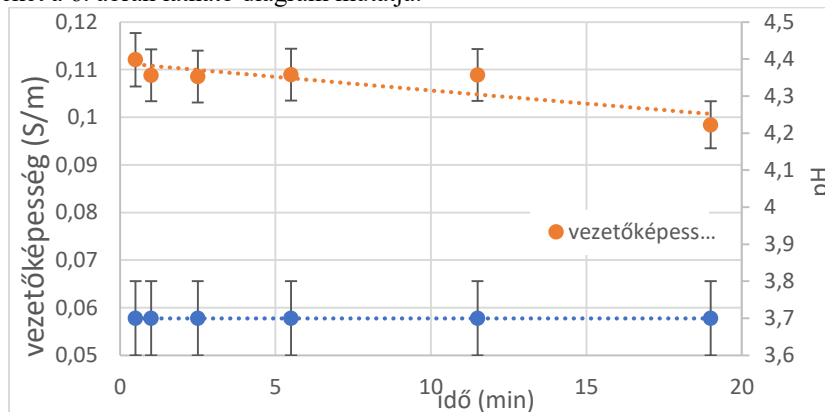
A borászatból az áruházak polcaira általában teherautóval juttatják el az árut. Ez akár több száz kilométeres utaztatást is jelent, helyenként esetlegesen kátyús utakon (hosszú idejű rázkódásnak vannak kitéve a borok). Nem elhanyagolható az a viszonylag széles hőmérséklet-tartomány, ami az évközi folyamatos feltöltés eredménye, hiszen télen extra hidegben, nyáron akár kánikulában sem állhat meg a kiszállítás. További rázkódás éri a borokat a fel- és lepakolás, raktározás, polcra helyezés közben is. Ezek szimulálását kétféleképpen próbáltuk: az egyik eljárásban egy személygépkocsi csomagtartójában utaztattunk egy palack K2 Cuvée bort összességében kb. 500 km úton 30-50 km-es szakaszokban (5. ábra). A tesztszállítás decemberben történt, így alapos hőmérséklet-ingadozásnak is ki lett téve a bor. A pincében tartott borral összehasonlítva nem történt releváns változás sem a pH-értékben sem a vezetőképességben. A másik eljárásban egy ultrahangos rázóval (Sanitas márkájú ultrahangos tisztító, 43kHz tisztítási frekvencia, 5. ábra) rázattunk egy adott mennyiséget ugyanebből a borból, különböző időtartamokig. Minden időszakos után mértük a bor elektromos vezetőképességét és pH-ját.



5. ábra. Balra az autóban szállított bedobozolt borok, jobbra a rázatógépbe helyezett bor a mellette lévő elektromos mérőműszerekkel a borospincében

2.2.1. A rázkódási vizsgálatok eredményei

Az eredményeket a 6. ábrán látható diagram mutatja.



6. ábra. A K2 Cuvée bor elektromos vezetőképességének és pH-értékének vizsgálata ultrahangos rázatás közben

A diagramról leolvasható, hogy az elektromos vezetőképesség enyhén csökkent, ami szintén a bor romlására utal, viszont a pH-érték konstans maradt.

2.2.2. Empirikus vizsgálatok

Ebben az esetben is végeztük empirikus vizsgálatot. A 20 percig rázatott bormintán szerzett konkrét tapasztalat az alábbi.

Az ultrahanggal (20 percig) rázatott bor: üressé vált, illatgazdagsága, testessége eltűnt, színre nem változott.

Vagyis az elektromos vezetőképesség enyhe csökkenése mellett a bor élvezeti értéke is csökkent a ráztatás hatására, de mégsem olyan drasztikus mértékben, mint a szélsőséges hőmérsékleti változások után.

3. KONKLÚZIÓ

A bormintával egy „körfolyamatot” hajtottunk végre a hőmérséklet függvényében. A vezetőképesség és a pH-érték igen nagy változásra ment keresztül, de a kiindulási hőmérsékletre visszaérve a vizsgált értékek is felvették a kiindulási értéküket, azaz nem volt rájuk hatással a szélsőséges hőmérséklet-változás. Az empirikus vizsgálat szerint viszont a borminták élvezeti értékei jelentősen csökkentek. Valószínűleg olyan összetettebb molekulák változásaiban keresendő az állagromlás, ami nincs, vagy elenyésző módon van hatással a vezetőképességre és a pH-értékre. A bornak a rázkódás nem ártott annyit, mint a hirtelen és szélsőséges hőmérsékleti változás. A hőmérséklet kisebb mértékű és lassú változása nem ront a bor élvezeti értékén, ugyanez a szállításra is elmondható.

A borversenyek előkészítésében fontos momentum tehát, hogy ne a bírálás előtt vegyék át a mintákat a versenyzőktől, hanem legalább egy nappal előtte, így a borok pihennek, és fokozatosan veszik át a kívánt kóstolási hőmérsékletet. Bizonyos borászati cégek fontolóra veszik, hogy a bort por formájában juttassák el a közeljövőben nagyobb távolságokra, ahol a megfelelő folyadék hozzáadásával keltik őket életre [9].

Véleményünk szerint azonban jobb a hagyományos utaztatás: legjobban, ha a legközelebbi kedvenc termelőnkől vásárolunk, egyenesen a pincéből!

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Ókori lexikon – Vinum [Online]. Available: <https://www.arcanum.com/hu/online-kiadvanyok/Lexikonok-okori-lexikon-CA894/v-CD177/vinum-CD25C/>
- [2] Barrel [Online]. Available: <https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Barrel>
- [3] 5 Things That Can Go Wrong when Cellaring Wine and How to Prevent Them [Online]. Available: <https://www.chubb.com/us-en/individuals-families/resources/5-things-that-can-go-wrong-when-cellaring-wine-and-how-to-prevent-them.html>
- [4] A fagyasztóban hagytam a bort! [Online]. Available: https://winelovers.blog.hu/2017/05/26/nem_baj_ha_a_fagyasztoban_hagyd_a_bort
- [5] I. Beszedá, T. Stonawski, Á. Béni, „Borban a Fizika, Fizika a Borban. Alkoholos italok elektromos vezetésének mérése,” In: Tóth, Csilla (szerk.) ÓSHONOS- ÉS TÁJFAJTÁK – ÖKOTERMÉKEK – EGÉSZSÉGES TÁPLÁLKOZÁS – VIDÉKFEJLESZTÉS. Minőségi élelmiszerek – Egészséges környezet – Fenntartható vidéki gazdálkodás: Az agrártudományok és a vidékfejlesztés kihívásai a XXI. században, Nyíregyháza: Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézet, pp. 205–215. p. 2021.
- [6] A bor is elfárad az utazástól? [Online]. Available: <https://vinoport.hu/eleterzes/a-bor-is-elfarad-az-utazastol/2800>
- [7] [Online]. Available: <https://vinoport.hu/eleterzes/milyen-homersekleten-kinaljuk-a-borokat/1104>
- [8] [Online]. Available: <http://vinopedia.hu>
- [9] [Online]. Available: https://boraszportal.hu/hirszuret/biodinamikus_borok_harmonianban_a_vilagmindenséggel-879

A levélkártevők monitorozása különböző tormafajtákon

Monitoring letter pests on different types of horseradish

Irinyiné Oláh Katalin^{1*} – Gyuró Vanessza²

¹ Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézet, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b, olah.katalin@nye.hu

² Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézet, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b, nességuro@gmail.com

Összefoglaló: A torma termesztési értékét rizómája jelenti, amelynek növekedéséhez elengedhetetlen a nagy, egészséges és ép levélfelület. A Nyíregyházi Egyetem tormagényműjteményében 2021-ben 10 tormafajtán és -vonalon mértük fel a lombkárosítók közül a tormabogár (*Phaedon cochleariae* F.), a földibolhák (*Halticinae*) és a poloskák (*Heteroptera*) számát, valamint károsításukat. Tapasztalataink alapján megállapítható, hogy az egyes tormafajtákat és -vonalakat különböző mértékben érte kártétel a vizsgált kártevők által.

Kulcsszavak: torma (*Armoracia lapatifolia*), tormabogár (*Phaedon cochleariae*), földibolhák (*Halticinae*), poloskák (*Heteroptera*), levélkártétel

Abstract: The cultivation value of horseradish is its rhizome, the growth of which requires a large, healthy and intact leaf surface. In 2021, in the horseradish gene collection of the University of Nyíregyháza, we measured the number of leaf pests *Phaedon cochleariae* F., *Halticinae* and *Heteroptera*, as well as their damage, on 10 horseradish varieties and varieties. Based on our experience, it can be established that the individual horseradish varieties and varieties were damaged to varying degrees by the examined pests.

Keywords: horseradish (*Armoracia lapatifolia*), *Phaedon cochleariae*, *Halticinae*, *Heteroptera*, leaf damage

1. BEVEZETÉS

A torma termesztése során a levelet és a gyökeret károsító kórokozókkal és kártevőkkel egyaránt számolnunk kell. Egyes irodalmi források a tormán 43 kártevő megjelenését rögzítik [1]. Ebben a közleményben a levélen fellelhető kártevők közül a földibolhákkal, a tormabogárral és a poloskákkal foglalkozunk.

A tormatáblák szinte állandó lakója a földibolhák (*Halticinae*) nemzetsége. A tormán 6 földibolhafajt határoztak meg, melyek közül 5 tartozik a keresztesvirágúak bolhái (*Phyllotreta*) közé. A hajdúsági tormaföldeken a fekete káposztabolha (*Phyllotreta atra* Fabr.), és a közép-káposztabolha (*Phyllotreta undulata* Kutschera) populációi a legnagyobbak. Kisebb számban begyűjthetőek a nagy káposztabolha (*Phyllotreta nemorum* L.), a tormabolha (*Phyllotreta armoraciae* Koch) és a repcebolla (*Psylliodes chrysocephala* L.) egyedei is [2]. Az egyes földibolhafajok számos egyező tulajdonságot mutatnak egymással megjelenésükben és életmódjukban egyaránt. Általában fekete színű, kis testű (1,5-2,5 mm), 3 pár erős lábbal, izmos combbal rendelkező, ugráló, pattogó kártevők. Jellegzetes mozgásuk teszi őket könnyen felismerhetővé. Fonalas csápjuk, rágó szájszervük van. A repcebolla kivételével (mely lárva alakban telel) imágó alakban telelnek át, és a lárvák rejtett életmódot folytatnak. Évente csak 1 nemzedékük van [3]. Tápnövényeik közé tartoznak a keresztes virágú haszon- és gyomnövények egyaránt. A lárvák a gyökereken táplálkoznak, kártételük nem jelentős [4]. Az imágók tápláléka a levél [5]. Ha a körülmények kedveznek a felnőtt egyedek táplálkozásának, akkor a fiatal növényállomány el is pusztulhat [4].

A földibolhák szaporodása kora tavasszal kezdődik, amikor a hőmérséklet eléri a 8–10 °C-ot [3]. Felszaporodásukhoz kifejezetten kedvező a száraz időjárás, nagymértékű kártételre is ilyen körülmények között kell számítani [2]. Petéiket a tápnövény gyökérnyaki részére rakják. A kikelő lárvák gyökerekkel, illetve levélszövetekkel táplálkoznak, majd a talaj felső rétegében bábozódnak [3]. Az imágók kora tavasszal a keresztes virágú gyomok levelein kezdenek táplálkozni, majd innen vándorolnak át a káposztafélék palántáira vagy a kihajtott fiatal tormalevelekre [5]. Amint a területen a dugványok kihajtanak, leveleket képeznek, a kártevő megjelenésére számíthatunk [6]. Ez a kártevő, májusban szinte várja, hogy a tormalevelek kibújjanak a talajból, de az is előfordulhat, hogy már a talajban lévő hajtásokat is károsítja. A földibolhák annak ellenére, hogy egész évben megtalálhatók az állományban, tipikus fiatalkori kártevők [3]. Legveszélyesebb a májusi–júniusi kártétel, de később is nagy számban lehetnek jelen [2]. A földibolhák imágói szinte szitaszerűvé hámozgatják a levellemezt, rágásukkal kilyuggatják azt, tönkretéve az asszimilációs felület jelentős részét. 1-5 mm is lehet az általuk rágott lyukak mérete. A torma-, repce- és a nagy káposztabolha a levélerekben is kárt tehet [2].

A földibolhákhoz hasonlóan a poloskák közül is számos faj megjelenik a tormaültetvényekben. A rövid szárnyú ugrópoloska (*Halticus apterus* L.) és a parajpoloska (*Eurydema oleraceum* L.) a tormán kisebb mennyiségben fordul elő. E kultúrában legjelentősebb a káposztapoloska (*Eurydema ventral* Kollar) és a molyhos mezei poloska (*Lygus pubescens* L.) jelenléte [3]. A káposztapoloska hazai tápnövényei a keresztesvirágúak köréből kerülnek ki. Károsítják többek között

a káposztarepcét, a káposztát, az útszéli zsályát is. A földibolhákhoz hasonlóan, amíg a káposztaféléket ki nem ültetik, addig a vadon termő növényeken táplálkoznak. A tormanövényeken a kihajtást követően azonnal megjelennek az imágók. Tömeges megjelenésükre április–május hónapokban lehet számítani, kifejezetten kedvező számukra a meleg, száraz időjárás. Tipikus levélkárosítók. A szívogatásuk nyomán a levelek felületén fehér foltok keletkeznek, mely helyeken a levél nem asszimilál [2]. „Szúrásuk nyoma sötét központi pontocskákból küllőszerűen elágazó, elmosódott szélű, világos sárgásfehér sávok alkotta foltok képében marad vissza a leveleken” [5]. Intenzív kártétel esetén, ha a szívásnyomok száma megnő, a levél felület egy része el is száradhat [2], de ez általában nem jár növénypusztulással [3]. A káposztapoloska és a parajposloska imágó alakban telet át a növényi maradványokon. A nőtények petéiket 12-es csomókban helyezik el a levél felületén. A szárnyatlan lárvák a tojáscsomón együtt maradnak, később szétszélednek, és ők is a leveleket szívogatják. A fent említett két poloskafajnak hazánkban két nemzedéke van, és egy harmadik, csonka nemzedékük is fejlődhet. A káposztapoloska elsősorban a palántázott káposztafélékre és a takarmánykáposztára jelent veszélyt, a parajposloska a keresztesvirágúak magtermesztésében jelenthet problémát, mivel leginkább a generatív részeket szívogatja. A két faj megjelenésben jól megkülönböztethető egymástól. Az *Eurydema ventrale* imágó 6-10 mm hosszú, élénkpiros alapszínű, két utolsó hátlemeze fekete, a többi piros. Az *Eurydema oleraceum* hátlemezei mindig feketék, rajzolata sárga, piros vagy fehéres, a test egész oldalszéle fehér. Az imágó 5-7 mm hosszú [7].

A torma általunk vizsgált harmadik kártevője a tormabogár (*Phaedon cochleariae* F), melyet a torma veszélyes, súlyos veszteséget okozó kártevőjeként tartanak számon [3]. Nemcsak hazánkban, hanem külföldi természetközvetekben is meghatározó a károsítása. Mind az imágó, mind a lárvák károsításával számolnunk kell, lárvái már az előhajtató ágyakban is károsíthatják a tormaleveleket [8]. Mindkét fejlődési alak a levéllel táplálkozik, a levéllemezen megfigyelhető kisebb-nagyobb lyukak utalnak jelenlétükre. A kifejlett tormabogár 3-4 mm hosszú, domború testű, ovális, sötétkék színű és fényes. Imágó alakban telet át a növényi törmelék között vagy a fák kéregrepedéseiben. A nőtények a levéllemez fonákába süllyesztenek piszkossárga tojásaikat. A kikelő lárvák intenzív táplálkozást folytatnak, majd a talajban bebábozódnak. Környezeti tényezőktől függően (például kedvező párás klíma) nemzedékszámuk kettő-három [3].

Vizsgálatunk célja az volt, hogy megállapítsuk, van-e különbség az egyes tormafajták és -vonalak között a levelükön megjelenő tormabogár, földibolhák és poloskák mennyiségét illetően, illetve azonos vagy különböző mértékben károsítják a vizsgálatban szereplő 10 torma fajtát.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

A témával kapcsolatos vizsgálatunkat 2021-ben végeztük a Nyíregyházi Egyetem bemutatókertjében. A vizsgálat anyagául szolgáló 5 tormafajtát (Bagaméri 93/1, Danvit, Nyírmezes, Petrence, Pózna) és 5 tormavonalat (Bayk-4, Bayk-95, Brassói-6, Grassdorfi, Liptói) a Nyíregyházi Egyetem tormaanyaggyűjteményből választottuk ki. Ez a gényűjtemény 93, morfológiai tulajdonságokban, terméshezomban, betegség-ellenállóságban különböző tormafajtát és -változatot tartalmaz. A megfigyelt anyag kiválasztása során nem voltunk tekintettel ezen fajták és változatok területen való elhelyezkedésére.

A torma levélkárosítói közül a tormabogár, a földibolhák és a poloskák megjelenését vizsgáltuk. 2021-ben május elejétől augusztus elejéig kétheti rendszerességgel az alábbi időpontokban végeztük el a kártevők megfigyelését: május 06. és 20., június 07. és 28., július 23., illetve augusztus 10. Minden tormafajta és -változat esetében 10-10 növényt vizsgáltunk. Minden mérés alkalmával növényenként kiválasztottunk 1-1 kb. középű levelet, melyen meghatároztuk a kártevők számát és kártételük mértékét. A kártevőmennyiség felvételezése a kiválasztott levél teljes felületén történt. A kártétel felméréséhez a levéllemez közepére egy 10x10 cm-es keretet (ablakot) helyeztünk (1. ábra), melynek segítségével egységesen 100 cm² levélfelületre vetítve kaptuk meg a kártételt. Ugyanezen módszer segítségével határoztuk meg a tormabogár petéinek számát is. A kártevők és kártételük meghatározása az irodalmi forrásokban foglalt leírások alapján történt. A torma levelét károsító levélbolhákat és az általuk rágott lyukakat a 2. ábra, a fekete hátlemező, világos rajzolatú, fehér oldalszélű parajposloskákat és szívogatásuk nyomait a 3. ábra mutatja be.



1. ábra. A kártétel felméréséhez használt 10x10 cm-es keret (Nyíregyháza, 2021)



2. ábra. Levélbolhák és kártételük a tormalevélen (Nyíregyháza, 2021)



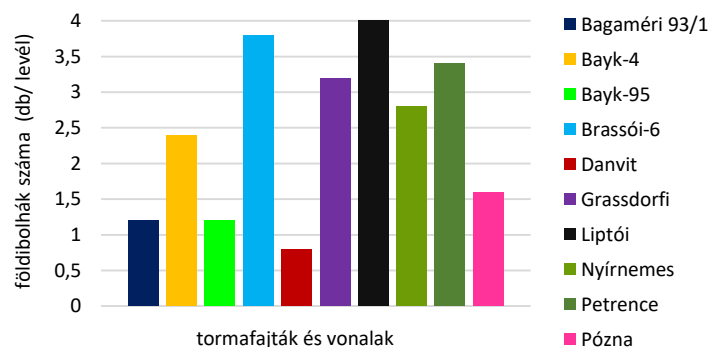
3. ábra. Párzó parajpoloskák (Nyíregyháza, 2021)

A statisztikai elemzések elvégzéséhez SPSS szoftvert használtunk. A tormafajták és -vonalak elemzésére (a levelén felmért kártevők és kártételük alapján) Games–Howell-féle páronkénti összehasonlítást alkalmaztunk. Szignifikanciaérték: $p < 0,05$

3. EREDMÉNYEK

3.1. A megfigyelt kártevők megjelenési aránya

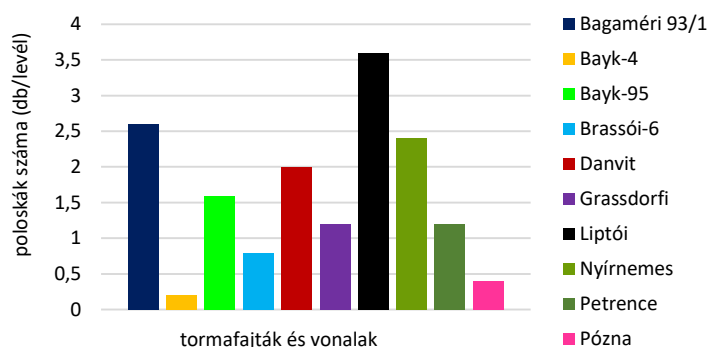
A torma tenyészidőszakában megjelenő első kártevők a különböző földibolhafajok. A levélmez hámozgatása és lyuggatása révén növelik a növény párologtató felületét, ezáltal pazarolják annak vízkészletét. A földibolhák levélfelületre vetített mennyiségét a 4. ábrán mutatjuk be. E kártevők megjelenését felmérve azt tapasztaltuk, hogy a vizsgált tormafajták és -vonalak mindegyikén megjelentek. Kisebb mértékű egyedszámot állapítottunk meg a Danvit, Bayk-95, Bagaméri 93/1 és a Pózna tételeken, ami kettőnél kevesebb földibolhát jelentett levelenként. A többi vizsgált torma 2 és 4 darab közötti volt a földibolhák mennyisége levelenként. Az eredmények között szignifikáns különbség nincs.



4. ábra. Földibolhák egyedszáma a vizsgálatban szereplő tormafajták és vonalak levelén (Nyíregyháza, 2021)

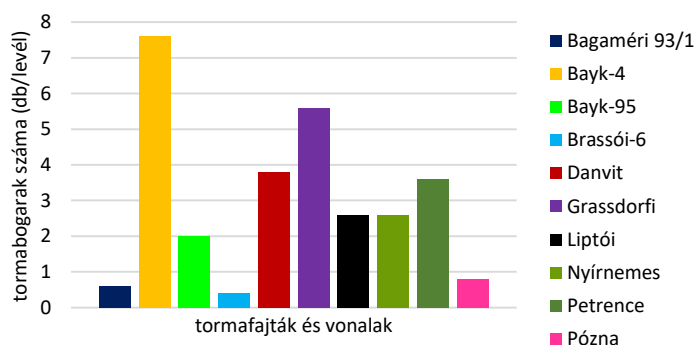
2021-es megfigyeléseink szerint a torma előforduló poloskafajok közül leginkább a parajpoloska egyedei jelentek meg az állományunkban. A földibolhaszámhoz hasonlóan a vizsgálatban szereplő tormafajták és -vonalak levelén felmért poloskaszám is látszólag nagy eltéréseket mutat. Az 5. ábrán látható, hogy a poloskák imágói a felvételezések

alapján a Liptói vonalon fordultak elő a legnagyobb számban (3,6 darab), míg a Bayk-4 vonalon 0,2 darabot mértünk egy levélre vetítve. A Bayk-4-en kívül még kétfajta (Brassói-6 és Pózna) esetében mértünk 1-nél kisebb adatot az egy levélfelületre vetített poloskák számára vonatkozóan. A változatos értékek ellenére szignifikáns különbség nem mutatható ki a fajták között a poloskák megjelenésében.



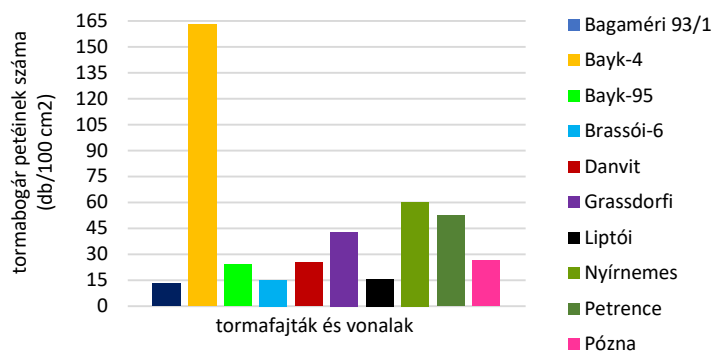
5. ábra. Poloskák egyedszáma a vizsgálatban szereplő tormafajták és -vonalak levelén (Nyíregyháza, 2021)

Az előző kártevőkhöz hasonlóan a tormabogár szintén nem azonos mértékben jelent meg az egyes tormafajtákon és -vonalakon. A felmérések átlagában 1-nél kevesebb tormabogár volt megfigyelhető a Bagaméri 93/1 és a Pózna fajtákon, illetve a Brassói-6 vonalon. A tormabogár számára legkedveltebb változat a Bayk-4-es volt, melyen átlagosan 7,6 kártevőt számoltunk meg egy levélen. A többi tormafajta és -vonal levelén a felmért tormabogár szám 2 és 5,6 darab között változott. A statisztikai elemzés szerint a tormabogarak számában szignifikáns különbség mutatható ki a Bagaméri 93/1 és a Grassdorfi, a Brassói-6 és a Grassdorfi, a Brassói-6 és a Bayk-4, illetve a Pózna fajta és a Grassdorfi vonal között (6. ábra).



6. ábra. A tormabogarak egyedszáma a vizsgálatban szereplő tormafajták és -vonalak levelén (Nyíregyháza, 2021)

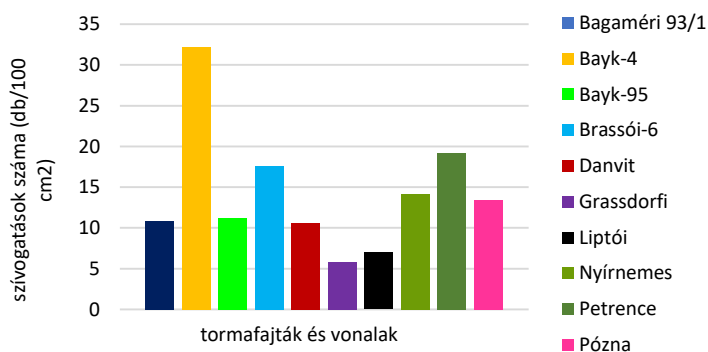
A tormabogár levéllemezfonákába sülyesztett petéit 100 cm² levélfelületre vetítve ismertetjük a 7. ábra értékeit elemelve. Eredményeink szerint a tormabogár petéinek száma minden felmért tormafajta és -vonal esetében igen jelentősnek tekinthető, mivel a legkevesebb pete mennyisége is 13-15 darab/100 cm² volt, melyet a Brassói-6 és Liptói vonalon, valamint a Bagaméri 93/1-es fajta levelén mértük. Ha a kiugrónak tekinthető Bayk-4 vonalon megfigyelt petegyedszámtól (163 darab/100 cm²) eltekintünk, akkor tormafajtatól függetlenül az átlagos eredmény 30 tormabogárpete 100 cm² levélfelületen. A 6. ábrán megfigyelhető, hogy bár a tormabogár imágójának száma az egyik legmagasabb (átlagosan 5,6 darab) volt a Grassdorfi változat esetében, viszont a kártevő petéinek száma jelentősen kisebb értékkel jellemezhető ennél a vonalnál (43 darab/100 cm²). A Bayk-4 vonalon tapasztaltuk a legjelentősebb peteszámot, és ugyanez a tendencia mondható el a tormabogár imágóinak számát illetően is (7,6 imágó/levéllemez).



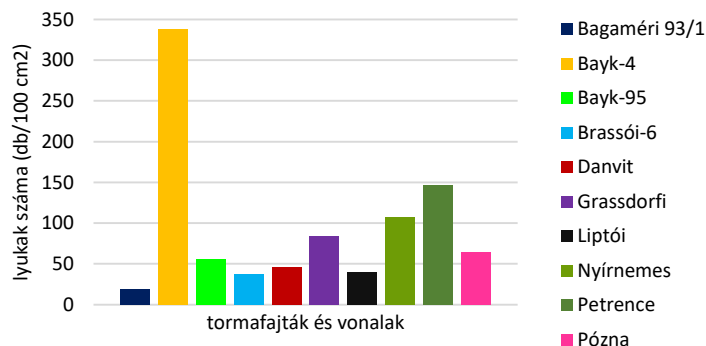
7. ábra. A tormabogár petéinek száma a vizsgált tormafajták és -vonalak levelein (Nyíregyháza, 2021)

3.2. Tormafajták és -vonalak levelén felmért rovarkártétel

A poloskák által okozott csillag alakú szívogatások legnagyobb mértékben a Bayk-4 tormánál fordultak elő (8. ábra), annak ellenére, hogy ezen a vonalon jegyeztük fel a legkevésbé poloskát (5. ábra). A fent említett tormavonal 100 cm² levélfelületén átlagosan 32,2 darab poloskaszívásnyomot tapasztaltunk. A poloskák legkevésbé a Liptói és a Grassdorfi tormákat károsították. A Liptói vonalon átlagosan 7 darab szívogatást jegyeztünk fel a levéllemez 100 cm²-ére vetítve, viszont az 5. ábrán látható eredmények alapján a poloskák imágóinak darabszáma ezen a vonalon volt a legmagasabb értékű, átlagosan 3,6 darab egy teljes levéllemezen. A 8. ábra eredményei szerint jelentős különbség látható az egyes tormafajták és -vonalak között a poloskaszívogatás tekintetében, de a statisztikai próba szerint szignifikáns különbség csak a Brassói-6 és a Liptói, illetve a Brassói-6 és a Grassdorfi tételek között mutatható ki.



8. ábra. A poloskák szívogatásainak száma a vizsgált tormafajták és -vonalak levelein (Nyíregyháza, 2021)



9. ábra. Tormabogarak és földibolhák által okozott lyukak száma a vizsgált tormafajták és -vonalak levelein (Nyíregyháza, 2021)

A 9. ábra a tormabogár és a földibolhák által rágott lyukak 100 cm²-re vonatkoztatott mennyiségét szemlélteti, mely alapján szintén a Bayk-4 tormavonal levele károsodott a leginkább. Ennél a vonalnál 100 cm²-en 339 lyukat

rögzítettünk. Ez nagyon jelentős levélfelület-károsodást jelent. A Petrence és a Nyírnemes fajták esetében is meghatározó a tormabogár és a földibolhák együttes kártétele (107–148 db/100 cm² közötti). 50 lyuk alatti értéket a Bagaméri 93/1, a Brassói-6, a Danvit és a Liptói tormáknál tapasztaltunk. A Bagaméri 93/1-es fajta levelét a tormabogár és a földibolhák együttesen szignifikánsan kisebb mértékben károsították, mint a Bayk-95, a Danvit, a Grassdorfi, a Petrence és a Pózna levellemezét. Statisztikailag igazolható a különbség a Bayk-95 és a Brassói-6 között is.

3.3. A földibolhák, a tormabogár és a poloskák megjelenési és kártételi aránya tormafajtánként, -vonalként

Az 1. táblázatban azt foglaltuk össze, hogy tormafajtánként, -vonalként a monitorozott levélkártévők milyen arányban jelentek meg, illetve milyen arányú volt a kártételük. Ezek alapján megállapítható, hogy a Bagaméri 93/1 fajtán legnagyobb számban a poloskák voltak jelen (59%). A Bayk-4 levélkárosítói közül a tormabogár aránya bizonyult a legmagasabbnak (74,5%), a poloskák kevésbé kedvelték ezt a vonalat, mindössze 2%-ban alkották a kártevőpopulációt. A Brassói-6 vonalon leginkább földibolhákkal találkoztunk (76%), itt a tormabogár aránya elenyésző volt (8%). A Pózna esetében szintén a földibolhák alkották a kártevők jelentős részét, ami 57%-ot jelentett. A Danvit és a Grassdorfi esetében ugyanez mondható el a tormabogár arányszámáról (56-57%).

1. táblázat. A földibolhák, a tormabogár és a poloskák megjelenési és kártételi aránya tormafajtánként, -vonalként (Nyíregyháza, 2021)

Torma-fajta, -vonal	Földibolhák megjelenési aránya %	Tormabogár megjelenési aránya %	Poloskák megjelenési aránya %	Földibolhák és tormabogár együttes kártétele %	Poloskák általi kártétel %
Bagaméri 93/1	27,3	16,3	59,1	64	36
Bayk-4	23,5	74,5	2,0	91,3	8,7
Bayk-95	25,0	41,7	33,3	83,2	16,8
Brassói-6	76,0	8,0	16,0	67,8	32,2
Danvit	12,1	57,6	30,3	81,3	18,7
Grassdorfi	32,0	56,0	12,0	93,5	6,5
Liptói	39,2	25,5	35,3	85,0	15,0
Nyírnemes	35,9	33,3	30,8	88,3	11,7
Petrence	41,5	43,9	14,6	88,4	11,6
Pózna	57,1	28,6	14,3	82,8	17,2

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Eredményeink alapján megállapítható, hogy a megfigyelt kártevők közül a legkisebb mennyiségben a poloskák voltak jelen az ültetvényben, megjelenési arányuk átlagosan 25%. A földibolhák és a tormabogár előfordulása a tormafajták összeségét tekintve 37,5-37,5% volt. A megfigyelt kártevők kártételi arányáról elmondható, hogy a kártevőösszetételtől függetlenül minden tormafajta és -vonal esetében a földibolhák és a tormabogár együttes kártétele volt a meghatározó, kisebb mértékben okoztak kárt a poloskák. A megfigyelésben szereplő tormafajták és -vonalak levelén a kártevők különböző mértékben jelentek meg, és a levélen okozott kártételük is eltérő volt, ezért a helyes fajtaválasztásnak szerepe van a kártevők elleni természetes, közvetett, környezetkímélő növényvédelemben.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] J. Jobbágy, A torma állati kártevői és az ellenük való védekezés, Doktori értekezés, ATE Debrecen, 1988.
- [2] L. Gécz, A torma termesztése, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 1998.
- [3] Gy. Dienes és J. Jobbágy, A torma növényvédelme, Növényvédelem, 33, 9, pp. 473–481, 1997.
- [4] Gy. Sáring, Keresztesvirágúak bolhái, in.: G. Jenser és Z. Mészáros és Gy. Sáring szerk.: A szántóföldi és kertészeti növények kártevői, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 1998.
- [5] G. Ubrizsy és G. Reichart, Termesztett növényeink védelme, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 1958.
- [6] L. Gécz, A torma termesztése, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2013.
- [7] V. Rácz, Címerespoloskák, in.: G. Jenser és Z. Mészáros és Gy. Sáring szerk.: A szántóföldi és kertészeti növények kártevői, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 1998.
- [8] L. Gécz, A hajdúsági torma. in: J. Nyéki és J. Papp szerk: Kertészeti hungarikumok. „Magyarország az ezredfordulón – Stratégiai tanulmányok a Magyar Tudományos Akadémián II. Az agrárium helyzete és jövője” 2003.

DEVELOPMENT OF A TEST FACILITY FOR MODELLING THE SOIL PHYSICS EFFECTS OF TYRES

Zsolt Péter Kiss

¹ *University of Nyíregyháza, Sóstói str. 31/b. Nyíregyháza, H-4400, email: kiss.zsolt@nye.hu*

Abstract in English: *The aim of our research is to be able to measure the agricultural and agricultural conditions of different designs under laboratory conditions. The effect of off-road tires on different types and conditions of soil. To this end, we have developed a special device that simulates the effect of different profile tires on the ground in a special soil box. The type of soil selected for the purpose of the test is placed in the box, which we try to bring to the condition corresponding to the natural conditions by means of various soil preparation methods. Among other things, we obtain by grinding and adjusting the moisture content, e.g. to the crumbly soil condition prepared for sowing. This is when the special radio frequency pressure sensing probes are placed in the ground. Then, with the help of the measuring device, a so-called a preload is applied to adjust the natural compaction of the soil ("in situ"). This is followed by a load test with the selected tire profile. Using the various pressure sensors, the stresses in the ground under the loaded tire and its spatial distribution are measured. In this publication, we would like to present the course of the tests and some of its results.*

Keywords: soil compaction, agrotire, soil tension

1 Introduction

Structural degradation is one of the most worrying phenomena of soil degradation, with the bulk density of soils increasing from 1.1-1.3 g/cm³ to 1.5-1.7 g/cm³ in 10-20 years [1] Most researchers characterise the state of soil compaction by soil resistivity [1, 2]. For the studies we used a layer indicator called 3T (soil tester), which records the penetration resistance and field water capacity (pF.2 .5). The comparison of compaction values at different moisture contents was based on Szöllősi et al. [2]. As a result of our previous studies, we have a database that allows us to predict the moisture and compactness status of a given soil type for a whole year, both for cultivated and uncultivated soils.

In the test soil box, the two most important parameters mentioned above (moisture content and compactness) are used to set the initial soil condition for the selected soil type. One of the main characteristics of natural soils is their inhomogeneity, i.e. both density and moisture content vary with both depth and site coordinate. Therefore, mechanical soil preparation and moisture adjustment eliminate these inhomogeneities and create a homogenised soil condition in the soil chamber, ready for sowing. The advantage of the soil box experiments is precisely that the natural laws we are looking for, which are masked by inhomogeneities, are easier to discover by testing on homogenised soil. The aim of the soil preparation was to create a texture similar to the soil condition previously prepared for sowing in the natural environment, ensuring that the soil crate is identical to the real conditions. The pre-sowing stress state of natural soils is created in the soil box using a special testing device that we have developed in-house. Following preloading, we also verified the structural and state identity of the soil samples and the field condition by penetrometer measurements, which were considered to be identical within the range of accuracy of the measuring/testing equipment and within a 5% margin of error.

2 Testing material and method

Homogenised soil samples were generated for 3 physical soil types (sand, sandy loam, clay) and 3 moisture conditions (dry, medium, wet). Our aim was then to determine the stress state and distribution under load of the different soil types and soil conditions. Custom-designed pressure sensors were used for the tests. By placing directional pressure sensors in the soil samples it is possible to determine the stress state of the samples [3]. Hydrostatic pressure measurements were also taken to verify the accuracy of the measurements and the measurements were repeated several times. The determined stress states will be the input data for triaxial measurements of the same samples. The next step was to design and build a test specimen to model the loading of a real tyre. The test rig and the design of the compression tool are shown in Figure 1.

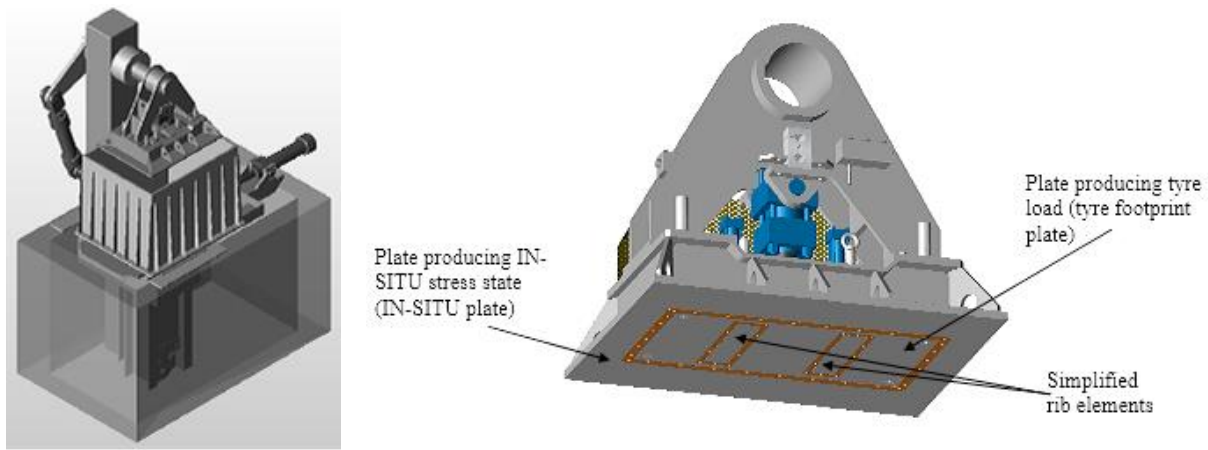


Figure 1. On the right the model shows the 3D model of the press tool, which in terms of the simplified tyre model consists of 3 main parts.

The three main elements can be moved independently and have the following functions. The outer, largest pressure plate is the plane that generates the initial stress state of the soil sample, which initially moves together with the other two elements (base and ribs) to generate the initial, so-called "initial" stress state in the soil and maintains it throughout the loading process. This is to ensure that, in reality, the initial state (static load) of the soil outside the tyre is constant. There are then two loading methods to choose from.

One option is to first move the ribs out of the plane by the prescribed length (rib height) while keeping the ground surface pressure constant, and then the tyre print modelling part is pushed into the ground according to the set values of the ground surface pressure it generates. This is, of course, a higher value than the pressure maintained at a constant value by the ground pressure plate.

The second possibility is that the plane of the ribs and the tyre print move in reverse order. In this case, only the ribs are moved after the tyre tread plane has been pushed out. The control shall ensure that the pressure of the ground surface below the plane remains constant during the movement of the ribs. All three elements are equipped with transducers and load cells so that the corresponding force-displacement diagrams can be produced when the measurement is completed. The control, transducers and load cells of the device are suitable for both horizontal and circumferential movements of the system. This provides the possibility to further develop the tests up to the analysis of real tyre slip movements. The hydraulic compression tool is a highly simplified model of the real tyre, and therefore designs closer to reality may be required in the future. To this end, the compression tool will be modular, the brick body modelling the tyre footprint and the simplified rib elements will be interchangeable.

Initially, the instrumentation control allowed controlled measurements to be taken to determine the initial stress state of the soil samples. This means that the preload value was controlled during the measurement process, but if the process became unstable, especially in loose, wet soils, the control was not able to produce the specified preload. This, however, caused serious losses, given the time and labour involved in sample preparation. Therefore, further improvements were necessary to enable the control of the equipment to achieve a controlled measurement process. Thanks to these improvements, the measurement program was able to correct errors during the test process.

This is of particular importance when using a hydraulic pressure tool, due to the complexity of the load program. A prerequisite for the development of a controlled process is the development of an electro-hydraulic servo valve system, as shown on Figure 2.

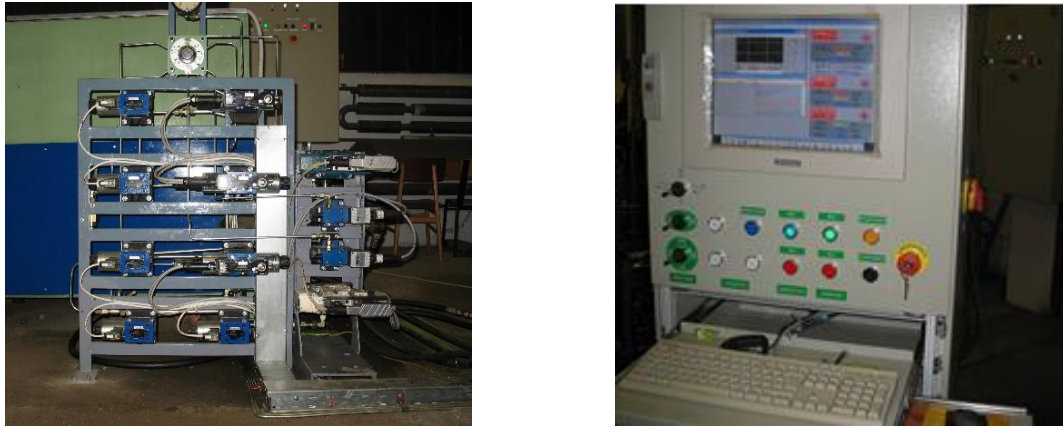


Figure 2. The electro-hydraulic air-pilot valve system and the process control computer

To determine the stress distributions generated by the different elements, directional pressure sensors were placed under the corresponding elements in the soil samples. In addition to the measurement of the stress state, the determination of the deformation of the sample, both at the surface and inside the sample, provides important information. The hydraulic compression tool shown in Figure 1 is a highly simplified model of the tyre, and therefore designs closer to reality may be required in the future. To this end, the compression tool is modular, i.e. the brick body modelling the tyre impression and the simplified rib elements are interchangeable. The tester is equipped with a number of load cells and force cells so that the corresponding force-displacement diagrams can be easily generated after the measurement is completed.

The hub can be mounted in place of the gauge and a full-fledged strap-mounted tyre can be attached. The elements of the hydraulic system are capable of both horizontal and circumferential displacement, allowing the analysis of the displacement of real tyres on the ground. The next challenge was to implement a controlled measurement process. This is of particular importance when using a hydraulic pressure tool, due to the complexity of the load program. Following the tool development, the custom-developed radio frequency sensors could be integrated into the soil sample and the planned measurement could be performed.

The load tests were carried out on three different soil types - sand, clay and loam - and three moisture conditions (dry, medium-humid and humid). The following parameters were defined during the study. The model of the measurement process is shown in Figure 3 below.

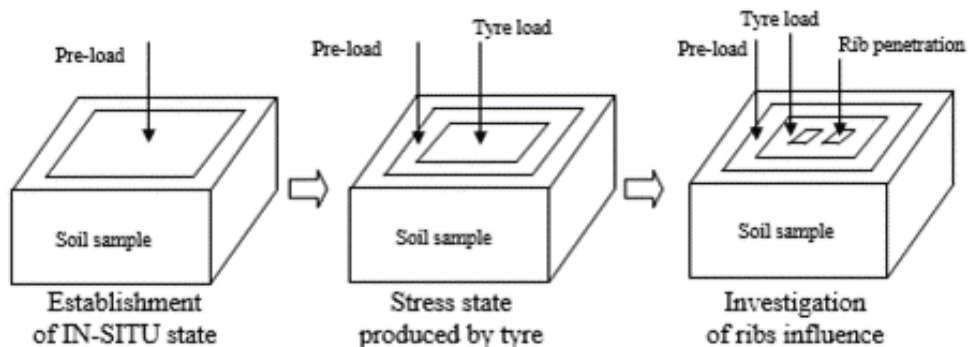


Figure 3. The procedure of the measuring process

The steps in the loading process are:

- 1) Achieve an "initial" state of soil compaction: the soil surface pressure is 1 bar, achieved in 5 load steps of 0.2 bar per 0.2 bar. The time taken to reach a load step is 15 seconds, followed by 15 seconds of rest at that pressure.
- 2) Tyre tread pattern design: the ground pressure under the tyre tread pattern modelling unit represents an increase of 1.8 bar compared to the "initial" condition, i.e. a total of 2.8 bars. The load is ramped up to the "initial" condition continuously over 60 seconds, followed by 15 second load/rest cycles of 0.2 bar per 0.2 bar pressure increase.
- 3) Tyre rib imprint: simplified rib elements are modelled with a rib height of 50 mm and penetrate the soil sample. This takes 60 seconds to achieve.

3 Presentation of the test results

During the test, the 20 pressure sensors were placed at a depth of 200 mm in the prepared soil sample, as shown in Figure 2. The positioning of the sensors during the loading process is shown in Figure 4, while the measured values are shown in Figure 5.

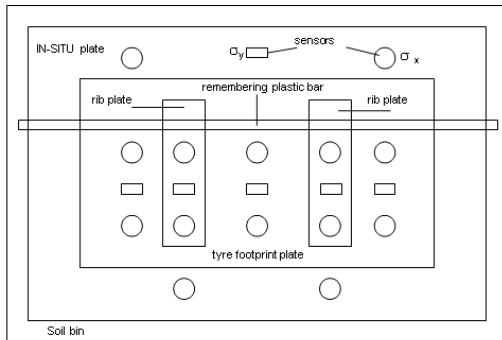


Figure 4.

The scheme of sensors localization

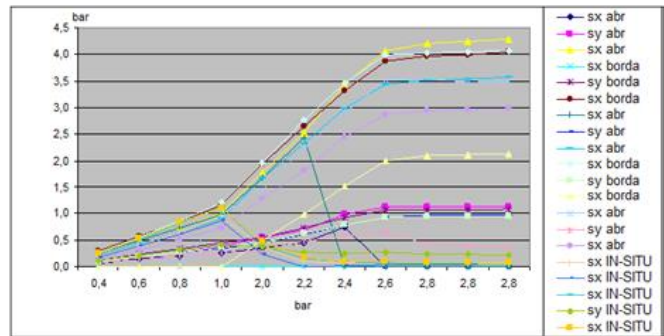


Figure 5.

The measured σ_x and σ_y values by sensor

The soil sample was measured by penetrometer to determine its compactness and moisture content in the distribution shown in Figure 6. The penetrometer type 3T System used by us determines the water content in the soil sample in relation to the water capacity of the field in volume % units. In the initial unloaded soil sample with homogeneous moisture content, the moisture contents at different depths after loading are obtained as shown in Figure 6.

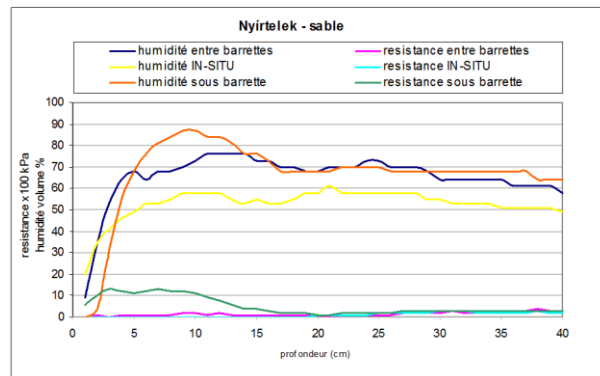
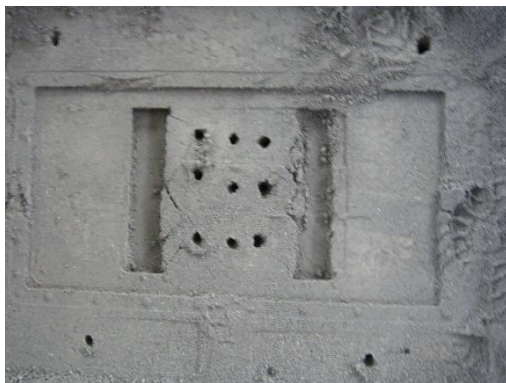


Figure 6. The penetrometer test points and initial and post-load values at different depths

The results of the measurements will be used as input data for the Cambridge-Cam-Clay finite element soil model calculations for the given soil type [4, 5]. In order to verify whether the individual elements of the hydraulic pressure tool are subjected to the effects on the real tyre, specific types of real tyre tests were carried out. The selected tyre is a 480/65R28 Point65 size, loaded with the maximum allowable force of 2770 daN. An experiment was first carried out with the soil pre-loaded to the growing condition, but the pressure values measured by the sensors showed a large variation. This is due to the phenomenon of fragmentation in the preloaded and then unloaded soil, caused by the tyre, which leads to inhomogeneity of the soil sample. The sensors were placed first at a depth of 10 cm and then at a depth of 2 cm at the corresponding locations of the soil trace, under the ribs and between the ribs. The location of the sensors is shown in Figure 7.

The equipment developed is suitable for experiments on different soils, with different real tyres and different tyre pressures. The test and the loading process are illustrated in Figure 8 below.

Part of the results are shown in Table 1 below. The measurements were evaluated following Sárközi et al. [6] and the resulting data will be used to validate the mechanical parameters of the Cambridge Cam-Clay finite element soil model.

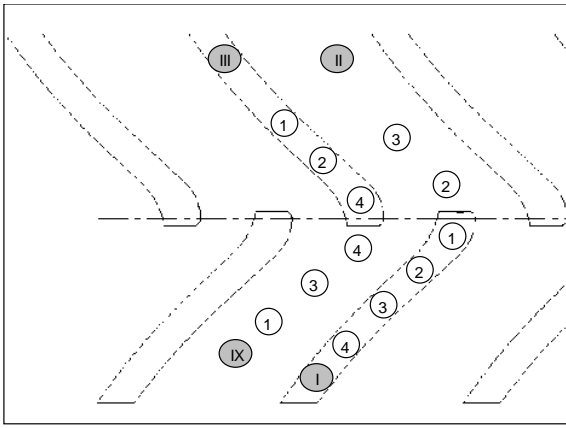


Figure 7. Placement of sensors under the tyre



Figure 8. The tyre test and tyre footprint

Table 1. Stress values for different soil types and moisture conditions

Soil sample	Soil sample moisture content pF. 2.5 tf%	IN-SITU		under the tyre tracks		under the rib	
		σ_y	σ_x / σ_y	σ_y	σ_x / σ_y	σ_y	σ_x / σ_y
dry clay	12%	1,22	0,31	1,65	0,28	2,71	0,24
medium wet clay	52%	0,98	0,40	1,56	0,37	3,45	0,28
wet clay	72%	0,96	0,47	1,61	0,44	3,58	0,44
dry loam	41%	1,08	0,42	1,65	0,36	3,43	0,32
medium moist loam	52%	1,08		1,60		3,07	
wet loam	92%	1,03	0,38	1,52	0,35	2,80	0,29
dry sand	35%	1,06	0,46	1,72	0,42	4,42	0,34
dry sand	41%	1,05	0,44	1,73	0,40	4,48	0,33
dry clay	12%	1,28	0,29	1,81	0,25	2,83	0,24
wet loam	100%	1,07	0,39	1,86	0,37	4,24	0,61
dry sand	32%	1,10	0,46	1,81	0,47	4,78	0,37
dry sand	19%	1,14	0,4	2,28	0,31		
dry sand	19%	1,08	0,39	2,42	0,31		
dry sand	18%	1,23	0,35	2,54	0,31		
dry sand	24%	0,91	0,54	1,93	0,43		
dry sand	35%	0,97	0,48	1,63	0,45		
dry sand	35%	1,05	0,45	2,36	0,37		
dry sand	32%	0,96	0,5	2,25	0,39		
wet sand	98%	0,88	0,48	1,93	0,42		
wet sand	92%	1,02		1,62		4,83	
wet sand	76%	0,98		1,66		4,96	
wet sand	72%	1,02		1,73		4,95	
wet sand	68%	1,04		1,72		5,11	

4 Conclusions

During the initial tests, both the control equipment and the pressure sensors worked well. The adequacy of the simulation model can be assessed after the test results have been evaluated. Comparative tests of different tyre tests in a real environment and of a device modelling the tyre-soil relationship will allow the parameters of the experimental device to be adjusted. The bottom of the soil crate acts as a kind of rigid layer, and this has a feedback effect on the print head and the sensors in the soil. Given that the soil in the soil box is no longer infinite, but only in a finite half-space, this limiting factor will have to be taken into account in the calculations.

REFERENCES

- [1] Birkás M. (1987): *A talajművelés minőségét befolyásoló agronómiai tényezők értékelése. Kandidátusi értekezés. Gödöllő.*
- [2] Szöllősi I. – Kiss Zs. P. – Kovács Z. – Czirják T. (2001): *A penetrációs ellenállás változása különböző talajokon a tenyészidőszak alatt. Agrokémia és Talajtan, TOM 50. NO. 3–4. 185–206. p.*
- [3] Kiss Zs. P. – Kriston S. (2008): *Abroncs terhelés okozta talajfeszültségek meghatározása talajlédás szimulációval, TALAJVÉDELEM (1216-9560): Klsz pp 115-120 (2008); Közlemény: 2908270*
- [4] Sárközi L. – Kiss Zs. P. (2004): *The mechanical behavior of the agricultural terrain in case of horizontal loading system, In: Microcad 2004: International Scientific Conference, Miskolc, Magyarország p. s. n. (2004) Közlemény: 2905042*
- [5] L. Sárközi – Zs. P. Kiss (2004): *Numerical Analysis of Agricultural Terrain Problems on Foundation of The Critical State Soil Mechanics, International Journal of Applied and Numerical Mechanics, 2004.*
- [6] Sárközi L. – Kiss Zs. P. (2002): *Mezőgazdasági gumiabroncsok talajfizikai tulajdonságainak értékelése; In: Nagy J MTA TKI/MTA-DE Területfejlesztési Kutatócsoport (szerk.) EU-konform mezőgazdaság és élelmiszerbiztonság: Tudományos tanácskozás Debrecen: Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum, pp 369-374 (2002), ISBN: 963472695X*

Függesztett, felső hajtású fűkaszák átalakításának vizsgálata félig függesztett kivitelűvé

Investigation of the conversion of suspended overhead mowers to semi-suspended design

Nagy János¹ – Stock Bence²

¹ Nyíregyházi Egyetem, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b, nagy.janos@nye.hu

² Nyíregyházi Egyetem 4400 Nyíregyháza Sóstói út 31/b, stockbence@gmail.com.

Összefoglaló: A kasza megtervezésének vizsgálatát különböző tényezők inspirálták. Egy függesztett kivitelű, felső hajtású fűkasza darabjaihoz – a szerkezet relatív egyszerűsége és a piaci kínálat miatt – igen kedvező áron lehet hozzájutni. Javitása, karbantartása egyszerű, az alkatrész-ellátottsága is kielégítő. Hátránya, hogy a munkaszélessége behatárolt, és teljesítményigénye a modern, alsó hajtású kaszákhoz képest valamivel magasabb. Az átlagos erőgép-teljesítmény növekedésével viszont megnőtt az igény a nagyobb munkaszélességű, de még megfizethető szerkezetekre. Üzemeltetésük gazdaságosabb és a környezetkímélőbb. Függesztett kivitelű egységek felhasználásával nagyobb munkaszélességű, félig függesztett vagy vontatott kaszaszerkezet készíthető gazdaságosan. A tervezés során vizsgáltuk a félig függesztett konstrukció üzemeltetési hatását, és megterveztünk, illetve modelleztünk egy lehetséges konstrukciós megoldást a rendelkezésre álló részegységek felhasználásával.

Kulcsszavak: felső hajtású rotációs kasza, alsó hajtású rotációs kasza, kaszatervezés, kaszaüzemeltetés

Abstract: Various factors inspired the study of the design of the scythe. The relative simplicity of the construction and the availability on the market make it possible to obtain pieces of a top-drive mower with a suspended design at a very reasonable price. Repair and maintenance are simple and the supply of parts is more than satisfactory. On the downside, its working width is limited and its power requirements are perhaps higher than those of modern low-drive mowers. However, with the increase in average power, there is an increased demand for larger working widths at an affordable price. Their operation is more economical and more environmentally friendly. Larger working widths, semi-welded or towed scythe structures can be economically produced by using suspended units. During the design, we investigated the operational effects of the semi-suspended construction, designed and modelled a possible construction solution by using available components.

Keywords: drum rotary mower, disc mower, mower design, mower operation.

1. BEVEZETÉS

A szálaskarmányok vágását alapvetően kétféle működési módszeren alapuló vágószerkezettel végezhetjük. (alternáló és rotációs) A gyakorlatban manapság világszerte a tárcsás vágószerkezetű kaszák alkalmazása a legelterjedtebb. Bár egységnyi munkaszélességre vetítve hajtási teljesítményigényük lényegesen magasabb, mint az alternáló szerkezetűeké, de munkaminőségük jobb, és karbantartási igényük is jóval kisebb. A rotációs szerkezetűekből készül a legtöbb a világon, Európában is számos gyártó kínál jellegzetes konstrukciós kialakításokkal, szabadalmakkal.

Szinte minden egyes gyártó kínálatában megtalálhatók a dobos és a tárcsás kivitelek is (pl. Claas, Fella, Lely stb.). A dobos és tárcsás kivitelű rotációs kaszák is készülhetnek traktorra (elöl és hátul) függesztett, illetve félig függesztett kivitelben. A félig függesztett dobos kaszák általában függesztett tárcsás kaszákból kialakított kaszacsoportok. Léteznek egyszerűbb és összetettebb kialakítású kaszacsoportok is.

A dobos és a tárcsás, illetve a felső és alsó hajtású kaszák között meghatározó különbségek fedezhetők fel mind alkalmazástechnikai, mind hajtástechnikai vonatkozásban. A dobos vágószerkezetű kaszák robusztus kivitelűek, nehezebbek, ugyanakkor rosszabb, egyenetlenebb talajú gyepes kaszálására is alkalmasak. Felső gerendellyel és felső hajtással készülnek, munkahelyzetben a dobok alatti csúszótányérok kopírozzák a talajt. Nagyobb a hajtásienergia-szükségletük a dobok nagy tömege, illetve nagyobb tehetetlenségi nyomatéka révén. Ugyanakkor a szögsebességük egyenetlenebb. Mindig páros számú (2 vagy 4, ritkábban 6 db) dob található a kaszákon, és kaszáláskor 1, 2 vagy 3 szűkített rendet képeznek.

A felül hajtott konstrukciókkal szemben az alul hajtott vagy tárcsás kaszák könnyebbek, „kifinomultabbak”. Alsó kaszagerendellyel és homlok-fogaskerekes vagy kúpfogaskerekes, keresztengelyes alsó meghajtással készülnek, kisebb (0,4-0,57 m) átmérőjű, kétkéscs, ovális vágótárcsákkal rendelkeznek, rendszerint a két szélső tárcsán kisebb terelődobbal. A vágótárcsák száma kaszagerendelyenként általában 5 és 9 m között változik a munkaszélességtől függően. A munkaszélességük pedig zömében 2,0 és 3,8 m közötti. Kopásálló csúszótálcákkal (papucsokkal) követik a talajfelszín változásait, általában kisebb-nagyobb áthidalással. Nagy anyagátömlési keresztmetszettel dolgoznak, kaszáláskor

zömében terített rendet képeznek, könnyebben csatlakoztatható hozzájuk szársértő berendezés. Általában kisebb a hajtásiteljesítmény-igényük, mint a dobos kaszáké.

A kaszák traktorhoz való csatlakozásához könnyen kezelhető függesztőkereteket, egyszerűen csatlakoztatható kardánhajtásokat és hidraulikus gyorscsatlakozókat alkalmaznak (forrás: internet 6). A traktor kategóriaváltásához a függesztőkereteket úgy alakítják ki, hogy ISO II és ISO III hárompontos függesztőszerkezetekkel is kompatibilis legyen.

Készülnek kaszák kereszt- és hosszirányú talajkövetéssel is. A kaszagerendely nyomásának csökkentését tekercsrugók beépítésével vagy hidraulikus tehermentesítésekkel, illetve azok szabályozásával oldják meg. A mechanikus megoldásoknál a tekercsrugók számának és erőfeszítésének változtatásával szabályozható a tehermentesítés és a tarlónyomás mértéke, míg a hidraulikus rendszereknél az olajnyomás változtatásával érik el a kívánt hatást. A kaszagerendelyeket akadályba ütközés okozta károsodás ellen rugós biztosításokkal védik, ami akadályba ütközés esetén lehetővé teszi azok hátrafelé történő kitérését.

Az alsó hajtású tárcsás hajtásokba egyre többen építenek be nyírószeges biztosításokat (Krone Safety Cut). A nyírócsapszeg nyíródása után a rotor egy magas menetemelkedésű tengelyen felfut, ezzel megakadályozhatók a tárcsatörések és az esetleges nagyobb problémák, amelyek akár a hajtómű teljes szétszerelésével költségesen javíthatók. A tárcsákon a gyors, szerelés nélküli késcseremegoldások általánosnak mondhatók, amelyekkel a törött, kopott kések cseréje vagy csak az egyoldali élességüket veszített kések megfordítása csupán néhány másodpercet vesz igénybe.

A szársértők alkalmazása a termény minőségének és a betakarítási veszteségének csökkentése miatt kedvező, ezért a modern rotációs kaszák nagy részét szársértővel ellátva forgalmazzák. A dobos kaszákhoz többnyire spirálvonalban elhelyezett műanyag vagy fém, V formájú vagy egyenes ütőujjakkal felszerelt szársértő dobokat építenek be.

2. ANYAG ÉS MÓDSZERTAN

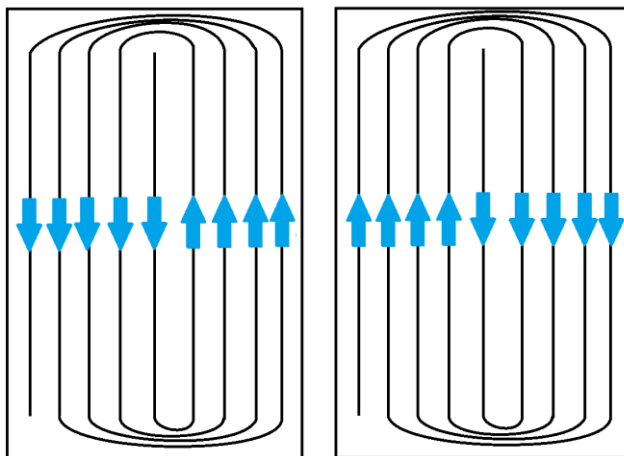
2.1. A konstrukciós kivétel és a vágási munka minőségi kapcsolatának vizsgálata

Annak, hogy a munkaeszköz a vonójárműhöz hogyan kapcsolódik, számos hatása van. Függesztett kivételű eszköz a traktor adhéziós tömegét – így a statikus tengelyterhelését – növeli, ami talajművelésnél pozitív lehet, azonban a szálastakarmányok vágása során – mivel a vonóerőigény jóval mérsékeltebb – kedvezőtlen, mivel növeli a taposási kárt. A munkaszélesség növelése összetettebb vágószerkezet kialakításával is történhet, amennyiben az energetikai összhang megfelelő, szintén pozitív hatású a mozgásmódtól függetlenül.

A félig függesztett szerkezetű konstrukció munkamozgása, azaz a folyamatosan oldalazó, váltakozva jobbra-balra való mozgásos kitérés szintén pozitív hatású. A vadállomány védelmét és a területteljesítményt is növeli, mivel csökken az inproductív idő és a taposási kár (1. ábra). Abban az esetben, ha alapul veszünk egy szabályos téglalap alakú területet, a külső kontúrok körbeszegése után két módon folytathatjuk a munkát egy függesztett munkaeszkővel.

Az első mód az úgynevezett kifelé forgás, amikor a földterület közepétől haladok a szélei felé, vagyis egy észak-déli fekvésű területnél észak felé haladva a középső vonal jobb oldalán kaszálók, dél felé haladva pedig a bal oldalán. Ez a vadállomány szempontjából igen kedvező munkavégzés, mivel a vadak folyamatosan a terület két széle felé terelődnek.

1. ábra. Hagyományos munkavégzés függesztett eszközzel (Forrás: saját ábra)



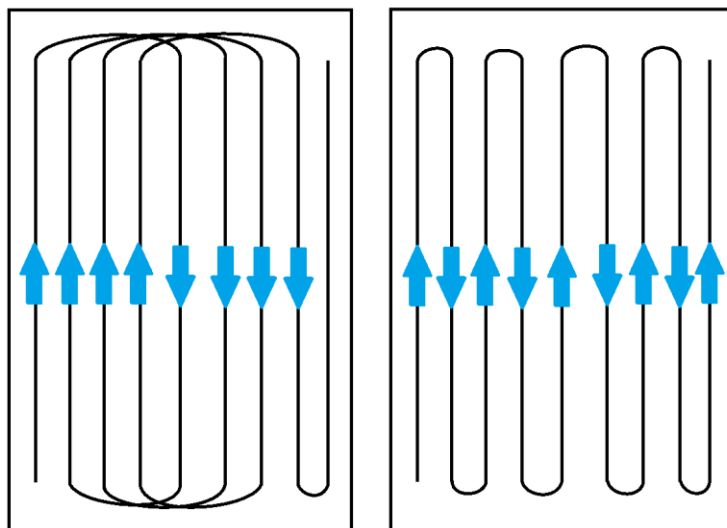
Területteljesítmény szempontjából azért hátrányos, mert a táblafogás első részében a szűk forduló miatt folyamatos tolatásra van szükség, vagy többfordulós szegést kell vágni. Az idő előre haladásával, ahogy fogy a terület, egyre nagyobb fordulókat kell tenni, így sok lesz az üresjárat, ami miatt romlik a fajlagos területteljesítmény, nem beszélve arról, hogy a fordulóban az olyan eszközöknél, melyeket nehezen lehet munka közben kiemelni (ilyen például a dolgozat alapjául szolgáló kasza is) a szegés több rendjén is keresztülhalad a kasza, így a növényi szálakat tovább aprítja, lehetetlenné téve a további betakarítást.

Az összeforgás igen hasonló az előző esethez azzal a különbséggel, hogy itt a terület széleitől haladunk a közepe felé. A vadállomány megóvása szempontjából ez a lehető legrosszabb módszer, mivel egy szűk helyre tereljük az állatokat, ahonnan ösztönösen nem minden esetben mernek kitörni, gyakran kerülnek az erőgép vagy a kasza hatáskörébe. Területteljesítmény szempontjából hasonló az előző esethez, annyi különbséggel, hogy a fordulókban csak a szegés belső rendjét tesszük tönkre.

A gyakorlatban a két módszert felváltva alkalmazzák, és úgymond nyolcasokat írnak le. Ez a területteljesítmény szempontjából javulást jelent, a vadak és a szegési veszteség mérséklése szempontjából kompromisszumos megoldás.

2.1.1. Azonos fordulók és az ingamozgás

A dolgozatban tervezett konstrukcióval két új megoldás is elérhetővé válik. Az első megoldás szerint a területnek csak egy adott oldalát kaszáljuk, és folyamatosan haladunk a másik felé. Ez a gyakorlatban úgy valósítható meg, hogy a szegés befejezése után északi irányban elkezdem kaszálni a terület nyugati oldalát jobb oldali kitéréssel, majd az előző rend mellé visszafordulva szintén a nyugati oldalt kaszáljuk déli irányban bal oldali kitéréssel. Ez a megoldás a vadak szempontjából igen kedvező, mert mindig egy irányból hallják a zajt, így folyamatosan tudnak az ellenkező irányba menekülni. A szegés taposása szempontjából is kedvező a helyzet, valamint itt a levágott részek újbóli kaszálása is elmarad, mivel a vágórész kiemelhető, így megtakarítva jelentős takarmánymennyiséget. Az egyetlen hátrány, hogy szélesebb szegést kell vágnunk annak érdekében, hogy a visszafordulás kényelmesen kivitelezhető legyen (2. ábra).



2. ábra. Félíg függesztett kaszával való munkavégzési módok (forrás: saját ábra)

A következő mozgás az ingamozgás, ahol a körbeszegést követően a tábla egyik oldalából, nyugatról keleti irányba ingamozgással haladunk. A kasza felváltva tér ki északi haladáskor jobbra, déli haladáskor balra. A vadak szempontjából kedvező a mozgás, mivel folyamatosan egy irányba tereli azokat. Az üresjárat minimális, hátránya, hogy a hurkos fordulók miatt nagyobb szegést kell végezzünk, de a kasza kiemelése miatt az nem károsodik, és a taposási kár itt a legkisebb. Összességében ez a legkedvezőbb mozgás. A fentiekből összegző megállapítás, hogy a félíg függesztett konstrukció számos javulást mutat a munkaminőség és a környezetvédelem, valamint gazdaságossági szempontból is.

2.2. A gép geometriai tervezése

A kezdeti elképzelések szerint a két kaszaegység (2+2 rotor) egymástól teljesen függetlenül lett volna képes elmozdulni. A két egységet egy-egy konzol segítségével egy csap kapcsolta volna össze így létrehozva az intenzív talajkövetést. Annak érdekében, hogy a két rész ne érhesse össze munka közben, egymás mögött eltolva helyezkednek el a tengelyen. Ez a koncepció végül elvetésre került, mivel amíg a meghajtóteljesítmény az erőgép teljesítményleadó tengelyéről eljut a vágószerkezetekig, a sok szöghajtómű és kardántengely miatt jelentős veszteségeket szenved el, illetve a többlethajtáslemek jelentős költségnövekedést is okoznak.

A megvalósított konstrukció végül 3,3 méter széles egységként került megtervezésre, ezzel elhagyva több bonyolult hajtáselemet. Ugyanezzel a megoldással csökken az egyenetlen területek kopírozási képessége, viszont így egyszerűsödik és olcsóbbá válik a kialakítás, nő a hajtási hatásfok. A szerkezet felfüggesztését a kialakított vázra egy merev futóműves, hosszlengőkaros futómű analógiájára alakítottuk ki.

Annak érdekében, hogy a vágószerkezet mindig párhuzamosan fusson a talajjal, azt két pár paralelogramma karral kapcsoljuk a vázhoz. A paralelogramma karok végeinek kialakítása halszemcsapágyas. Erre azért van szükség, hogy ne csak adott mértékben függőlegesen tudjon elmozdulni, hanem a haladási irány vektora körül is képes legyen elfordulni.

2.2.1. A vonószerkezet konstrukciójának meghatározása

Tudjuk, hogy a munkagép szélessége 3,2 méter, a rúd bekötési pontja pedig a gép hosszirányú szimmetriatengelyébe esik, illetve alapul vesszünk egy 2,1 méter széles erőgépet, melynek szintén a hosszirányú szimmetriatengelyében van elhelyezve a bekötési pont. Szögfüggvények segítségével kiszámítható a vonórúd hossza. A vonórúd a haladási irányhoz képest 45 fokos szöget zár be.

2.2.2. A szerkezetet érő külső erőhatások

Az első modell 120x120x5 mm-es zártszelvényekből készült el, azonban a Solid Works szimuláció alapján ez a legtöbb helyen túlméretezettnek bizonyult 3-szoros biztonsági tényező mellett, ezért a méretek csökkentésre kerültek 100x100x4 mm-re, illetve a vonórúd és a vágószerkezetet kiemelő munkahenger konzoljának találkozásánál megerősítésre került a szerkezetet. A kaszatest és talaj közötti csúszási súrlódási együtthatóra, értékét közepesen kötött talajra, nedves tarlóra határoztuk meg, így kiszámítva a súrlódó erő nagyságát.

A kaszatest könnyebb siklása és a tarló védelme érdekében tehermentesítő rugókat helyeztünk el a kaszatest és a hordozóváz között. Ebből a rugóerőket úgy választottuk meg, hogy sík terepen a vágószerkezet 500 kg-os tömegéből csak 50 kg terhelje a talajt a csúszótalpakon keresztül. Egyenetlen terepen ez az érték azonban a maximális 500 kg-ot is elérheti, valamint 0-ra is csökkenhet, ezért számításainkban a maximális 500 kg-ot használtuk fel.

$$F_{ny} = m * g \rightarrow F_{ny} = 500kg * 9,81m/s^2 = \mathbf{4905} \quad (1.1)$$

Ezt megszorozva a 0,3-es csúszási súrlódási tényezővel megkapjuk, hogy:

$$F_s = 4905N * 0,3 = \mathbf{1471,5} \quad (1.2)$$

A hordozóváz tömegének meghatározására a 3 dimenziós virtuális modellt használtuk fel. Ennek számított tömege 300 kg, súlypontja a leghátsó pontjától számítva 1150 mm-re található.

A tengelyt terhelő erő kiszámítása:

LB=3850 mm

L=5000 mm

$$G_A = m * g * \frac{LB}{L} \quad (1.3)$$
$$G_A = 800 * 9,81 * \frac{3850}{5000} = \mathbf{6042,96N}$$

A gyepek és a tarló közötti gumikerék kapcsolatának számítása során a földúthoz tartozó 0,05-es értéket használtuk.

Gördülési ellenállás

$$F_g = G_A * \mu_g = 6042,96 * 0,05 = \mathbf{302,15NN} \quad (1.4)$$

2.2.2.1. A talajkövetés biztosítása

A kaszatest nyomásának csökkentése szükséges a könnyű talajkövetés biztosítása, a vonóerő csökkentése és a vágott tarló védelmének érdekében. A talajkövetést, illetve a tehermentesítést méretezett spirálrugók beépítésével biztosítottuk. A kaszatestek akadályba ütközés esetén a keresztgerendára merőlegesen a felfüggesztőkarokon elmozdulnak egy körív mentén, így a vázszerkezet nem károsodik.

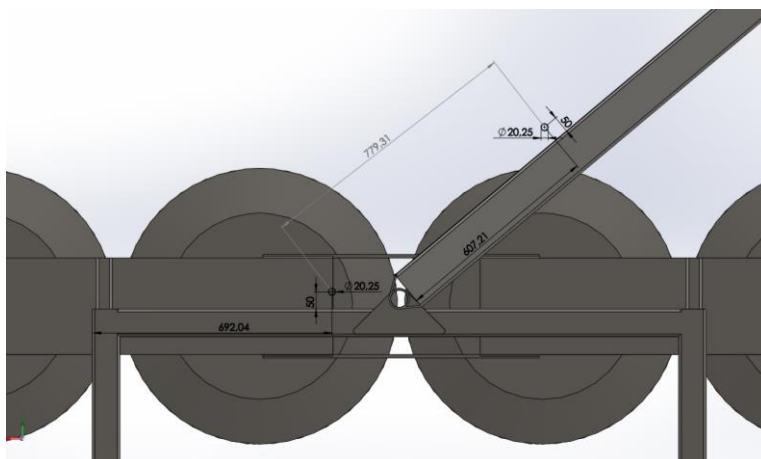
2.2.3. A hidraulikus rendszer méretezése

Kiinduló adatok – üzemi nyomás: 160 bar, maximális nyomás: 200 bar, térfogatáram: 60 l/perc. A hidraulikus teljesítményátvitelt alapvetően két mozgás biztosítására használtuk fel. Az egyik mozgás a kaszatest oldalirányú kitérését biztosítja horizontálisan két irányba, a másik a kaszatestek kiemelését, illetve süllyesztését vertikális irányba.

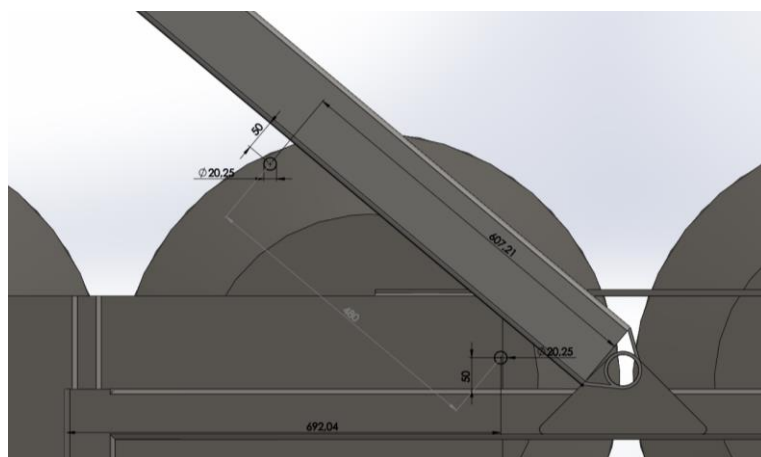
2.2.3.1. A kitérítő munkahenger kiválasztása

A megfelelő lökethossz kiválasztása az alábbiak szerint történt: A munkahenger hosszát úgy választottuk meg, hogy teljesen kitolva, illetve összehúzva a vonórúd jobb- és baloldalt a merőlegessel 50-50°-os szöget zárjon be. Ezt a már megrajzolt modell segítségével kiviteleztek.

Első lépésben beállítottuk az alkatrészek megfelelő helyzetét egymáshoz képest. Ezt követően készítettünk egy vázlatot, melyen bejelöltük a rögzítési pontok helyzetét. Ezeket mindentől 50 mm távolságra helyeztük el, így a munkahenger nem ütközhet semmivel. Az alsó pont helyzete az 50 mm-es biztonsági távolságok metszetéből adódik. A felső pont pedig rajta van az egyik biztonsági egyenesen, illetve adott távolságra (a maximális csaptávolság) van az alsó ponttól (3. ábra).



3. ábra. Oldalirányú kitérítő munkahenger bekötési pontjai bal oldali kitérésnél (forrás: saját ábra)



4. ábra. Oldalirányú kitérítő munkahenger bekötési pontjai jobb oldali kitérésnél (forrás: saját ábra)

A pontokat rögzítettük az adott felületekhez. Erre azért volt szükség, hogy a következő lépésben a megfelelő helyekre essenek. A következő lépésben a bezárt szöget megváltoztattuk, így már a másik végállást tudtuk vizsgálni. Itt lényegében egy ellenőrzést végeztünk, hogy a pontok távolsága nem kisebb-e a munkahengerhez tartozó Z-nél, ami a legkisebb csaptávolságot jelöli (4. ábra).

2.2.3.2. Az emelő, süllyesztő munkahenger kiválasztása

A szükséges működési hossz legalább 450 mm.

Keresztmetszet:

- megemelő tömeg 600 kg
- biztonsági tényező: $n=1,5$

$$F = m * g \quad (1.5)$$

$$F_x = 600 * 9,81 = 5886N$$

A munkahenger – mikor teljesen kiemelte a vágórészt annak következtében, hogy a lengőkarok miatt köríven mozog – bekötési pontja 30°-os szöget zár be a függőlegessel.

A munkahengereket a geometriai, illetve részletes erőtanai méretezés után gyártói katalógusból választottuk ki.

2.2.4. A hajtáslánc elemeinek tervezése

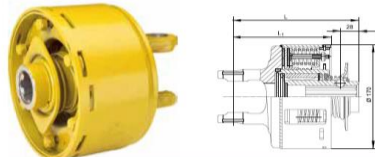
2.2.4.1. Kardántengelyek

A hajtási rendszerben két kardántengelyre van szükség, az egyik, amely biztosítja a traktor és kasza közötti kapcsolatot, valamint a másik, amely a teljesítményt a vonórúdról a vágórészre továbbítja. Ez utóbbi hosszúsága a lehető legnagyobb kell legyen, ugyanis így érhető el a legkisebb β hajlási szög.

Az üzemi fordulatszám 540 f/perc és az üzemi teljesítmény 55.2 kW.

Ezen követelményeknek a Walterscheid katalógusban található P500-as és P600-as méretek felelnek meg. Az 500-as szériánál a kardánkeresztek maximális csaptávolsága 1550 mm, ez azt jelenti, hogy munkahelyzetben a csuklók maximális hajlásszöge 16,5°, a megengedett maximális 25°. A kardántengely szabadonfutóval is el van látva, ami megakadályozza a visszahajtást a traktor erőátviteli rendszerére, illetve surlódótárcsás nyomatékhatárolóval is rendelkezik (5. ábra).

2.7.1 FK96 – FK96/4



Typ Type	M ₀ (Nm) ±1.3%	Profil Profile	Verschluss Lock	Baugröße/Size					
				W2300		W2400/P400		W2500/P500	
				L (mm)	L ₁ (mm)	L (mm)	L ₁ (mm)	L (mm)	L ₁ (mm)
FK96	200	1 3/8" (6)	ZV	190	149	190	149	198	156
	300	1 3/8" (21)		190	149	190	149	198	156
	500	1 3/8" (6)	CC	194	149	194	149		
	750	1 3/8" (21)		194	149	194	149		
	1050	1 3/8" (21)		194	149	194	149		
FK96/4	800	1 3/8" (6)	ZV	190	165	190	165	198	173
	1000	1 3/8" (21)		190	165	190	165	198	173
	1200	1 3/8" (6)	CC	206	165	206	165	214	173
	1500	1 3/8" (21)		260	165	206	165	214	173
	1800	1 3/8" (6)				206	165	214	173
	2100	1 3/4" (20)						214	173
	M _{0max} [Nm]			1100		1700		2700	

$n_{max} = 700$ U/min; Höhere Drehzahlen n_{max} auf Anfrage möglich; / $n_{max} = 700$ rpm; Upper speed n_{max} available on request.
 M_{0max} gilt nur für außergewöhnliche Ereignisse; / M_{0max} applies to exceptional occurrences only.
 Für Rechts- oder Linksdrehimm lieferbar; / Available for right-hand and left-hand direction of rotation.

5. ábra. Szabadonfutós tengelykapcsoló (Forrás: Internet 6)

2.2.4.2. A szöghajtóművek kiválasztása

Az első hajtóműnek közösítenie kell a két kaszatest tengelyét és lehetővé tenni az egy tengelyen történő meghajtást. Ehhez egy T elrendezésű szöghajtóműre van szükség 1:2 áttétellel és 1080 f/perc fordulatszámmal. A munkaeszköz gépkönyvében feltüntetett szükséges meghajtóteljesítmény 23 kW, ez annyit tesz, hogy 20% biztonsági tartalékkal a két kasza meghajtásához szükséges teljesítmény 55.2 kW. A követelményeknek megfelelő hajtómű adatai a következő ábrán láthatóak (6. ábra).

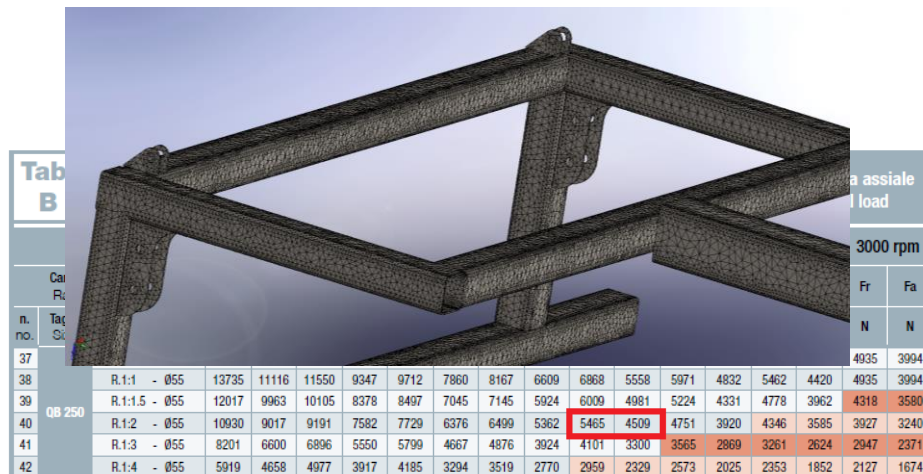
Tab. A		POTENZE APPLICABILI (Pn) APPLICABLE POWERS (Pn)		Momento torcente max in uscita Mt Max output torque Mt								(albero entrata contrassegnato A) (input shaft sign A)						
Giri in uscita Output revs		50 rpm		100 rpm		200 rpm		400 rpm		800 rpm		1400 rpm		2000 rpm		3000 rpm		
Coppia in uscita Output torque		Mt	potenza power	Mt	potenza power	Mt	potenza power	Mt	potenza power	Mt	potenza power	Mt	potenza power	Mt	potenza power	Mt	potenza power	
n.	Taglia Size	Rapporto - Classe A Ratio - A, AxisD	Nm	Kw	Nm	Kw	Nm	Kw	Nm	Kw	Nm	Kw	Nm	Kw	Nm	Kw	Nm	Kw
37	ØB 250	R.1:1 - Ø70	3700.8	19.37	3112.0	32.58	2616.9	54.79	2200.5	92.15	1850.4	154.97	1608.8	235.80	1471.6	308.12	1329.7	417.62
38		R.1:1 - Ø55	3700.8	19.37	3112.0	32.58	2616.9	54.79	2200.5	92.15	1850.4	154.97	1608.8	235.80	1471.6	308.12	1329.7	417.62
39		R.1:1.5 - Ø55	3277.9	17.16	2756.3	28.86	2317.8	48.53	1949.0	81.62	1638.9	137.26	1425.0	208.85	1303.4	272.90	1177.7	369.89
40		R.1:2 - Ø55	2960.6	15.50	2489.6	26.06	2093.5	43.83	1760.4	73.72	1480.3	123.98	1287.1	188.64	1177.3	246.49	1063.8	334.10
41		R.1:3 - Ø55	2220.5	11.62	1867.2	19.55	1570.1	32.88	1320.3	55.29	1110.2	92.98	965.3	141.48	862.9	184.87	797.8	250.57
42		R.1:4 - Ø55	1807.2	8.41	1351.5	14.15	1136.5	23.80	955.6	40.02	803.6	67.30	698.7	102.40	639.1	133.81	577.5	181.37

6. ábra. Maximális nyomaték és teljesítmény (A) és megengedett radiális és axiális irányú erők (B) forrás: internet [7]

A hajtáslánc további 3 elemére vonatkozó elvárások azonosak a fordulatszámot kivéve $n=540f/\text{perc}$ áttétel 1:1.

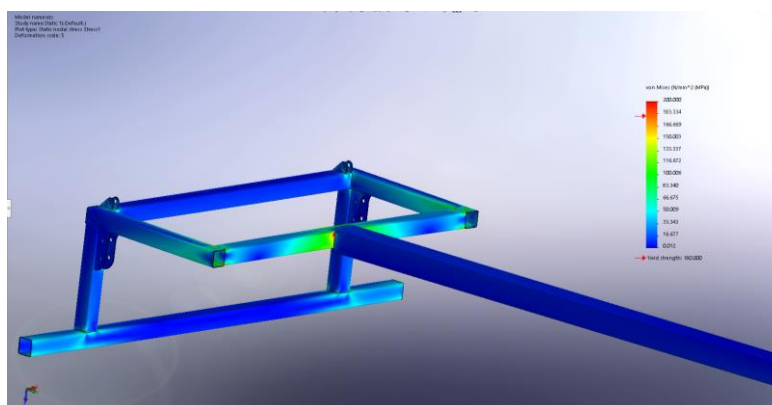
2.2.5. A kaszaszerkezet vázának tervezése

A váz méretei korábbi számításokból, a felhasznált alkatrészek méreteiből és az üzemeltető munkagép méreteiből már adottak voltak. Ez alapján készítettük el a végleges modellt. Szilárdsági ellenőrzésre a SolidWorks Static analysis opcióját használtuk. Legeneráltuk a végelem-felosztást (7. ábra).

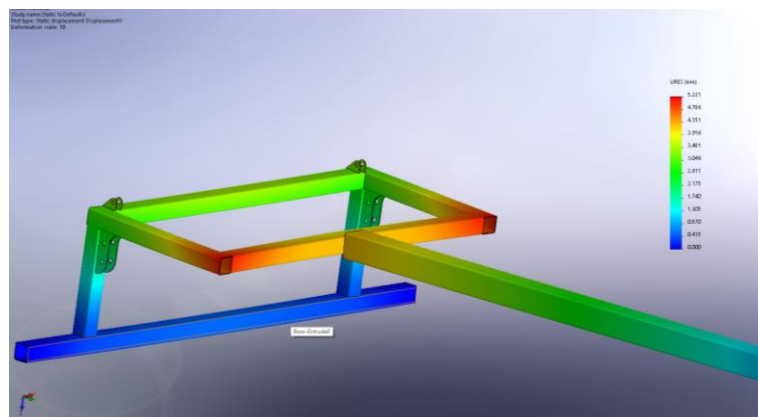


7. ábra. Az elkészült végelemháló (forrás: saját ábra)

A terhelő erők és a rögzítések megadása után elindítható az analízis. Az eredmények a 8. és 9. ábrán láthatóak.



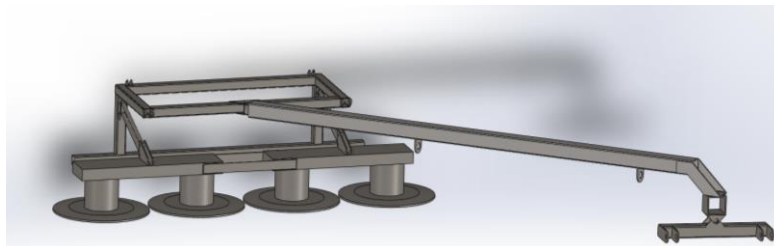
8. ábra. A szerkezetben ébredő feszültség (forrás: saját ábra)



9. ábra. A szerkezet egyes részeinek elmozdulása (forrás: saját ábra)

A 9. ábra azt szemlélteti, hogy a szerkezet egyes részei milyen mértékben mozdulnak el a terhelés hatására, ennek maximális mértéke 5 mm. Ez abból a szempontból érdekes, hogy keletkezik-e hajlítófeszültség a hajtáslánc valamely elemében.

Látható, hogy a kritikus pont a vonórúd és a mellső kereszttartó találkozásánál ébred, és az elemzés szerint túl is nő a folyáshatáron. Az analízist egy egyszerűsített modellel végeztük, mivel ebben a pontban problémák voltak a végeelem-felosztással. Az eredeti modellel a kereszttartó meg van erősítve, így biztosan kibírja a terhelést (10. ábra).



10. ábra. Az összeállított modell (forrás: saját ábra)

3. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A jelen tudományos műben megterveztünk egy nagy munkaszélességű fűkaszt, többségében kereskedelmi forgalomban kapható alkatrészek felhasználásával. Ha az alapjául szolgáló 160 cm munkaszélességű fűkaszával állítjuk szembe, a területteljesítményben és a munkaminőségben is jelentős javulás érhető el. Az azonos területről betakarítható széna mennyisége is növekedhet, illetve üzemanyagot is takaríthatunk meg, mivel csökken az üresjáratok száma, illetve az adhíziós tömeg. A dolgozatban törekedtünk úgy megválasztani az alkatrészeket, hogy azok a lehető legnagyobb élettartamot ériék el. Mint tudjuk, a kardántengelyeknél a rezgés nélküli hajtásátvitel csak Z elrendezéssel érhető el, vagyis ha a tengelyek párhuzamosak. A rezgések azonban csökkentik az élettartamot. Munka közben abból adódóan, hogy a gép nem a traktor mögött halad, két helyen is meg kellett oldani a 45°-50°-os állandó szögeltérést. Ezt két szöghajtóműpárral biztosítjuk, ezek gondoskodnak arról, hogy a behajtás és a kihajtás tengelye tetszőleges szöget zárjon be egy adott síkon, így biztosítva van a kardántengelyek Z elrendezése. Véleményünk szerint ezeknek a hozzáadott alkatrészeknek a száma nem csökkenti az élettartamra vonatkoztatott költségeket. Ugyanis a hosszabb élettartam ritkább javítást igényel, ez pedig kevesebb állásidőt jelent. Megoldható a szögeltérés nagy hajlásszögű kardáncsuklók felhasználásával, viszont itt továbbra is maradnak a kardáncsukló működéséből adódó rezgések. Választ jelenthet a homokkinetikus csuklók használata, ezek viszont igen drágák, és nem elég elterjedtek ahhoz, hogy alkatrészellátásuk zökkenőmentes legyen. Természetesen vannak több szempontból is jobb, kipróbált gépek, viszont lényegesen magasabb árkategóriában.

További fejlesztési irányzat lehet az osztott gerendás kivitel megvalósítása az áthidalás csökkentésére, illetve a talajjegytenlenségek hosszirányú lekötésére.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Szendrő Péter: Mezőgazdasági gépszerkezettan (2000)
- [2] Szilágyi Marcell: Formula Student versenyautó futómű tervezése (2020)
- [3] Kádár Lehel: Futóművek Kerékfelfüggesztés, futómű paraméterek, konstrukciók (2012)
- [4] Tiba Zsolt: Hajtáslánc optimalizáció (2015)
- [5] Hajós L.: Mezőgazdasági alapismeretek (1993)
- [6] Király L.: Mezőgazdasági géptan II. (1979)
- [7] Chiaravalli katalógus
- [8] Breuer György: Gyakorlati szerkezettervezés (1972)
- [9] Dr. Tibold Vilmos: A szénabetakarítás, -tartósítás, -tárolás és -kiosztás gépesítésének fejlesztése

Internet 1: http://mezogepinfo.hu/?attachment_id=1767

Internet 2: <http://www.sze.hu/~szalai/gepelemek/Gepelemek.pdf>

Internet 3: <http://normtec.hu/index.php/kardantengely>

Internet 4: https://www.biotek.hu/application/files/8716/1045/8445/Rug_katalogus2015_4.PDF

Internet 5: <https://en.calameo.com/read/002587492fd6fc8302062>

Internet6: Walterscheid katalógus

https://www.walterscheid-group.com/wp-content/uploads/Walterscheid_Technisches_Handbuch_2019.pdf

internet 6: www.agrotrend.hu/technika/gepesites/a-het-temaja-ime-a-legujabb-fejlesztesek-a-rotacios-kaszaknal

A zöldséglevek fermentálásának tapasztalatai

Experience on fermenting vegetable juices

Tarekné Tilistyák Judit* – Tarek Mohamed

Nyíregyházi Egyetem Agrár és Molekuláris Kutató és Szolgáltató Intézet, 4400, Nyíregyháza, Sóstói út 31/B.

*judit.tilistyak@gmail.com

Összefoglaló: A probiotikus baktériumok élelmiszerekhez való hozzáadása számos egészségügyi előnnyel jár. Kutatásunkban Bonita, Beauregard, és Purple fajtájú édesburgonya-gumó (*Ipomoea batatas* L.) préslevekben probiotikus baktériumtörzsek – BB12, Lalcult Protect LP100, Nu-trish LA5 (CHR Hansen) – szaporodását tanulmányoztuk. Vizsgáltuk a léhozamot, -minőséget és a hámozási veszteséget is a hőkezelt és nyers gumó esetén. Az édesburgonya-leveket 24 óráig 37 °C-on fermentáltuk, majd 30 napig 6 °C-on tároltuk. A levek színét, a cukortartalmát, a pH-ját, a probiotikum baktériumszámát és az érzékszervi tulajdonságokat vizsgáltuk a fermentációs folyamat és a 30 napos hűtőtárolás (6 °C) kezdetén és végén. Eredményeink alapján a probiotikus baktériumtörzsek jól szaporodtak az édesburgonyalében. A fermentált italok probiotikum-baktériumszáma meghaladta a 10^9 CFU/ml-t, a tárolási időszak végén a 10^6 CFU/ml-t, az erjesztett italok finom, harmonikus ízűek voltak.

Kulcsszavak: édesburgonya, probiotikus ital, édesburgonyalé, fermentáció, probiotikus édesburgonya-ital

Abstract: Adding probiotic bacteria to foods has many health benefits to the consumer. We studied the growth of three different probiotic bacteria strains: BB12, Lalcult Protect LP100, Nu-trish LA 5 (CHR Hansen) in juices produced by pressing white, orange and purple fleshed raw sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) tubers of varieties Bonita, Beauregard and Purple. The effect of the tubers' heat treatment on peeling waste and juice's yield and colour was also studied. The sweet potato juices were fermented for 24 hours at 37°C and were stored 30 days at 6°C. The colour, sugar content, acidity, number of probiotic bacteria and organoleptic properties of the fermented juices were analyzed at the beginning and the end of the fermentation and storage. Based on our results, all studied probiotic strains have cultured well in the sweet potato juice. The probiotic bacterial count of the fermented beverages exceeded 10^9 CFU/ml after 24-hour fermentation, and 10^6 CFU/ml at the end of storage. The fermented beverages tasted delicious and well-balanced.

Keywords: sweet potato, probiotic beverage, sweet potato juice, fermentation, probiotic sweet potato beverage

1. BEVEZETÉS

A Covid-19 vírusos járvány nagy keresletet indított a nem hagyományos vírusellenes szerek iránt, amelyek csökkenthetik a fertőzések kockázatát, és elősegíthetik a gyors gyógyulást [1]. A tejsavbaktériumokkal végzett fermentáció (erjesztés) hatékony stratégia a növényi alapú élelmiszer tartósítására és az ember egészségét támogató funkcionális tulajdonságok növelésére [2]. A probiotikumok olyan élő mikroorganizmusok, amelyek megfelelő mennyiségben a szervezetbe juttatva jótékony hatást fejtenek ki a gazdaszervezetben [3]. A probiotikus élelmiszerekkel erősödik az immunrendszer, javul a gyomor-bél rendszer működése, csökken a szérum-koleszterinszint, csökken a vastagbélrák kockázata stb. A probiotikumok átmenetileg tudnak megtelepedni a vastagbélben, és számuk csökken pl. antibiotikumos kezelés vagy ételmi rostban szegény, ún. nyugati típusú étrend esetén. Számos betegségállapotban a vastagbél diszbiózisát igazolták, pl.: allergia és asztma, lisztérzékenység, vastagbélrák, örökölt és szerzett cukorbetegség, HIV-fertőzés, emésztőrendszeri gyulladás, elhalásos bélgyulladás, irritábilis bélszindróma (IBS), elhízás, ízületi gyulladás, antibiotikumhoz köthető hasmenés [4].

A probiotikus tejtermékek fogyasztásakor fennáll a laktózzintolerancia tüneteinek megjelenése a tejcukorra, a tejfehérjére érzékeny egyéneknél. A tejtermékeken kívül többnyire a gyümölcslevek probiotikumos fermentációjával kapcsolatban vannak kutatások, kevésbé a zöldséglevekre. A probiotikus mikroorganizmusokkal végzett fermentáció hatására a fermentált gyümölcslevek antioxidáns-kapacitása növekszik, ilyet a *B. longum*mal fermentált noni lé vagy *L. acidophilus*szal fermentált gránátalmalé, ananászlé esetén mutattak ki. A kísérleti probiotikus narancslének nem volt jó fogyasztói fogadtatása, mert tejes aroma, gyógyszer- és földíz volt érezhető. A probiotikus italok [5] [6] fejlesztésének egyik kihívása, hogy a probiotikus mikroorganizmerek által okozott „gyógyszeríz” pl. a gyümölcs karakterisztikája csökkentse vagy elfedje. A probiotikummal fermentált almалé esetén testes állományt és édes ízt állapított meg a bírálócsoport, és e termék tetszési indexe 96% volt. A kereskedelmi forgalomban kapható probiotikus gyümölcslevek, pl. a Heinz's Golden Circle Healthy Life termékek, a Goodbelly márka a Next Foods USA-tól, a Pepsi Co-tól a Naked Juice márkájú termékek, pl. Probiotic Machine Tropical mango (az utóbbiban aroma is van). Probiotikus a ProViva márka a Danone Nordictól: ennek a termékcsaládnak van a „Carrot Orange Ginger” nevű terméke, amelyben édesburgonyát

használnak fel – a sárgarépat, narancsot, szőlőt és gyömbérkivonatot is tartalmazó – a probiotikus termékben. E termékről nem tudjuk, hogy az édesburgonyalevet fermentálták vagy dzsúz (juice) formájában ízesítéként használták fel. A probiotikus gyümölcsivólevelek tárolása során nőtt a termék savassága, csökkent az édes jellege. Az édesített probiotikus kesudió-alma ivólé 42 napos hűtőtárolást követően is 80%-os elfogadottságot kapott [7]. A probiotikus édesburgonya-ital ipari előállítása nem jellemző. Az ún. home-made termékek növekvő jelentőséggel bírnak.

Az édesburgonya gumója (*Ipomoea batatas*) rendkívül értékes alapanyag: gazdag keményítőben, rezisztens keményítőtartalma a probiotikumok számára hasznosítható tápanyag, 2-10% fehérjét, lipideket, polifenolokat, karotinoidokat, antocianinokat, vitaminokat, ásványi anyagokat (Ca, P) tartalmaz. Számos élettani hatás bizonyított az édesburgonyára: pl. antioxidáns, antimikrobás, vérnyomást szabályozó (ACE-gátló), daganatellenes, májvédő, gyulladáscsökkentő, antidiabetikus, immunerősítő hatás [8] [9] [10] [11]. Az édesburgonya tartósítása jellemzően a gumó makroösszetevőinek szétválasztása (rost, keményítő, fehérje) és szárítása [12].

A gyümölcsök, zöldségek borszövetrendszerét (héját) hámozással távolítják el, hogy fokozzák a késztermék küllemét, ízét, élvezeti értékét, és a termény tiszta, szennyeződéstől mentes legyen. Gazdaságossági megfontolásból a hámozási veszteség minimálisra csökkentése a célszerű. A hámozás lehet mechanikai (késes hámozás, dörzshámozás), vagy a héj nedves és meleg közegben (víz, kondenzvíz, lúgdoldat) történő lebontása, továbbá a héj szárítással egybekötött melegítése; a héj elszénesezése vagy elégetése; a terményfelület fagyasztása és felengedtetése [13].

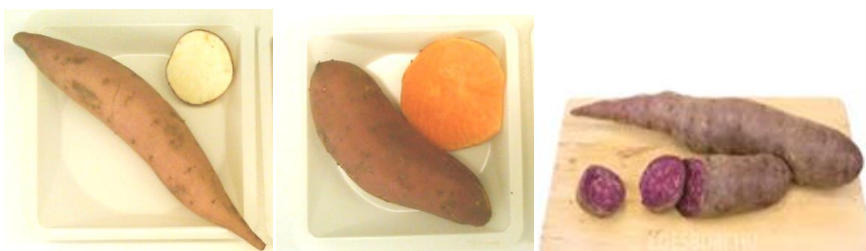
Jelen kutatásban célunk volt, hogy megvizsgáljuk (i) a hőkezelési módszerek hatását a hámozási veszteségre és a lé minőségére; (ii) a probiotikum-baktériumok szaporíthatóságát édesburgonyalében, a fermentált levek tárolhatóságát; (iii) érzékszervi tulajdonságait. Eredményeink alapján a fermentált édesburgonya-italok megnövelt élvezeti és minőség-megőrzési idejű, egészséget támogató termékek lehetnek.

2. ANYAG ÉS MÓDSZEREK

2.1. Felhasznált anyagok

2.1.1. Édesburgonya-fajták

A kísérletben 3 különböző színű édesburgonya-fajta gumóit használtuk fel, ezek a Bonita, a Beauregard és a Purple fajták voltak (1. ábra), fizikai jellemzőiket az 1. táblázatban mutatjuk. Az édesburgonya-gumókat 2021-ben termelték Kelet-Magyarországon, Szabolcs-Szatmár-Bereg megyében, Kisvárdai térségében, homok fizikai talajfésülésű talajon. A gumókat a Nyírségi Édesburgonya Zrt. bocsátotta rendelkezésünkre, fajtánként 10-10 kg-ot.



1. ábra. A vizsgált édesburgonya-fajták: (balról) Bonita, Beauregard, Purple

1. táblázat. Az édesburgonyalé előállításához felhasznált fajták fizikai jellemzői (n=20)

a fajta megnevezése	a hús színe	tömeg (g/db)	hossz (cm/db)	átmérő (cm/db)	keményiség (g)	szárazanyag (%)
Bonita	fehér	206,7	21,4	4,0	1639,5	25,1
Beauregard	narancssárga	318,2	19,1	5,0	1619,9	29,1
Purple	lila	201,3	21,6	4,1	1687,1	33,8

2.1.2. Probiotikus baktériumtörzsek

Az édesburgonyalé fermentálásához háromféle CHR Hansen gyártmányú, liofilizált probiotikus baktériumtörzseket használtunk fel: *Lactobacillus acidophilus* (Nu-trish LA-5), *Lactobacillus plantarum* (Lalcult Protect LP 100), *Bifidobacterium animalis subsp. Lactis* (BB12). A baktériumtörzseket a Magyar Tejgazdasági Kísérleti Intézet (Mosonmagyaróvár) térítésmentesen bocsátotta rendelkezésünkre a kísérletekhez.

2.2. Hőkezelési kísérlet

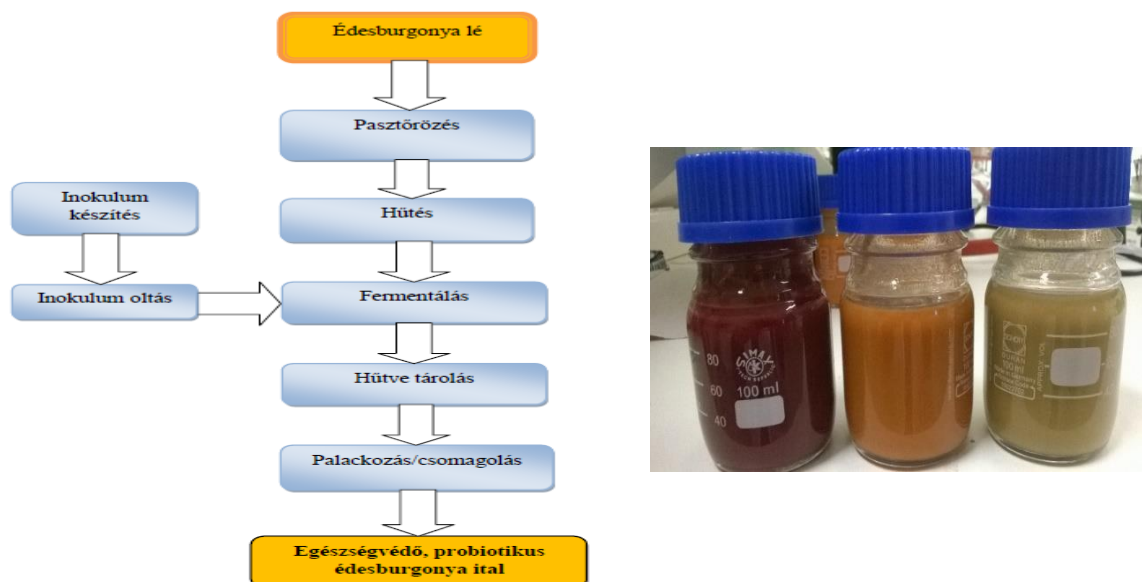
Az édesburgonya-gumó hámozásának elősegítésére különböző termikus módszerek hatékonyságát vizsgáltuk, és a termékminőség, gazdaságosság és egyszerűség szempontok figyelembevételével értékeltük. A hőkezelési módszerek összehasonlító vizsgálatához azonos tömegű héjas, egész Beauregard fajta édesburgonya-gumókat 10 percen keresztül nyitott rendszerben, 0,1MPa nyomáson (a.) előfőztünk (90 °C-os vízzel, blansírozás), (b.) gőztérben kezeltünk. A gőztérben kezeléskor a gumókat rácsra helyeztük, alatta vizet forraltunk, az edényfedőt résnyire nyitva hagytuk, hogy a rendszer nyitott maradjon. A kezelési idő elteltével a gumókat hideg vízbe merítettük 60 másodpercre, majd a vizet lecsepegtettük, és a gumókat kézi hámozóval hámoztuk, utána daraboltuk, és csigás gyümölcsprésen levet nyertünk.

A hőkezelés nélküli gumót (kontroll) csapvízzel mostuk, hámoztuk, 3 cm vastagságú hengerekre darabolva csigás gyümölcsprésen átnyomtuk. A préselt levek Brix^o-át és a színjellemzőket vizsgáltuk.

2.3. Fermentációs és tárolási kísérlet – Probiotikus édesburgonyalé előállítása, tárolása

Inokulum készítése: a fagyaszta szárított baktériumkészítményből 0,2%-ot adtunk De Man, Rogosa és Sharpe szerinti (MRS) tápvelesbe, melyet 37 °C-on 24 óráig inkubáltunk anaerob körülmények között.

A probiotikus édesburgonyalé előállításának folyamatát az 2. ábrán szemléltetjük. Az édesburgonya-préslevet dekantáltuk, a tiszta levet 250 mikrométer lyukbőségű szitán átszűrtük, és előre sterilizált üvegekbe töltöttük, majd 85 °C-os vízfürdőben 10 percig pasztöröztük. Ezt követően a leveket hagytuk visszahűlni. A visszahűlt léhez 2% inokulumot adtuk, majd 24 óráig 37 °C-on inkubáltuk anaerob körülmények között, ezt követően 4-6 °C-on fénytől elzárva tároltuk 30 napig. A fermentációs kísérletet a Beauregard, a Purple és a Bonita fajtákból préselt lével, a tárolási kísérletet a Beauregard fajtával végeztük el. A levek fermentálása párhuzamos mintával történt. A levek probiotikumszámát, pH-ját és érzékszervi jellemzőit vizsgáltuk.



2. ábra. A probiotikus édesburgonya-ital előállításának folyamatábrája (bal oldalon). 24 órás fermentált levek különböző édesburgonya-fajtákból (jobb oldalon); Purple – lila, Beauregard – sárga, Bonita – fehér hús)

2.4. Mintaanalízis

2.4.1. A hőkezelési kísérlet mérései

A vizoldható szárazanyag-tartalom (Brix^o) mérését általános célú szűrőpapíron átszűrt édesburgonyaléből RE40D (Mettler-Toledo GmbH., Switzerland) típusú refraktométeren végeztük. A színjellemzőket Colorlite sph860 típusú (CL150 Z modell) spektrofotométerrel (Colorlite GmbH., Germany) határoztuk meg; D65 megvilágításban, 10° megfigyelési szöggel. Az édesburgonyalé-mintát kvarc küvetába helyeztük 1-1,5 cm rétegvastagságban. A készüléket a mérés előtt fekete és fehér standardra kalibráltuk. CIE Lab rendszerben, ahol **L***: világosság (értéke 0–100 közötti; 100 a legvilágosabb); **a*** (értéke: 0–60): piros, ha az értéke pozitív; zöld, ha az értéke negatív; **b*** (értéke: 0–60): sárga, ha az értéke pozitív, kék, ha az értéke negatív.

2.4.2. A fermentációs és tárolási kísérlet mérései

Probiotikus baktériumszám meghatározáshoz a homogenizált mintából hígítási sort készítettünk. A hígítási tagokból 0,1 ml-t szélesztettünk az MRS-tápagar felületére. Az anaerob inkubálást 37 °C-on 24 óráig végeztük. A sejtszámot CFU/ml-ben, azaz 1 ml termékből kimutatott telepkepző egységek száma (colony forming unit: CFU) mértékegységben adtuk meg. *Az érzékszervi jellemzők vizsgálata:* 5 fős bírálócsoport (életkor és nem szerinti megoszlásuk: 20–25 éves: 2 nő, 1 férfi; 48–60 éves: 1 nő, 1 férfi) 1–5 pontos skálán bírálta a szín-, az illat-, az íz-, az összehatásjellemzőket. Tetszésindexként definiáltuk a szerzett pont átlaga és a maximális pont hányadosát; értéke legfeljebb 100%. A pH-t HI9813-6 típusú (Hanna Instruments Inc., USA) készülékkel mértük.

2.5. Statisztikai elemzés

Statisztikai elemzést a fermentált levek probiotikumbaktérium-számára vonatkozóan végeztük. A különbségeket 95% valószínűségi szinten tekintettünk jelentősnek, SPSS programmal (ver. 20.0; IBM Statistics Inc., USA) normalitás próbát, Anova-analízist és többszörös összehasonlítást végeztünk.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

3.1. A hőkezelés hatása a hámozási veszteségre és a lé színére

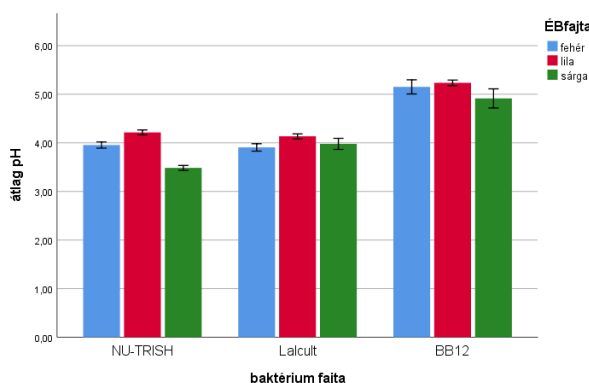
A hőkezeléses eljárásoknál kb. 10%-kal kevesebb volt a hámozási melléktermék, és a forró vizes kezelés után volt legkönnyebb eltávolítani a gumó héját. Azonban a kezelés nélküli mintának volt a legnagyobb léhozama, a gumó hőkezelése esetén a léhozam csökkent. A hőkezeléssel a gumó tömege kismértékben, színjellemzői (és várhatóan színanyagtartalma) jelentősen változtak. A gőztérben kezelés kiméletesebb eljárásnak bizonyult, mert a színjellemzők értékei kevésbé csökkentek a forró vizes eljáráshoz viszonyítva (2. táblázat).

2. táblázat. A hőkezelés hatása a kihozatalra és a lé színére

szempontok	kontroll	forró víz	gőztér
batáta tömegváltozás (%)	nincs	+0,42	-0,53
maghőmérséklet (°C)	nem változik	76,7	75,01
hámozási veszteség (%)	11,42	10,29	10,04
léhozam (%)	53,1	42,8	42,2
L*	65,79	65,4	65,6
a*	27,15	11,5	15,3
b*	28,10	22,9	29,8

3.2. Probiotikum-baktériumok szaporodása édesburgonyalevekben

A pH-csökkenés tükrözi a probiotikum-baktériumok szaporodását. Az édesburgonyalevek pH-értéke beoltás előtt átlagosan 6,4 volt, enyhén savas. A fermentált levek pH-értékét az édesburgonya-fajta (3. táblázat) és a baktériumtörzs (3. ábra) jelentősen befolyásolta.



3. ábra. 24 órás fermentált levek pH-ja édesburgonya-fajtánként különböző probiotikum-baktériumok hatására

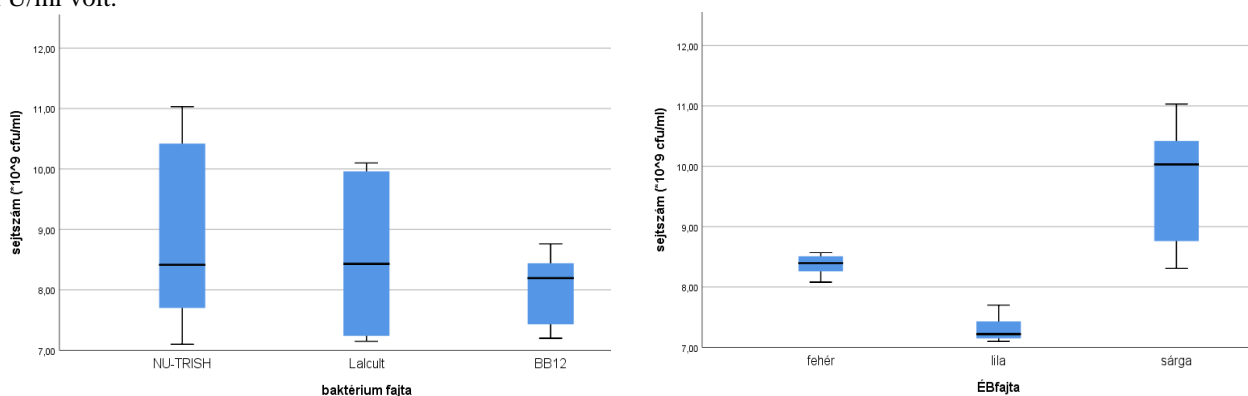
3. táblázat. 24 órás fermentált édesburgonyalevek pH-értékének terjedelme édesburgonya-fajta szerint fermentálási idő

fermentálási idő	Bonita (fehér)	Purple (lila)	Beauregard (sárga)
------------------	----------------	---------------	--------------------

0 h	6,3	6,5	6,3
24 h	3,9-5,2	4,1-5,2	3,5-4,9

A legsavasabb ital a Beaugard fajtából származó lében szaporított Nu-trish LA5 törzssel volt előállítható, de lényeges pH-különbséget a *Lactobacillus* törzsekkel fermentált levek esetén nem tapasztaltunk. A legkevésbé savas karaktert a *Bifidobacterium animalis supsp. lactis* (BB12) törzssel fermentált levek esetén kaptuk.

A 24 órás fermentált levekben a probiotikum-sejtszám $7,1-11,0 \cdot 10^9$ CFU/ml közötti, az átlagos probiotikum-sejtszám: $8,5 \cdot 10^9$ CFU/ml volt. A legkisebb sejtszám a BB12 törzssel fermentált lében volt (4. táblázat). Kisebb BB12 sejtszámot mértek a Nu-trish LA5 és a Lalculthoz viszonyítva a prebiotikummal kiegészített ananászlé 24 órás fermentálásakor is [14]. A 4. ábrán szemléltetjük, hogy a vizsgált probiotikumtörzsek (szaporodási képessége) átlagos sejtszáma között nem volt lényeges különbség ($p=0,518$). Édesburgonya-fajtától függően jelentősen különbözött a probiotikum-sejtszám a fermentált levekben ($p<0,03$). A legnagyobb probiotikum-baktériumszámot ($9,8 \cdot 10^9$ CFU/ml) a sárga húsú, Beaugard, a legkisebbet ($7,3 \cdot 10^9$ CFU/ml) a lila húsú, Purple édesburgonyából származó fermentált lében mutattunk ki. A fehér húsú, Bonita édesburgonyából származó fermentált lé probiotikum-baktérium-száma $8,4 \cdot 10^9$ CFU/ml volt.



4. ábra. 24 órás fermentált levek probiotikum-baktérium-száma (balra) a baktériumtörzs, és (jobbra) az édesburgonya-fajta szerint vizsgálva ($n=18$)

4. táblázat. Átlagos probiotikum-baktérium-szám az édesburgonyalevekben ($\cdot 10^6$ CFU/ml).

fermentálási idő	Nu-trish LA5	Lalcult	BB12
0 h	1,2	1,1	0,9
24 h	8900	8600	8000

A tárolási kísérletben egy másik fermentációból származó, Beaugard édesburgonyából préselt lében követtük a probiotikum szaporodását, majd a termék tárolhatóságát. A 30 nap tárolás után a probiotikumok száma lényegesen – 3 nagyságrendet – csökkent, de így is eleget tett a Magyar Élelmiszerkönyv probiotikus termékek sejtszámára vonatkozó előírásoknak (5. táblázat).

5. táblázat. Tárolási kísérlet – fermentált édesburgonya-ital probiotikum-baktérium-száma (Beaugard fajtából) ($\cdot 10^6$ CFU/ml).

tárolási idő	Nu-trish LA5	Lalcult	BB12
0.nap	8650	8220	7880
30. nap	22	1,3	1,4

3.3. A probiotikus édesburgonya-italok érzékszervi bírálata

Az édesburgonya-fajtától függően a színre kapott pontszámok jelentősen különböztek. A szín tetszésindexe a lila és a sárga édesburgonya-italoknál 90%-os, a fehér édesburgonyából származó italoknál 70%-os. A fehér édesburgonyából előállított probiotikus italok színe zöldes árnyalatú volt. A préselt lében nem alkalmaztunk színrögítést (pl. aszkorbinsavas kezelést), ezért még a pasztörözést megelőzően a polifenol-oxidázok hatása eredményezhette a színváltozást. A lila és a sárga levekben a barnulási folyamatot a természetesen jelen lévő színanyagok elfedték. A fermentált ital színét nem befolyásolta az alkalmazott probiotikum-baktérium-fajtája. Az illat és íz szempontjainál az italok tetszésindexe minimum 85%. A legjobb termékek a Nu-trish LA5 törzssel fermentált levek, 90%-os tetszésindexszel. Az összehatásra kapott pontok alapján minden probiotikus ital kedvelt volt, a tetszésindexük 80–90%

közötti, a pontok terjedelme 4,1–4,5. A lila és a sárga probiotikus édesburgonya-italok kapták a legtöbb pontot. A szín lényeges szempontnak mutatkozott az összhatás megítélésében, melyet az íz és az illat kompenzált.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgált fajtákból származó édesburgonyajuice jól hasznosítható a vizsgált probiotikus baktérium számára. Kellemesen savanykás, harmonikus ízű, változatos színű levek voltak előállíthatók az édesburgonya tejsavas fermentációjával. A fermentált édesburgonya-italokban a – Magyar Élelmiszerkönyv által előírt – probiotikum-sejtszám elérhető és megtartható a minőségmegőrzési idő végéig. Az édesburgonyalé probiotikus fermentációjával nagy hozzáadott értékű, egészségvédő italok állíthatók elő. A termékminőség javítása érdekében célszerű a szín javítására a légyártási technológiát módosítani, a probiotikum-sejtszám növelésére az édesburgonya saját anyagának, a rezisztens keményítőnek hozzáadásával a hatásvizsgálatot elvégezni.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] A. S. Gouda, F. G. Adbelruhman, H. S. Alenezi és B. Mégarbane: Theoretical benefits of yogurt-derived bioactive peptides and probiotics in COVID-19 patients – A narrative review and hypotheses. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 28 (10), pp. 5897–5905, 2021.
- [2] P. Chintha, D. Sarkar, K. Pecota, M. Dogramaci és K. Shetty: Improving Phenolic Bioactive-Linked Functional Qualities of Sweet Potatoes Using Beneficial Lactic Acid Bacteria-Based Biotransformation Strategy. *Horticulturae* 7 (10), 367, 2021. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100367>
- [3] FAO/WHO, Joint FAO/WHO Expert Consultation on evaluation of health and nutritional properties of probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria. Cordoba, Argentina, October 2001. http://www.who.int/foodsafety/publications/fs_management/en/probiotics.pdf
- [4] N. Binns, Probiotics, Prebiotics and the Gut Microbiota, Belgium, ILSI Europe, 2013. ISBN 9789078637394
- [5] E. Klewicka, Z. Zdn'czyk, J. Jus'kiewicz és R. Klewicki, Effects of lactofermented beetroot juice alone or with N-nitroso-N-methylurea on selected metabolic parameters, composition of the microbiota adhering to the gut epithelium and antioxidant status of rats. *Nutrients*, 7 (7) pp. 5905–5915, 2015.
- [6] E. Klewicka, Z. Zdn'czyk, J. Jus'kiewicz, Effect of Lactobacillus fermented beetroot juice on composition and activity of cecal microflora of rats. *Eur Food Res Technol* 229 (1) pp.153–157. 2009.
- [7] A.L.F. Pereira, S. Rodrigues: Turning Fruit Juice Into Probiotic Beverages. *in* Rajauria, G., Tiwari, B. K.: Fruit Juices- Extraction, Composition, Quality and Analysis. Academic Press. 2018. ISBN 978-0-12-802230-6
- [8] S. Wang, Sh. Nie és F. Zhu: Chemical Constituents and Health Effects Of Sweet Potato. *Food Research International* 89, pp. 90–116, 2016. doi: 10.1016/j.foodres.2016.08.032.
- [9] O.-K. Kim, D.-E. Nam, H.-G. Yoon, S.J. Baek, W. Jun és J. Lee, Immunomodulatory and Antioxidant Effects of Purple Sweet Potato Extract in LP-BM5 Murine Leukemia Virus-Induced Murine Acquired Immune Deficiency Syndrome. *Journal of Medicinal Food*, 18(8) pp. 882–889, 2015.
- [10] Y. Tang, W. Cai és B. Xu: Profiles Of Phenolics, Carotenoids And Antioxidative Capacities Of Thermalprocessed White, Yellow, Orange And Purple Sweet Potatoes Grown In Guilin, China. *Food Science and Human Wellness*, 4, 123–132, 2015.
- [11] S. Neela, S. és W. Fanta: Review on nutritional composition of orange-fleshed sweet potato and its role in management of vitamin A deficiency. *Food Science and Nutrition*, 7, pp. 1920–1945, 2019.
- [12] T. Ma és J. Singh: Sweet Potato – Chemistry, Processing and Nutrition. 1st. Ed. Academic Press. Elsevier. 2019. ISBN: 9780128136386
- [13] A. Javed, A. Ahmad, A. Tahir, U. Shabbir, M. Nouman és A. Hameed: Potato peel waste-its nutraceutical, industrial and biotechnological applications AIMS, *Agriculture and Food*, 4 (3), pp. 807–823, 2019. doi: 10.3934/agrfood.2019.3.807
- [14] B. T. Nguyen, E. Bujna, N. Fekete, T. M. Tran Anh, J. Rezessy-Szabo, M. Prasad Ram és D. Q. Nguyen: Probiotic Beverage From Pineapple Juice Fermented With Lactobacillus and Bifidobacterium Strains. *Frontiers in Nutrition*, Vol.6 (2019) <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00054>

Az allelopátia szerepe a csillagfürtállományok (*Lupinus albus* L.) gyomflórájának alakulásában

The role of allelopathy in the development of weed flora in white lupine (*Lupinus albus* L.) stocks

Tóth Csilla^{1*} – Apagyi Vivien²

¹ Nyíregyházi Egyetem, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b

² Nyíregyházi Egyetem, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b

Összefoglaló: Vizsgálataink során a fehér virágú csillagfürt allelokemikáliáinak az öko-csillagfürt-állományok gyomflórájának alakulásában betöltött szerepét vizsgáltuk. Két vizsgálati évben (2018, 2019) megtörtént az állományok gyomfelvételezése, a csillagfürt allelokemikáliái csírázásgátló hatásának vizsgálatát hideg vizes toxinizációs eljárással nyert, változó töménységű kivonatokkal, biotesztek segítségével végeztük. Tesztnövényként olajretek, saláta, közönséges kakaslábfű, szőrös disznóparéj, ürömlevelű parlagfű, lapulevelű keserűfű, zöld muhar és fehér libatop magvait használtuk. A saláta- és olajretek magvak esetében tapasztaltuk teljes mértékben a csillagfürt allelokemikáliáinak csírázásgátló hatását, az egyre töményedő kivonatok hatására fokozatosan csökkent a magvak csírázási ereje, a fejlődő gyökerek hossza. A gyommagvak közül a kakaslábfű mutatott egyértelmű hatást a kezelésre. Megállapítottuk, hogy a csillagfürt allelopatikus hatása koncentrációfüggő tulajdonság. A tesztnövények igazolták az allelopátia jelenlétét a biotesztekben: a kezelések hatottak a csírászám alakulására és a gyökerek hosszának fejlődésére.

Kulcsszavak: fehér virágú csillagfürt, gyomflóra, allelokemikáliák, csírázásgátló hatás, gyökérhossz

Abstract: We examined the role of the allelochemicals of the white lupine in the weed flora of organic white lupine stock. Within two years, we finished the examination of weed in these stands, we examined the germination inhibitor effects of the allelochemicals of lupine with a toxin isolation method using cold water solutions with different concentrations and biotests. As test plants, we used the seeds of oil radish, lettuce, barnyard grass, redroot pigweed, common ragweed, pale persicaria, green foxtail and lamb's quarters. In the case of oil radish and lettuce seeds, we experienced the germination inhibitor effects of the allelochemicals of the white lupine, with the concentration of the solutions increasing, the germination force of the seeds decreased and so did the length of the growing roots. Out of the seeds of the weeds, the barnyard grass showed a reaction to the treatment. We noted, that the allelopathic effect of the lupine depends on the concentration. The tested plants certified the presence of allelopathy in the biotests: the treatments effected the intensity of germination and the growth of the roots.

Keywords: white lupine, weed flora, allelochemicals, germination inhibitor effects, length of root

1. BEVEZETÉS

A csillagfürt (*Lupinus albus* L.) takarmánynövényként és zöldtrágyaként hasznosított, termesztett növényünk. A Rhizobiales baktériumrenddel történő szimbiotikus kapcsolatának köszönhetően akár 120-180 kg nitrogént is meg tud kötni hektáronként, így ezzel az első helyen áll a hüvelyes növények között [1]. Ezen adottságából adódóan „gyomnevelő”, a talajban jelentkező nitrogén szinte robbanásszerűen segíti a még elfekvő gyommagkészlet csírázását, fejlődését, gyomelnyomó képessége azonban közepesnek tekinthető [2] [3].

Számos kultúrnövényről bebizonyosodott, hogy kiválasztási folyamataik, lebomlásuk során növekedésgátló anyagokat bocsájtanak ki magukból, csökkentve ezáltal környezetükben az egyéb növényfajok növekedését [4]. Ezek a párolgás, a gyökerek általi kiválasztás vagy akár a képződő harmat és a lehulló csapadék által a növények leveleiből – esetleg más föld feletti részeiből – kimosódó vegyületeket egyaránt negatívan hathatnak a gyomokra és a kultúrfajokra is. A jelenség allelopátia néven ismert.

Az allelopátia megléte a csillagfürtökben igazolt [5] [6] [7]. Korábbi vizsgálatok bizonyítják, hogy a legtöbb allelopatikus hatású alkaloida a leveles szárban, a virágzatban és a termésben halmozódik fel. Mindemellett ismert tény, hogy a magvak alkaloidokban szintén gazdagok, 0,03-2,5% lupinidint, allolupinint, lupanin alkaloidokat és vernin glikoalkaloidot tartalmaznak, amelyek mérgezőek. Mikulás [8] és Nagy [9] kísérletei alapján bizonyított tény továbbá az is, hogy az allelopatikus vegyületek csökkentik a magvak csírázását, és a gyökér hosszának növekedésében is szerepet játszanak.

Az allelopátiát jelenleg 3 fő témában kutatják: gyomnövény-kultúrnövény kölcsönhatása; természetes növénytársulások tanulmányozása; allelokemikáliák azonosítása, kémiai jellemzése, hatásmechanizmus-vizsgálatok [10].

Vizsgálataink során célunk a 2018-as évben elkezdett ökológiai termesztési körülmények között termesztett fehér virágú csillagfürtállomány (*Lupinus albus* L. „Balkányi 23”) gyomflórája további felmérései (2019) eredményeinek birtokában a csillagfürt allelopatikus, csírázásgátló hatásának vizsgálata, annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy vajon játszik-e/játszhat-e szerepet a csillagfürt allelopátiája, allelopatikus vegyületei a csillagfürtállományok gyomflórájának

alakulásában. Mindezek mellett arra is szerettünk volna választ kapni, hogy az allelopatikus hatás kimutatható-e kultúrnövények és gyomnövények esetében egyaránt.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A növényállományok fajösszetétele nemcsak az adott termőhely ökológiai viszonyaitól függ, hanem az adott társulást felépítő fajok populációi között meglévő interspecifikus kapcsolatokról is, közülük a kompetíció és az allelopátia a különösen meghatározó. Noha a csillagfürtvetések gyomfajösszetétele tájegységenként eltérő, mégis a társulásalkotó fajok közötti meglévő, biotikus kapcsolatok jellemzően meghatározzák a csillagfürtállományok gyomspektrumát. Ezen állományok jellemző gyomnövényei az *Ambrosia artemisiifolia*, a *Chenopodium album*, az *Echinochloa crus-galli*, a *Setaria* fajok, az *Amaranthus retroflexus*, az *Avena fatua* és a *Cirsium arvense* [11].

Az allelopátia abban különbözik más negatív növényi kölcsönhatásoktól, hogy itt a donornövény a káros hatást vagy hatásokat allelokemikáliák [12] kibocsátásával feje ki. Ezek többnyire másodlagos anyagcseretermékek, metabolitok [13]. Termelésüket a környezeti tényezők, a stressz erősen befolyásolhatják [14]. Az allelopátiát okozó allelokemikáliák megtalálhatóak a növények gyökérzetében, szárában, leveleiben, a virágokban, termésekben és a magvakban egyaránt [15]. Leggyakoribb inhibitor források a levelek [13]. Az allelokemikáliák többféle módon szabadulhatnak fel a növényekből: párolgással, gyökér általi kiválasztással, kimosódással, növényi maradványok bomlásával [16].

Brückner és Szabó [16] összefoglaló elemzése kitér a növény és környezete között szerepet játszó izolált hatóanyagcsoportok csoportosítására. A tanulmány bemutatja a legfontosabb hatóanyagcsoportokat: fenoloidok, terpenoidok, azotoidok, kromoalkaloidok, cianogén glikozidok és glikozinolatok. Rice [17] az allelokemikáliákat több csoportba bontotta, mely szerint vannak: egyszerű vízdoldékony szerves savak, egyértékű alkoholok, alifás aldehidek és ketonok; egyszerű telítetlen laktonok; nagy szénatomszámú zsírsavak és poliacetilének; naftokinonok, antrakinonok és komplex kinonok; aminosavak és polipeptidek; szulfidok és glükózidok; fahéjsav és származékai; purinok és nukleotidok; flavonoidok; egyszerű fenolok, benzoosav és származékai; alkaloidok és cianohidridek; tanninok; terpenoidok és szteroidok.

Az allelokemikáliák hatásmechanizmusa igen eltérő. Egyes vegyületek a növényi sejtnövekedésre hatnak, mások a membránok permeabilitására. Vannak olyanok, amelyek hatást gyakorolnak a növényi táplálkozásra, a fotoszintézisre, a növények vízháztartására, enzimaktivitására, a fehérje-, zsírsav- és porfirinszintézis gátlásán át [8] [9].

A csillagfürt allelokemikáliái a quinolizidin alkaloid (QA) típusú vegyületek csoportjába tartoznak, azon belül is a spartein, α -isopartein, lupanin, α -isolupanin típusú alkaloidok közé. A legfontosabb a lupanin, de nagy jelentősége van a sparteinnek, az angustifolinak, a tetrahydrohombifolinak, a 4-hydroxylupaninnak, a 13-hydroxylupaninnak, a multiflorinnak és olyan észter típusú vegyületeknek, mint a 13-tigloyl-oxylupanin [18] [20] [21]. Ezek a vegyületek kívül további 20 egyéb, lényegesen kisebb mennyiségben előforduló alkaloid típusú vegyületet lehet még beazonosítani a csillagfürtfajokban [20] [6] – leginkább azok zöld vegetatív részeiben.

Az allelokemikáliák legnagyobb mennyiségben a csillagfürt föld feletti vegetatív szerveiben fordulnak elő, azok közül is a levelek azok, amelyek a lényegi mennyiséget tartalmazzák [5]. Szintézisük fő helyszíne a kloroplasztiszok alapállománya, a sztróma. A főbb allelokemikáliák (lupanin, spartein) a phloémbe transzlokálódnak főbb képződési helyükről, a levelekből leginkább a virágzat, termés irányába. A szárba transzlokálódó lupanin nem akkumulálódik annak minden sejtében, feldúsulása leginkább az epidermisz sejtekben, illetve az ez alatt elhelyezkedő első 1-2 szubepidermális sejtretegére jellemző [6]. A fentiekkel magyarázhatók az egyes vegetatív és generatív szervek allelokemikália-tartalmában meglévő különbségek: legtöbb allelopatikus hatású alkaloida a leveles szárban, virágzatban, termésben halmozódik fel, a gyökerek alkaloidtartalma a fenti szervek alkaloidtartalmától jelentősen elmarad.

Wink [20] ez eddig nem publikált eredményei szerint az egyes szervek allelokemikália-tartalma a vegetációs periódus során változik. A terméskötésig a leveleknek relatíve magas alkaloidtartalma van. A termésképzés során azonban ez az eloszlás átrendeződik: a képződő termésben koncentrálnak az alkaloidok majdnem teljes mennyisége, és ez az eloszlás a vegetációs periódus végéig fent is marad.

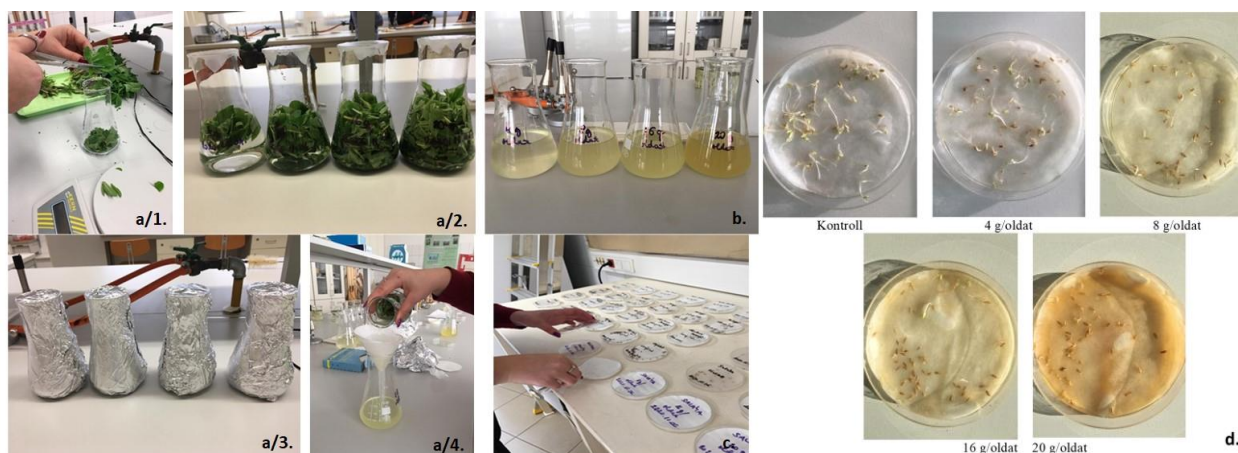
3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. A fehér virágú keserű csillagfürt gyomflórájának felmérése 2018-ban és 2019-ben

Mintaterületünkön – a Nyíregyházi Egyetem Tangazdaságának 10 hektáros ökológiai gazdálkodásban termesztett csillagfürtállománya – a gyomfelvételezéseket a Balázs–Ujvárosi-módszerrel [22] végeztük, egy-egy parcellán az egyes gyomfajok területborítási százalékának megbecslésével. A felvételezések időpontjait a kora tavaszi, a nyári, valamint a nyár végi aszeptikusokhoz igazítottuk, így azok időpontjai 2018-ban és 2019-ben a következők voltak: május 14., 17., július 04., 08., valamint augusztus 04. és 07. A felvételezések során vizsgáltuk a táblaszéleket (két ismétlés) és a táblán belüli területeket (négy ismétlés). A felméréseknél a véletlenszerűen kijelölt felvételezési négyzet 4 m² volt, a gyomborítottság megállapítása becsléssel történt. Az egyes gyomnövények borítási értékét borítási %-kal fejeztük ki. A felvételezések során meghatároztuk az előforduló gyomfajokat Ujvárosi [22] és Németh [23] munkái alapján. Becsültük azok átlagborítási értékeit, életformacsoportok szerint kategorizáltuk őket. A felmérések során elemeztük az egyes életformacsoportok borításának alakulását, a fajokra lebontott borítás változását, rangsoroltuk azokat [24] [25] [26].

3.2. Kivonat készítés csillagfürtből

A csillagfűt allelopatikus hatásának vizsgálatához az allelokemikáliákat Putnam és Duke [27] hideg vizes toxinizációs módszere alapján nyertük ki: 4, 8, 16, 20 g leveles szárat aprítottunk fel, áztattuk azokat 24 órán keresztül, fénytől elzárva, 100-100 ml csapvízben (pH 7,1 – HI 10832 HALO® vezeték nélküli pH-mérővel mérve). 24 óra letele után a kivonatokat szűrtük, és minden esetben frissen elkészítve használtuk (1. ábra).



1. ábra. Hideg vizes toxinizációs módszer alapján készült kivonatok és kezelések a/1-a/4. a kivonatkészítés lépései, b. az elkészült, allelokemikáliákat különböző koncentrációban tartalmazó kivonatok, c. biotesztek beállítása, d. az egyes kezelések hatása salátatesztnövény esetében (forrás: saját felvétel)

3.4. Biotesztek

A biotesztekhez használt gyommagvakat – *Echinochloa crus-galli*, *Setaria viridis*, *Ambrosia artemisiifolia*, *Chenopodium album*, *Persicaria lapathifolia*, *Amaranthus retroflexus*, *Setaria viridis* – egy bükönyi kiskertből 2020. júliusától szeptemberéig gyűjtöttük; az olajretekmagvakat a Debreceni Egyetem ATK Nyíregyházi Kutatóintézet biztosította, a salátavetőmagvakat a bükönyi Gazdaboltban vettük.

A tesztnövények magvait szűrőpapírral bélelt, 9 cm átmérőjű Petri-csészébe helyeztük, csészénként és kezelésként 50-50 db magot használva, a magvakat szintén lefedtük szűrőpapírral (1. ábra). A kísérletet 2020. november 6-án állítottuk be. A tesztnövényeket 10-10 ml – a hideg vizes toxinizációs kivonás eredményeként kapott – kivonattal locsoltuk. A kezelések a következők voltak: kontrollcsapvíz, 4 g-os hajtáskivonat, 8 g-os hajtáskivonat, 16 g-os hajtáskivonat, 20 g-os hajtáskivonat.

A csírázás vizsgálatát és kiértékelését a 3., valamint az 5. napon végeztük el; elemeztük a csírázási százalékot, valamint mértük a gyökér és a gyökértömeg növekedésének ütemét. Az ezen paraméterekre vonatkozó közölt értékek átlagértéke (n=50).

4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

4.1. A gyomfelvételezések eredményei

Gyomfelvételezési vizsgálataink eredményeként megállapítható, hogy mintaterületünkön a gyomok száma nem tekinthető kritikusnak, a választott termesztési mód nem befolyásolja negatívan a gyomfajszám alakulását (míg 2018-ban és 2019-ben a táblán található gyomfajszám átlaga 13 volt, a gyomborítás 23-24%-os volt) (1. táblázat), ugyanakkor a nagy maghozamú, gyommagbankot képző, nagy termetű növények jelenléte hosszú távon odafigyelést igényel.

Megállapítottuk, hogy a területen jellemző az *Echinochloa crus-galli* jelenléte. Jelentős a *Hibiscus trionum*, a *Sinapis arvensis*, valamint a *Chenopodium album* és a *Polygonum persicaria* borítottsága. Meghatározó a *Helianthus annuus*, *Phacelia tanacetifolia*, valamint a *Panicum miliaceum* mint árvakelés dominanciája. Szintén meghatározó a T4-es *Ambrosia artemisiifolia* jelenléte. A *Convolvulus arvensis* a táblaszélén jelenik meg (1. táblázat).

Megállapítható volt, hogy a vegetációs periódus során a T4-es életformával bíró gyomfajok magas dominanciával rendelkeztek. Az *Ambrosia artemisiifolia* mint T4-es gyomfaj önmaga is jelentős borítottságra tett szert, kimagasló mértékben fordult elő a táblaszélén, de meghatározóvá vált jelenléte a csillagfűrtáblában is. Míg a táblaszél maximum 35-36% borítottságából (35-36%) júliusban, illetve augusztusban önmaga 10-10%-ot adott, magában a táblában is jelen volt 5%-os borítottsági értékkel. Magas gyomborítottságból való részesedése arra utal, hogy ökotermesztési viszonyok között a csillagfűrtállományokban számolnunk kell a nagy növekedésű, erős kompetitorfajként megjelenő T4-es életformájú parlagfű gyomként történő megjelenésével. Ezen problémát tovább fokozza, hogy a parlagfű 3380 db mag/növény maghozammal rendelkezik, magjai a csírázókéességüket akár 40 évig is megőrzik, ráadásul a magvak vitalitása nem csökken, a mélyebb talajsínteken (105 cm) található magvak hasonló életképességekkel rendelkeznek, mint a sekélyebben elhelyezkedők (25 cm).

1. táblázat. Az egyes gyomfajok borítottsági értékének alakulása a csillagfürttáblában és a táblaszéleken (2018, 2019)

Gyomnövények	Éf.	2018. 05. 14.		2018. 07. 04.		2018.08. 04.		2019. 05. 17.		2019. 07. 08.		2019.08. 07.	
		Borítottság (%)		Borítottság (%)		Borítottság (%)		Borítottság (%)		Borítottság (%)		Borítottság (%)	
		Tsz.	T.	Tsz.	T.	Tsz.	T.	Tsz.	T.	Tsz.	T.	Tsz.	T.
<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.	T4	6	4	10	5	10	5	5	3	10	5	10	5
<i>Chenopodium album</i> L.	T4	3	1	+	+	+	+	3	1	+	+	+	+
<i>Convolvulus arvensis</i> L.	G3	+	-	2	+	1	+	+	-	3	+	1	+
<i>Echinochloa crus-galli</i> (L.) P. Beauv.	T4	5	3	7	3	3	2	4	4	7	4	4	1
<i>Helianthus annuus</i> L.	T4	-	1	-	2	-	2	-	1	-	2	-	2
<i>Hibiscus trionum</i> L.	T4	3	2	3	2	2	1	5	2	3	3	2	1
<i>Phacelia tanacetifolia</i> L.	T3	-	0,5	-	1	-	1	-	1	-	1	-	-
<i>Polygonum persicaria</i> L.	T4	2	1	3	2	2	2	3	2	3	3	2	1
<i>Portulaca oleracea</i> L.	T4	-	0,5	2	3	2	3	-	1	2	2	2	2
<i>Raphanus raphanistrum</i> L.	T3	2	1	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2
<i>Sinapis arvensis</i> L.	T3	3	2	3	2	2	2	3	3	3	3	2	1
<i>Panicum miliaceum</i> L.	T4	-	-	-	2	-	2	-	-	-	1	-	1
<i>Setaria viridis</i> L.	T4	-	-	2	2	2	2	-	-	2	3	2	2
<i>Xanthium strumarium</i> L.	T4	-	-	-	1	-	2	-	-	-	1	-	2
Fajszám (db)		8	10	10	14	10	14	8	10	10	14	10	14
Összes gyomborítás (%)		24	16	35	27	26	26	25	20	36	31	27	20

Éf.: Életforma, Tsz.: Táblaszél, T.: Tábla

A vizsgálatok szintén felhívják a figyelmet a Brassicaceae család tagjainak (*Raphanus raphanistrum*, *Sinapis arvensis*) ökoksillagfürt-állományokban történő meghatározó jelenlétére. Mellettük a Polygonaceae család fajai közül a *Polygonum persicaria* megjelenésével kell számolni az ökotermesztési viszonyok között. A Poaceae családba tartozó gyomfajok mind egyedszámukat, mind borítottságukat tekintve nagy jelentőséggel bírnak. Kiemelten kell kezelni a nagy maghozamú *Echinochloa crus-galli* jelenlétét ezekben az ökoksillagfürt-táblákban (a kakaslábfű növényenkénti magszáma 7160 db), illetve a *Setaria viridis* megjelenését a tenyészidő második szakaszában. A *Chenopodium album* jelenléte szintén a nagymértékű maghozama (72 450 db mag/növény) miatt nemkívánatos a táblában (azontúl, hogy nagy méretű és mélyen gyökeresedő, erősen kompetitorfajról beszélünk).

Noha a nyárutói aszpektus fény- és hőigényes fajai a sűrű állományban nem tudnak elhatalmasodni, kis fokú jelenlétük sem kívánatos. Problémásnak tekinthető a *Xanthium strumarium* megjelenése, mivel mélyről kelő, nagy magvú gyomról van szó, melynek folyamatos csírázása miatt nehéz az ellene történő védekezés. Nitrogénkedvelő növényként elgondolkodtató a megjelenése, gondolva a csillagfürt Rhizobium baktériumokkal történő szimbióta kapcsolatából adódó jelentős mennyiségű nitrogénfixációjára.

4.2. A biotesztek eredménye

A biotesztek kiértékelését a beállítása utáni harmadik, illetve ötödik napon, 2020. november 9-én és 11-én végeztük.

A salátamag csíráztatásakor elsősorban a csillagfürt allelokemikáliáinak csírázástgátló hatása volt megfigyelhető (2. táblázat). Míg a kontrollkivonatban az összes mag kicsírázott, az egyre töményebb kivonatokkal történt kezeléseknél fokozatosan csökkent a csírázási szám. Ugyanakkor a 20 g/oldat kivonatban ismét megugrott ez az érték, látszólag a kivonat inkább serkentette, mint gátolta a csírázást. (A jelenség hátterében a töményedő kivonat növekvő szervesanyag-tartalma állhat, felülírva az allelokemikáliák csírázástgátló hatását.)

2. táblázat. A saláta-, az olajretek-, a kakaslábfű- és a szőrös disznóparéj-magvak csírázási értékének (db) és a fejlődő gyökerek hosszának (mm) alakulása

	Saláta		Olajretek		Kakaslábfű		Szőrös disznóparéj	
	Cs	Gy	Cs	Gy	Cs	Gy	Cs	Gy
Kontroll	50	25	38	25	3	22	15	30
4 g/oldat	41	22	13	23,5	2	14	12	18
8 g/oldat	29	8	14	22,5	-	-	15	17
16 g/oldat	12	7	11	21,5	-	-	13	12
20 g/oldat	34	2	24	13,5	-	-	11	11

Cs: csírázott magvak száma (db), Gy: gyökérhossz (mm), n=50

A kivonatok töményedésével párhuzamosan nemcsak a csírázott magvak száma csökkent, hanem a kicsírázott magvak gyökérhosszúsága is erőteljes csökkenést mutatott. A kontrollkivonat esetében a salátagyökerek átlagos hossza 25 mm volt. Ez az érték a 4 g/oldat kivonatban 22 mm, a 8 g/oldat kivonatban 8 mm, a 16 g/oldat kivonatban 7 mm, míg a 20 g/oldat kivonatban már csak 2 mm volt. Jelentős gyökérnövekedés-gátlást tapasztaltunk a 20 g/oldat kivonatnál a kontrollhoz képest. A fentiek alapján megállapítható, hogy az allelopátia gátló hatása jelentősen negatív irányba befolyásolta a gyökerek hosszának növekedését.

Az olajretekmagvak vontatottan indultak csírázni, esetükben a kiértékelést a kísérlet beállítása utáni ötödik napon, 2020. november 11-én végeztük. A 16 g/oldat kivonatig egyértelmű volt az olajretekmagvak esetében is az allelopátia gátló hatása, a csírázási értékek a kivonatok töménységét növelve fokozatosan csökkentek (2. táblázat). A 20 g/oldat

kivonat esetében azonban a csírázási szám értékének növekedése volt tapasztalható. Az olajretek magvak esetében a gyökerek hosszának alakulásában szintén jelentős eltéréseket tapasztalhattunk, a megfigyelhető tendencia esetükben is az allelokemikáliák gyökérnövekedésre gyakorolt negatív hatását igazolták.

A vizsgálat kiértékelését gyommagvak esetében szintén a beállítás utáni ötödik napon végeztük. Az eredményeket csak a közönséges kakaslábfű és a szőrös disznóparéj esetében tudtuk igazából elemezni, mivel a többi gyommag – ürömlevelű parlagfű, lapulevelű keserűfű, fehér libatop, zöld muhar – a vizsgálataink alatt nem csírázott ki.

A közönséges kakaslábfű gyommagjai a kontroll-, valamint a 4 g-os oldat esetében mutattak csírázást, az allelokemikáliákat nagyobb koncentrációban tartalmazó oldatok gátolták a magvak csírázását. A szőrös disznóparéj esetében a magasabb koncentrációjú kivonatok kismértékű, de határozott negatív hatást mutatottak a csírázási erélyre, az allelokemikáliák a gyökérhosszak alakulására szintén karakterisztikus hatással bírtak (2. táblázat).

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Vizsgálatainkból több korábbi szerző tapasztalataival megegyezően (Wink [20] [6], Wink és Hartmann [5]) bebizonyosodott, hogy a csillagfűrt (*Lupinus albus* L.) allelopatikus hatással rendelkezik. Eredményeink megerősítik, hogy a csillagfűrt esetében is az allelopátia egyaránt bírhat serkentő és gátló hatásokkal [17].

Megállapítottuk, hogy a csillagfűrt allelopatikus hatása koncentrációfüggő tulajdonság, a tesztnövények nagy részének gyökérnövekedése érzékenyen reagált a kivonatokra. Kísérletünkben bebizonyítottuk, hogy a biotesztek során a csírázási szám és a gyökérhossz között nincs jelentős összefüggés, a csíraszám változása nem vonja maga után a gyökérhossz változását. A tesztnövények (olajretek, saláta, közönséges kakaslábfű, szőrös disznóparéj) és azok életfolyamatai eltérő mértékben reagáltak a csillagfűrt friss részeiből készített kivonatokra, de a kicsírázott növények igazolták az allelopátia jelenlétét.

A legérzékenyebben a saláta reagált a kivonatokra, az esetében tapasztaltuk az allelokemikáliákat tartalmazó kivonatok legerősebb csírázás-, és gyökérnövekedés-gátló hatását, a csírázás nagymértékű gátlása már az alacsony allelokemikália-tartalmú kivonatok esetében is megmutatkozott. A saláta tesztnövényként történő kiválasztása mellett az is szólt, hogy az Asteracea család tagja, akárcsak a csillagfűrt gyomflórájában megjelenő *Xanthium strumarium* és *Ambrosia artemisiifolia*. A *Xanthium strumarium* L. invázióval terjedő gyomnövény, melynek erős allelopatikus hatása bizonyított [28] [29]. Az *Ambrosia artemisiifolia* L. szintén tartalmaz nagyrészt vízoldható allelopatikus hatású aktív vegyületeket [30].

Az olajretek a Brassicaceae családba tartozó növény, tesztnövényként történő kiválasztását indokolta, hogy a gyomfelvételezések során a csillagfűrt gyomflórájában ebből a családból származó két faj is előfordult (*Raphanus raphanistrum* L.; *Sinapis arvensis* L.), viszonylag konstans, bár nem igazán jelentős, 2-3%-os borítottsági értékkel. Az olajretek magvak, bár nem olyan karakterisztikusan, mint a salátamagvak, de hasonlóan reagáltak a hideg vizes toxinizációs módszerrel készített oldatokkal történő kezelésekre. Esetükben szintén negatívan befolyásolta mind a csíraszámot, mint a gyökér hosszanti növekedését a kezelés.

A gyomnövények közül a kakaslábfű (*Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv.) magvainak csírázására érzékelhető mértékben gyakorolt negatív hatást a kivonatokkal történő kezelés, a növekvő allelokemikália-koncentráció gyakorlatilag teljes csírázásgátló hatással rendelkezett ezen gyomfű esetében. Gyomfelvételezéseink során azt tapasztaltuk, hogy a májusi felvételezésről az augusztusi felvételezésre jelentősen csökkent a kakaslábfű borítottsága a csillagfűrtáblákban, esetlegesen a csillagfűrt növényekből fokozódó módon kimosódó allelokemikáliák talajbeli koncentrációjának növekedésével magyarázhatóan. A szőrös disznóparéj (*Amaranthus retroflexus* L.) csírázását kevésbé karakterisztikusan, de szintén befolyásolták a kivonatok.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Vizsgálataink célja annak elemzése volt, hogy az elvégzett gyomfelmérések (2018., 2019. év) eredményeinek ismeretében megnézzük, lehet-e a csillagfűrt allelopátiájának szerepe a csillagfűrtállományok gyomflórájának alakulásában. A csillagfűrt allelokemikáliái csírázásgátló hatásának vizsgálataihoz biotesztekkel végeztünk el hideg vizes toxinizációs eljárással nyert 4; 8; 16 és 20 g/100 ml oldat töménységű kivonatokkal. Tesztnövényként olajretek, saláta, közönséges kakaslábfű, szőrös disznóparéj, ürömlevelű parlagfű, lapulevelű keserűfű, zöld muhar és fehér libatop magvait használtuk. Kezelésenként értékeltük az egyes magvak csírázásának mértékét (kezelésenként 50-50 db magvat véve figyelembe), mértük a fejlődő gyökerek hosszúságának alakulását.

Az alkalmazott kezelések során a saláta- és az olajretek magvak esetében tapasztaltuk teljes mértékben a csillagfűrt allelokemikáliáinak csírázásgátló hatását, az egyre töményedő kivonatok hatására fokozatosan csökkent a magvak csírázási ereje, a fejlődő gyökerek hossza. A gyommagvak közül a kakaslábfű mutatott egyértelmű hatást a kezelésre, a koncentráció növekedésével csökkent a csírázási erélye és a fejlődő gyökérhossz. Gyenge hatás volt kimutatható a szőrös disznóparéj esetében.

Összességében azonban megállapíthattuk, hogy a csillagfűrt allelopatikus hatása koncentrációfüggő tulajdonság, a tesztnövények ugyan eltérő módon reagáltak a csillagfűrt leveles szárából készített kivonatokra, de valamennyi tesztnövény igazolta az allelopátia jelenlétét a biotesztekben: a kezelések hatottak a csíraszám alakulására és a gyökerek hosszának fejlődésére.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] M. Czékus, Csillagfürt - egy ígéretes növény, Agrárágazat, pp. 30–33, 2018.
- [2] J. Kruppa, Csillagfürt (*Lupinus sp. L.*) In: Radics L. Alternatív növények termesztése II., Budapest, Szaktudás Kiadó Ház, pp. 105–125, 2002.
- [3] J. Kruppa, Csillagfürt. In: Antal J. Növénytermesztéstan 2., Gyökér és gumós növények, hüvelyesek, olaj- és ipari növények, takarmánynövények, Budapest, Mezőgazda Kiadó, 2005.
- [4] K. Hunyadi, I. Béres, G. Kazinczi, Gyomnövények, gyombiológia, gyomirtás, Budapest, Mezőgazda Kiadó, 2011.
- [5] M. Wink, T. Hartmann, "Sites of enzymic synthesis of quinolizidine alkaloids and their accumulation in *Lupinus polyphyllus*", Z. Pflanzenphysiol, 102. pp. 337–344, 1981.
- [6] M. Wink, "Biochemistry and chemical ecology of lupin alkaloids", IIIrd International Lupine Conference. La Rochelle (France) 4-8 JUIN, 1984. pp. 326–343, 1984.
- [7] M. Kroc, W. Rybinski, P. Wilczura, K. Kamel, Z. Kaczmarek, P. Barzyk, W. Świecicki, "Quantitative and qualitative analysis of alkaloids composition in the seeds of a white lupin (*Lupinus albus* L.) collection", Genet. Resour. Crop Evol. 64, pp. 1853–1860, 2017.
- [8] J. Mikulás, Allelopátia. In: Hunyadi K.: Szántóföldi gyomnövények és biológiájuk, Budapest, Mezőgazdasági Kiadó, pp. 341–350, 1988.
- [9] V. Nagy, A selyemmályva (*Abutilon theophrasti medic.*) csírázásbiológiájának és kompetíciós képességének tanulmányozása. Doktori (PhD) értekezés. Pannon Egyetem Georgikon Kar. Keszthely, 2012.
- [10] F. A. Macías, J. M. G. Molimillo, A. Oliveros - Bastidas, D. Marín, D. Chinchilla, "Allelopathy, a natural strategy for weed control", Ghent University, 2004.
- [11] F. Borbély, I. Lenti, GY. Kövics, Csillagfürt fajok növényvédelme, Nyíregyháza, pp. 28–291, 2008.
- [12] R. J. Willis, "Terminology and trends in allelopathy", Allelopathy Journ. 1(1):6–28, 1994.
- [13] L. GY. Szabó, Allelopátia mesterséges és természetes körülmények között – az allelopátia értelmezése, Doktori értekezés, 1997.
- [14] M. J. Reigosa, A. Sanchez-Moreiras, L. Gonzeles, "Ecophysiological approach in allelopathy", Critical Reviews in Plant Sci. 18 (5): 577–608, 1999.
- [15] I. Béres, Allelopátia. In: Hunyadi K. – Béres I. – Kazinczi G. (szerk.): Gyomnövények, gyomirtás, gyombiológia, Budapest, Mezőgazda Kiadó, pp. 307–320, 2000.
- [16] D. Brückner, L. Szabó, Az allelopátia modern értelmezése, Kitaibelia, VI. évf. 1. szám, Debrecen, pp. 93–106, 2001.
- [17] E. L. Rice, Allelopathy, Second Edition, Orlando, Academic Press, pp. 422, 1984.
- [18] M. Wink, T. Hartmann, "Production of quinolizidine alkaloids by photomixotropic cell suspension cultures: Biochemical and biogenetic aspects", Planta Med. 40. pp. 149–155, 1980.
- [19] M. Wink, T. Hartmann, "Localization of the enzymes of quinolizidine alkaloid biosynthesis in leaf chloroplasts of *Lupinus polyphyllus*", Plant Physiol. 70. pp. 74–77, 1982.
- [20] M. Wink, "Inhibition of seed germination by quinolizidine alkaloids: Aspects of allelopathy in *Lupinus albus* L.", Planta 158. pp. 365–368, 1983.
- [21] M. Kroc, W. Rybinski, P. Wilczura, K. Kamel, Z. Kaczmarek, P. Barzyk, W. Świecicki, "Quantitative and qualitative analysis of alkaloids composition in the seeds of a white lupin (*Lupinus albus* L.) collection", Genet. Resour. Crop Evol. 64, pp. 1853–1860, 2017.
- [22] M. Ujvárosi, Gyomirtás, Budapest, Mezőgazdasági Kiadó, pp. 288, 1973.
- [23] I. Németh, Gyomnövényismeret, Kompolt, Regiocon Kft., pp. 283, 1996.
- [24] E. Valent, CS. Tóth, "A csillagfürt (*Lupinus albus* L.) gyomflórája ökológiai gazdaságban". In: Kalmárné, Vass Eszter (szerk.) Nyíregyháza, Magyarország: Nyíregyházi Egyetem, pp. 47–54, 2018.
- [25] CS. Tóth, V. Apagyai, E. Kosztyuné Krajnyák, B. Szabó, M. Szabó, E. Valent, "A fehér virágú keserű csillagfürt gyomflórájának vizsgálata ökológiai gazdálkodásban", Georgikon for agriculture: A Multidisciplinary Journal in Agricultural Sciences, 24:1. pp. 43–49, 2020.
- [26] CS. Tóth, M. Szabó, E. Kosztyuné, Krajnyák, B. Szabó, V. Apagyai, E. Valent, "The opportunities and limits of weed control in organic farming of white lupin", In: Szabó, Béla; Kosztyuné Krajnyák, Edit (szerk.) Proceedings of the International Scientific Conference Nutriment-farming researches at University of Nyíregyháza, Nyíregyháza, Magyarország: Nyíregyházi Egyetem, 124 p. pp. 97–104, 2020.
- [27] A. R. Putnam, W. B. Duke, "Allelopathy in Agroecosystems", Ann. Rev. Phytopathol. 16. pp. 431–451, 1978.
- [28] I. Dávid, Az olasz szerbtövis (*Xanthium italicum* Mor.) versenyképessége, allelopátiája és a védekezés lehetőségei. PhD-értekezés. Debrecen, 2005.
- [29] P. Makleit, L. Nagy, L. G. Nagy, SZ. Veres, Az együttes nevelés hatása a napraforgó (*Helianthus annuus* L. cv.: NK Brio) és a bojtortján szerbtövis (*Xanthium strumarium* L.) növekedésére és fotoszintetikus pigment tartalmára, LV. Georgikon Napok Összefoglaló Kötete. 429–439, 2012.
- [30] D. J. Brückner, A. Lepossa, Z. Herpai, Parlagfü-allelopátia: közvetett kölcsönhatások, Növénytermelés. 50: pp. 231–236, 2001.

Az almamoly kártételének vizsgálata ökológiai almaültetvényben

Investigation of codling moth (*Cydia pomonella* L.) damage in an organic apple orchard

Uri Zsuzsanna^{1*} – Abonyiné Kántor Anita² – Holb Imre³

¹ Nyíregyházi Egyetem, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b, uri.zsuzsanna@nye.hu

² Nyíregyházi Egyetem, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b, abonyinita@gmail.com

³ Debreceni Egyetem, 4032 Debrecen, Böszörményi út 138., holb@agr.unideb.hu

Összefoglaló: Kutatómunkánk során a hím almamoly- (*Cydia pomonella* L.) egyedek rajzási dinamikájának meghatározását végeztük szexferomon csapdázással Eperjeskén ökológiai almaültetvényben 2013-ban és 2014-ben. A vizsgált almafajták a Golden, az Idared, a Prima és a Florina fajták voltak. A vizsgálat első évében a molyok csapdázása az első rajzáscsúcsot június második felében, a másodikat augusztus első felében mutatta. A második évben az eredményeink alapján az első rajzáscsúcs május első dekádjában, míg a második rajzás csúcsa június első felében volt. A molyhímek populációjának harmadik rajzáscsúcsát pedig július első felében mértük. Vizsgálatunk kiterjedt az almamoly betakarítási kártételének elemzésére is. A kártétel mértékében jelentős különbséget a fajták nem mutattak. A molylárvák gyümölcskártétele jelentős volt valamennyi vizsgált fajta esetében.

Kulcsszavak: almamoly (*Cydia pomonella* L.), biológiai növényvédelem, ökológiai almaültetvény, feromon csapdázás, rajzásdinamika, gyümölcskártétel

Abstract: In our research, we determined the population dynamics of male codling moth (*Cydia pomonella* L.) individuals by pheromone trapping in an organic apple orchard in Eperjeske in 2013 and 2014. The apple varieties studied were Golden, Idared, Prima and Florina. In the first year of the study, the trapping of moths showed the first swarming peak in the second half of June and the second swarming peak was in the first half of August. In the second year, based on our results, the first swarming peak was in the first decade of May, while the second swarming peak was in the first half of June. And the third swarming peak of the codling moth population was measured in the first half of July. Our investigation also included an analysis of codling moth damage in harvest. There were no significant differences in the extent of damage between the varieties. Fruit damage to moth larvae was significant in the all varieties studied.

Keywords: codling moth (*Cydia pomonella* L.), organic plant protection, organic apple orchard, pheromone trapping, population dynamics of codling moth, codling moth damage on apples

1. BEVEZETÉS

A növényvédő szerek fokozott használatával korábban nem ismert humán egészségügyi és környezetszennyezési problémák merültek fel világszerte. Mindez arra sarkallta a világ mezőgazdaságát, hogy a hagyományos termesztést környezetkímélő gazdálkodási formákkal váltsák fel. Napjaink fenntartható gazdálkodási formái közül az integrált és az ökológiai gazdálkodás a legismertebbek [1].

Az almatermesztésben a legjelentősebbek a növényvédelem költségei, melyek az éves ráfordítások 35-50%-át is kitehetik. Csak a növényvédőszer-költségek elérhetik a növényvédelem összköltségének 65-70%-át. A növényvédelem költségeinek arányát természetesen a termesztés rendszere (konvencionális, integrált vagy ökológiai) számottevően módosítja a fajta fogékonysága mellett.

Az almának számtalan rovarkártevője van. Ezek közül vannak speciálisan az almára szakosodott rovarok, és vannak polifág kártevők [2]. Az alma növényvédelmi technológiájában meghatározó állati kártevő az almamoly (*Cydia pomonella* L.). A moly elleni kémiai védekezések száma elérheti a 10-et a szárazabb évszakokban. Az almának nincs még egy olyan állati kártevője, amely hasonló intenzitású védekezést kívánna [3]. E károsító elleni védekezés komoly szakmai kihívást jelent még integrált növényvédelmű ültetvényekben is, az ökológiai almaültetvényekben pedig szinte megoldhatatlan feladatok elé állíthatja a gazdálkodót. Ennek oka, hogy az ökotermesztésben engedélyezett készítmények szerény biológiai hatékonyságúak az almamoly ellen [4].

Az almamoly hazánkban kétnemzedékes. Az első nemzedék rajzása és peterakása május elejétől június végéig tart, a második nemzedéké július elejétől kezdődik. Az utóbbi, melegebb években nem kizárt egy csonka, harmadik nemzedék megjelenése sem augusztus–szeptember folyamán [5]. Az almamoly két nemzedéke közül az első nemzedék okozhatja az első jelentősebb kárt a kis dió nagyságú gyümölcsön. Jellemzően, apró sérülést, lárvabehatolási helyet találunk a termésein. A behatolás körül hernyóürüléket észlelhetünk. Az almát kettévágva a lárvajarat a gyümölcshúson keresztül egészen a magházig tart. A károsított gyümölcsök lehullnak. Gyakori, hogy a csokorban lévő almák ugyanattól a hernyó

kártételétől szenvednek, ugyanis az érintkezési pontokon keresztül a moly az egyik almából a másikba is átfúrhatja magát. A befúrási hely sérülései utat nyithatnak a másodlagos kórokozók számára, mint például moníliafertőzéseknek, komoly károkat okozva az ökológiai természetben. Az almamoly az ökológiai gyümölcsösben 30%-os kárt is okozhat évjárártól függően [6].

Tekintettel arra, hogy a fenntartható mezőgazdálkodás egyik alappillére az ökotermesztés, így napjainkban egyre nagyobb volumenű kutatások folynak ökológiai természetben – így az ökológiai almatermesztés – esetében is, kiemelten az almamoly elleni hatékony növényvédelmi technológia fejlesztése érdekében.

Munkánk általános célkitűzése volt, hogy olyan ismeretekkel gazdagítsuk az eddigi tudásunkat, amelyekkel javíthatók az almamoly elleni védekezés lehetőségei az ökológiai almatermesztésben. Ennek érdekében a következő rész célkitűzéseket fogalmaztuk meg:

- a hím almamolyegyedek rajzási dinamikájának meghatározása szex-feromon csapdázással,
- az almamoly-gyümölcskárosítás mértékének meghatározása az ökológiai gazdálkodás növényvédelmi feltételei mellett.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. A vizsgálatok helye

Szabadföldi vizsgálatainkat a Szabolcs-Szatmár-Bereg megyében, Eperjeskén elhelyezkedő ökológiai gazdálkodású almaültetvényben végeztük 2013-ban és 2014-ben. Az ültetvény 18 ha nagyságú, és 1997-ben lett telepítve. 2002 óta folyik ökológiai termék előállítás a területen. A termesztett almafajták a Prima, a Florina, a Mutsu, a Golden és az Idared. A telepített fajták térállása 6x4 m MM106-os alanyon.

A terület genetikai talajtípusa nem karbonátos humoszos homok, fizikai talajfélesége homok. Az ültetvényre domborzati viszonyai miatt a közepes erózió a jellemző. A talaj közepesen tömörödött, a talajvíz mélysége 2 m. A talajvizsgálati eredmény szerint a talaj kémhatása erősen savanyú (pH = 5), humusztartalma genetikai talajtípusán belül közepes (1,2%), Arany-féle kötöttsége (KA) 27, makroelem-ellátottság tekintetében (felvehető, AL-oldható) foszfortartalma 144,19 ppm, káliumtartalma 169,92 ppm, jó tápanyag-ellátottsági szintűnek felel meg. Az ültetvényt egy keskeny akácerdősáv határolja, ami főleg a lepkekártevők és a cserebogár elleni védekezést nehezíti.

Az 1. táblázatban a 2013-ban, a 2. táblázatban a 2014-ben kártevők ellen alkalmazott növényvédelmi kezeléseket mutatjuk be.

1. táblázat. Ökológiai almaültetvény kártevők elleni növényvédelmi programja (Eperjeske, 2013)

Növényvédelmi kezelés		Alkalmazott készítmény		
Időpont	Fenológiai fázis	Hatóanyag	Márkanév	Dózis
május 20.	szíromhullás	<i>Bacillus thuringiensis ssp. kurstaki</i> , ABTS-351 törzs	Dipel DF	2 kg/ha
június 17.	gyümölcsnövekedés	<i>Bacillus thuringiensis ssp. kurstaki</i> , ABTS-351 törzs	Dipel DF	1,5 kg/ha
július 06.	gyümölcsnövekedés	83% parafinolaj+17% atplus 300F emulgeátor	Vektafid A	9 l/ha
augusztus 05.	gyümölcsnövekedés	<i>Bacillus thuringiensis ssp. kurstaki</i> , ABTS-351 törzs	Dipel DF	1,5 kg/ha

2013-ban 10 növényvédelmi kezelést végeztünk, hatszor kórokozók, négyszer állati kártevők ellen (1. táblázat) védekeztünk. A fitotechnikai műveletek közül a téli metszést februárban, a zöldmunkákat július első dekádjában végeztük. A gyomszabályozást a sorközökben gépi kaszálással, a sorokban kézi kaszálással évente kétszer, június elején és betakarítás előtt végeztük.

2014-ben kilencszer kellett védekeznünk, ötször kórokozók, négyszer állati kártevők ellen (2. táblázat). A fitotechnikai műveletek közül a téli metszést februárban, a zöldmunkákat július első dekádjában végeztük. A gyomszabályozás a 2013-as évvel azonos volt.

2. táblázat. Ökológiai almaültetvény kártevők elleni növényvédelmi programja (Eperjeske, 2014)

Növényvédelmi kezelés		Alkalmazott készítmény		
Időpont	Fenológiai fázis	Hatóanyag	Márkanév	Dózis
április 20.	virágzás	<i>Bacillus thuringiensis</i> ssp. <i>kurstaki</i> , ABTS-351 törzs	Dipel DF	2 kg/ha
június 19.	gyümölcsnövekedés	<i>Bacillus thuringiensis</i> ssp. <i>kurstaki</i> , ABTS-351 törzs	Dipel DF	1,5 kg/ha
július 15.	gyümölcsnövekedés	83% parafinolaj+17% atplus 300F emulgeátor	Vektafid A	9 l/ha
augusztus 04.	gyümölcsnövekedés	<i>Bacillus thuringiensis</i> ssp. <i>kurstaki</i> , ABTS-351 törzs	Dipel DF	1,5 kg/ha

2.2. A vizsgált almafajták

A vizsgálatba vont almafajták a Prima, a Florina, az Idared és a Golden voltak (1. ábra).

A Prima (1. ábra) kora őszi varasodásrezisztens almafajta, amelyet a *Malus floribunda* felhasználásával nemesítettek az USA-ban az 1970-es években. Gyümölcse középnagy, kúposan gömbölyded alakú, héjának alapszíne zöldessárga, fedőszíne piros. Húsa közepesen szilárd, mérsékeltén savas. Érési ideje augusztus vége, szeptember eleje. Tárolni hosszú ideig nem lehet, hűtőtárolóban is egy hónap. Fája közepesen erős, erős növekedési erélyű, és gyorsan termőre fordul. A fajta termőképessége jó, de túlkötődésre hajlamos. Varasodásrezisztens fajta és ellenálló-képessége a lisztharmattal szemben is jó, viszont a keserűfoltosságra érzékeny [7].

A Florina fajtát (1. ábra) Franciaországban állították elő az 1970-es években, a *Malus floribunda* Vf génjét tartalmazó, varasodásrezisztens fajta. A Prima fajta után kb. 1 hónappal, szeptember végén szedhető. Középnagy gyümölcse erősen hamvas, bíborpiros fedőszín borítja. Szilárd húsú, édeskés ízű. Terméshozása általában egyenletesebb, mint a Primáé. Lisztharmatra közepesen fogékony, téli almafajta [7].

Az Idared fajta (1. ábra) a Jonathan és a Wagener keresztezéséből származó amerikai fajta. Szeptember végén, október elején érik, nagy – igen nagy – gyümölcsű, lapított. Világossárga alapszínű és világospiros fedőszíne van. Fehéres húsú, savas ízű, és nagyon jól tárolható. Tárolási betegségekre nem fogékony, viszont mind lisztharmatra, mind varasodásra érzékeny. Fája nagy koronát nevel, amint termőre fordul, rendszeresen terem. Termőképessége nagy, viszont alternanciára hajlamos [7].

A Golden Delicious (1. ábra) az USA-ból származik az 1800-as évekből. Szeptember végén, október elején éri el az érettségét. Közepesen nagy gyümölcsű, éretten aransárga alapszínű gyümölcs. Édes, savtartalma alacsony, jól tárolható, héja perzselésre vagy varasodásra hajlamos. Jól termékenyül. Ventúriás varasodásra fogékony [7].

2.3. A vizsgálatok módszere

Az almamolyhímek rajzását 2013. és 2014. években április végétől (gyümölcskötés) augusztus végéig vizsgáltuk Csalomon típusú szex-feromon csapdákkal. Az ültetvényben 3 darab egymástól függetlenül elhelyezett csapda került kihelyezésre. A csapdákból a fogott hímek számát 1-3 naponta ellenőriztük. A diszpenzert 4 hetente, a ragacs lapot hetente cseréltük.

A molylárva kártételének felvételezését mindkét évben, augusztus 31-én fajtánként 8-8 fán, 25-25 darab gyümölcsön végeztük.



Prima



Idared



Golden



Florina

1. ábra. A vizsgálatba vont fajták az ültetvényben (Eperjeske, 2014)

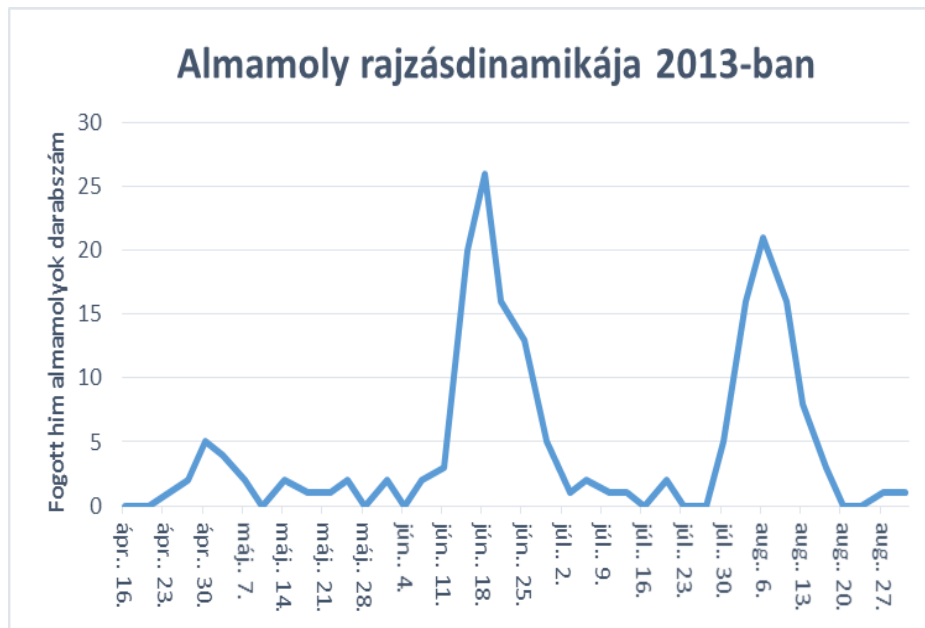
Fotó: Abonyiné Kántor Anita

3. EREDMÉNYEK

3.1. Az almamoly rajzásdinamikája

A vizsgálat első évében a csapdázás során az összesített almamolyhímek száma 162 db volt. A szezonális feltételezés két rajzáscsúcsot mutatott a molyhímek számában. Az első rajzáscsúcsot június második felében tapasztaltuk, a második rajzáscsúcsot pedig augusztus első felében. A második rajzáscsúcs erőteljesebb volt az elsónél (2. ábra).

Kutatómunkánk második évében a csapdázás során az összesített almamolyhímek száma 281 db volt. Ebben az évben a korai kitavasodásnak köszönhetően, és a hirtelen jött felmelegedés miatt a feromoncsapdák már áprilisban nagyszámú egyedeket fogtak. Az első nemzedék rajzáscsúcsa május elejére tehető. Június első felében szintén nagyobb egyedszámot fogtak a csapdák, ekkor volt a második rajzáscsúcs. A molyhímek populációjának harmadik rajzáscsúcsát pedig július első felében mértük. Innentől kezdve folyamatosan foghatók voltak az almamolyhím egyedek kisebb-nagyobb számban (3. ábra). A két vizsgált év eredményeit összevetve megállapítható, hogy 2014-ben egész évben nagyobb nyomás volt az ültetvényen az almamoly tekintetében, mint 2013-ban, ami a kártétel számában is megmutatkozott (3. táblázat).



2. ábra. Az almamoly rajzásdinamikája (Eperjeske, 2013)



3. ábra. Az almamoly rajzásdinamikája (Eperjeske, 2014)

3.2. Az almamoly-kártétel mértéke betakarításkor

A betakarításkor mért almamoly gyümölcskártételének mértékét a 3. táblázatban mutatjuk be. Az almamolylárvák által okozott gyümölcskártétel (4. ábra) 7–12% között változott az egyes fajták esetében. A két vizsgálati év eredményeit összevetve a gyümölcskártétel mértéke 2014-ben erőteljesebb volt, mint 2013-ban, igazolva a jelentősebb számú molycsapdázási adatokat ebben az évben (1. és 2. ábra).

A kártétel mértékében jelentős különbséget a fajták nem mutattak. Az Idared fajtánál tapasztaltuk a legerőteljesebb kártételt mindkét vizsgálati évben (3. táblázat).

3. táblázat. Az almamolykártétel mértéke (%) betakarításkor ökológiai almaültetvényben (Eperjeske)

Fajta	2013	2014
Golden	7	8
Idared	11	12
Prima	8	10
Florina	7	9



4. ábra. Az almamoly által okozott kártétel gyümölcsön (Eperjeske, 2014)

Fotó: Abonyiné Kántor Anita

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A molycsapdázási adatok igazolták, hogy a fogott hímek száma jelentősen több volt, mint az integrált vagy hagyományos termesztésben az irodalomból ismert fogási adatok. A károsított gyümölcsök száma szintén jelentős volt a betakarításkor. Az eredményeink igazolták, hogy a vizsgált ökológiai gazdálkodásban engedélyezett *Bacillus thuringiensis* tartalmú készítmény hatékonysága önmagában alkalmazva nem éri el az integrált és a konvencionális termesztés rovarölő készítményeinek hatékonyságát. A biológiai növényvédelmi lehetőségek közül a *Bacillus thuringiensis* mellett javasoljuk granulovírus-tartalmú készítmény alkalmazását, mely kizárólag az almamolyokat megbetegítő és elpusztító peszticid. Az almamoly elleni védekezésnek egy teljesen szermaradékmentes módja a feromonos légtérletítés. Kielégítő megoldást nyújthat a kártételi küszöb minimalizálására – főleg áruteremő gyümölcsös esetében – mindezek kombinációja, amennyiben az ültetvény nagysága és alakja lehetővé teszi a légtérletítés gazdaságos alkalmazását.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] E. Dickler, Guidelines and labels defining integrated fruit production in European countries. IOBC WPRS BULLETIN, Vol. 13 (8). 76 pp. 1990.
- [2] Babicz Sz., Tarcza T., Az alma biológiai növényvédelme... és ami hozzá tartozik. Biokultúra, XXXIII. évf. 2–3. sz. pp. 31–39. 2022.
- [3] Holb I., A gyümölcsösök és a szőlő ökológiai növényvédelme. Budapest, Mezőgazda Kiadó. 2005.
- [4] Holb I., Heijne, B., Jeger, MJ., The widespread occurrence of overwintered conidial inoculum of *Venturia inaequalis* on shoots and buds in organic and integrated apple orchards across the Netherlands. EUROPEAN JOURNAL OF PLANT PATHOLOGY, 111:157–168. 2005.
- [5] Papp O. (szerk.), Növényvédelem az almatermésűek ökológiai termesztésében. Budapest, Ökológiai Mezőgazdasági Kutatóintézet. 2015.
- [6] Holb I., Scherm H., Quantitative relationships between different injury factors and development of brown rot caused by *Monilinia fructigena* in integrated and organic apple orchards. PHYTOPATHOLOGY, 98:(1) pp. 79–86. 2008.
- [7] Hunyadi M., Ajánlott gyümölcsfajták jegyzéke. Budapest, Magyar Gyümölcsfaiskolák Országos Egyesülete. pp. 142. 2012.

A lisztek sikértartalmának és savfokának minőségi vizsgálatai

Qualitative examination of the gluten content and acidity of flours

Vigh Szabolcs¹

¹ Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, 4400 Nyíregyháza, Kótaji út 9–11., vigh.szabolcs@nye.hu

Összefoglaló: A gabonafélék élelmiszeripari jelentősége világszerte kiemelkedő fontosságú, az összes energia-, valamint fehérjebevitelünk közel 50%-át ezekből fedezzük. A búzaőrleményeket (liszteket) szigorú előírások betartása mellett tárolt és megfelelően előkészített búzából állítják elő. A lisztek különböző minőségi jellemzői együttesen határozzák meg a belőlük készült sütőipari késztermékek fogyasztói megítélését. Vizsgálataink a búzalisztminták nedvessikér-tartalmára és sikerterületénységére, továbbá a savfok meghatározására irányultak.

Kulcsszavak: liszt, siker, savfok, minőség

Abstract: The importance of cereals in the food industry is of outstanding importance worldwide, accounting for almost 50% of our total energy and protein intake. Wheat flour is made from wheat stored and properly prepared to strict standards. The different quality characteristics of the flours together determine the consumer perception of the finished bakery products made from them. Our laboratory tests were aimed at determining the wet bran content and bran expansion, as well as the acidity of the wheat flour samples.

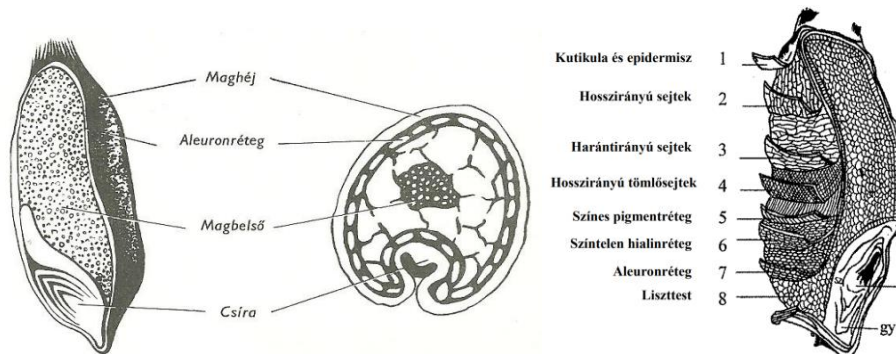
Keywords: flour, gluten, acidity, quality

1. BEVEZETÉS

A búza (*Triticum aestivum* L.) a legrégebbi kultúrnövényeink egyike, melyet már közel 12 ezer évvel ezelőtt elkezdtek termesztani. Jelenleg a mérsékelt éghajlati öv mintegy 100 országában termesztett szántóföldi növény. A búza a szemtermésében lévő fehérjetartalmának köszönhetően, elsősorban a humántáplálkozásban élelmezési szempontból lett a világon a legnagyobb területen termesztett kultúrnövényünk [1]. Az összes energiabevitelünk 50%-át, míg az összes fehérjebevitelünk 45%-át gabonafélékből fedezzük.

1.1. A búzaszem szerkezete, kémiai összetétele

A gabonaszem részei a héj, a héj alatti rész (aleuronréteg), a magbelső és a csíra (1. ábra). A héj a rostok fő előfordulási helye, cellulózból áll, ezenkívül foszfort, káliumot, magnéziumot, kalciumot tartalmaz, valamint B₁-vitamin is megtalálható benne. Az aleuronréteg értékes fehérje- és magas ásványianyag-tartalommal rendelkezik. Feldolgozáskor általában a héjjal együtt eltávolítják. A magbelső 50–75%-ban ún. liszttestkeményítőt tartalmaz. A keményítő egy poliszacharid, mely számos glükózmonomerből áll. A keményítő két fő molekulája az amilóz (lineáris glükóz egység) és az amilopektin (elágazóan elrendezett glükóz egység) [2]. Ezenkívül az úgynevezett sikerképző fehérjék találhatóak benne, gliadin és glutenin, amelyek vízben nem oldódnak, de képesek megduzzadni, és egy összefüggő sikervázat alkotni, ami a tészták, kenyerek rugalmas vázát adja. A búzának a legjobb a sikértulajdonsága. A magbelső vízben oldódó fehérjéket is tartalmaz.



1. ábra. A gabonaszem és a búzaszem szerkezete [7]

A gabonafélék csoportjából az őszi búza rendelkezik a legmagasabb fehérjetartalommal. A csíra főleg fehérjéből áll, de a zsír és a cukor is itt található meg legnagyobb mennyiségben, továbbá gazdag enzimekben és vitaminokban is. A kenyérgabonák zsírtartalma alacsony (2%), míg a zab 7% zsírt tartalmaz, a kukoricacsíra viszont 9%-ot (1. táblázat) [3] [4] [5] [6] [7].

1. táblázat. A búzaszem kémiai összetétele [8]

	arány%	fehérje	keményítő	szénhidrát	cellulóz	pentozán	zsír	hamu
		szárazanyag %-ában						
teljes szem	100	16,1	63,1	4,3	2,8	8,1	2,2	2,2
endospermium	81,6	13	78,8	3,5	0,2	2,7	0,7	0,5
csíra	3,3	37,6		26,1	2,5	9,7	16	5,3
héj + aleuron	15,1	28,8		4,1	16,2	33,6	7,7	10,5

1.2. A búza főbb minőségi paraméterei

Hazánkban a jelenleg érvényben lévő MSZ 6383:2012 búzaszabvány foglalja magába a hazai követelményeket a búzalisztek minőségi csoportjainak tekintetében. Élelmiszeripari szempontból a búza megfelelő minősége azon alapul, hogy a kenyérsütés és egyéb sütőipari termékek esetén milyen igényeket kell kielégíteni mind a gyártó, mind pedig a fogyasztó számára. Egy kenyér akkor tekinthető jó minőségűnek, ha a liszt jó vízfelvívő képességgel rendelkezik, minél nagyobb térsza dagasztható, a térsza rugalmas és jól nyújtható, a kelés közben keletkező gázok kellőképpen fellazítják a tésztát, ami által a kenyér térfogata nagy, a bélzet szerkezete pedig szivacsos lesz. A búzáknak minőségének meghatározására különböző fizikai és kémiai vizsgálatok alkalmasak (2. táblázat) [9] [10].

Az acélosság meghatározása során 100 db búzaszem kettévágásával, a vágási felület segítségével az acélos és a lisztes szemek arányát állapítják meg. Az acélos szemekről elmondható, hogy nagyobb fehérje- és sikértartalommal rendelkeznek.

Az esésszám a búzaszem szemmel nem látható, de a már megkezdődött csírázásáról és a csírázással párhuzamosan a magban végbemenő biokémiai folyamatokról ad tájékoztatást. A Hagberg-féle esésszám-meghatározó készülék egy speciális merülő viszkoziméter, amely meghatározott hőmérsékleten és időintervallum alatt elcsirizésített liszt-víz keverékben méri meg az ejtőtest süllyedésének időtartamát másodpercben kifejezve. Alacsony vagy magas esésszámmal rendelkező lisztből egyaránt nem lehet jó minőségű kenyeret sütni [11].

A farinográfus érték (sütőipari érték) meghatározására alkalmas műszer a Hankóczy-féle farinográf vagy valorigráf. A készülék egyidejűleg alkalmas a lisztből gyúrt térsza kialakulási idejének, a siker minőségének és a siker ellágyulásának meghatározására. A készülék dagasztócsészéjében liszt és víz hozzáadásával tésztát kezdenek dagasztani, eközben megméri, hogy 50 g liszt mennyi vizet képes felvenni a dagasztás során az 500-as konzisztenciájú (keménységű) térsza kialakulásáig. A farinográf egy diagramot rajzol, amelynek segítségével a térsza vízfelvívő képessége és a dagasztási tulajdonságai leolvashatók. E minőségi értékszám egy táblázatból meghatározható, amely alapján a búzákat A1–A2 javító, B1–B2 malmi, valamint C1–C2 takarmánybúzáknak értékcsoportokba lehet besorolni.

A hamutartalom, hamualkotók meghatározásakor a megdarált lisztmintákat egy izzítókemencében hamvasztják, melynek során a szerves anyagok néhány óra alatt elégnak. A megmaradt hamanyagok mennyisége százalékos formában kifejezhető.

A hektolitertömeg száz liter mennyiségű gabona tömegével egyenértékű, melynek értékéből következtetni lehet a búzából kinyerhető liszt mennyiségére. A nagyobb hektolitertömeg általában jobb minőséget jelent. A hektolitertömeg értékét egyaránt befolyásolja többek között a búzaszemek sűrűsége, a nedvességtartalma, a szemnagysága, a szemek alakja, teltsége, a szemek kiegyenlítetttsége és a héj simasága [12].

A keverékesség megállapítása során a búzából ki kell választani minden idegen anyagot, amelyik nem fajazonos, nem egészséges, vagy éppen károsan befolyásolhatja a búza malomipari felhasználását. A meghatározás során meg kell mérni az összes és az idegen alkotórészek tömegét. Az őszi búzát 14,5% szemnedvesség-tartalom mellett lehet betárolni, a betakarítás utáni átvételi ár is a 14,5%-os nedvességtartalomra vonatkozik. A nedvességtartalom meghatározása automata nedvességmérő készülékkel vagy szárítószekrényben tömegállandóságig szárítva, gravimetriás módszerrel lehetséges [13].

A nedves siker mennyiségének meghatározása során lisztből vízzel tésztát gyúrnak, majd vízszög alatt a vízdoldható anyagokat kimossák. A visszamaradt, vízben nem oldható alkotórészt, vagyis a nedves siker mennyiségét százalékban határozzák meg. A siker mennyisége a búzafajták egyik legfontosabb minőségi mutatója. A 34%-nál nagyobb sikerértartalmú lisztből javító minőségű liszt nyerhető, ami alkalmas a gyengébb minőségű lisztek feljavítására. A siker mennyisége mellett nagyon lényeges a siker területenységére vonatkozó információ is [14].

A nyersfehérje koncentrációjának (aminosav-összetétel) vizsgálatokor nedves roncsolással meghatározzák az egyes minták nitrogéntartalmát, ami 5,7-del szorozva megadja a búza nyersfehérje-tartalmát [6].

2. táblázat. A búza részletes minőségi követelményei Magyarországon MSZ 6383:2012 [9]

Minőségi jellemzők	Közönséges búza				Durum búza	
	Javító búza	Malmi búza			I.	II.
		I.	II.	III.		
Hektolitertömeg, legalább, kg/hl	78	76	76	72	78	75
Nedvességtartalom, legfeljebb, % (m/m)	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
Keveréktartalom, legfeljebb, % (m/m)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
ezen belül:						
- káros keverék, legfeljebb, % (m/m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
- könnyű keverék, legfeljebb, % (m/m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Keveréktartalom felül még megengedett:						
- törött szem, legfeljebb, % (m/m)	2,0	2,0	2,0	6,0	2,0	2,0
- csírázott szem, legfeljebb, % (m/m)	2,0	2,0	2,0	5,0	2,0	2,0
- rozs, legfeljebb, % (m/m)	2,0	2,0	2,0	3,0	-	-
- csökkent értékű búzaszem, legfeljebb, % (m/m)	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0
- elszíneződött felületű szem, legfeljebb, % (m/m)	-	-	-	-	3,0	8,0
- poloska által szűrt szem, legfeljebb, db %	-	2	2	4	2	2
- közönséges búzaszem, legfeljebb, % (m/m)	-	-	-	-	4,0	10
Acélos búzaszem, legalább, % (m/m)	-	-	-	-	60	30
Sütőipari érték, legalább * , minőségi csoport	A	B ₁	B ₂	-	-	-
A nedves siker mennyisége, legalább, % (m/m)	34	30	28	26	32	30
A nedves siker területe, mm/óra	2-5	3-8	3-8	-	2-5	2-5
Esésszám, legalább, másodperc	300	250	230	220	300	250
Nyersfehérje-tartalom, legalább, % (m/m)	12,5	12,5	12,0	11,5	12,5	12,0
Szedimentációs érték, Zeleny szerint, legalább, ml	35	35	30	20	-	-
Sárga pigment tartalom **, legalább, mg/kg	-	-	-	-	5,0	3,5
Állati kártevők és maradványaik	Nem tartalmazhat					

1.3. A kenyérgyártás

A nyersanyagok előkészítését követően a tésztaalakítás történhet közvetlen vagy közvetett úton. Az előbbi esetben minden nyersanyagot összekevernek, míg a közvetett technológiánál kovászt készítenek, amit érlelnek, majd összedolgoznak a maradék anyagokkal. A kovászkészítés során az élesztőgombák elszaporodnak (CO₂-t termelnek), kifejtik erjesztő tevékenységüket, savtermelés történik, a fehérjék duzzadása javul. A kelesztés során (32-35 °C) a tészta térfogata megnő, és létrejön az alaktartó, gázvisszatartó tágulékony sikérszerkezet. A formázás és az utókelesztés után, a sütés során (260-280 °C) először magasabb hőmérsékleten kialakul a héj (100-180°C-on), majd alacsonyabb hőmérsékleten átsül a kenyér (50-100°C). A kenyér hűtésének végén a héj 16%, a bél 45% víztartalommal rendelkezik [3] [9].

A laboratóriumi lisztvizsgálatokhoz (sikermennyiség, sikerterületkenység, savfok), valamint a kenyerek érzékszervi bírálatához (alak, héj, bélzet, szag, íz) a megvásárolt 13 liszt-, illetve 18 kenyérminta tetszőlegesen kiválasztott boltokból került beszerzésre.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. Sikérvizsgálat

A lisztből csapvízzel egy jól homogenizált tésztát készítünk, melyből a keményítő kimosásával megkapott nedves sikért elkülönítjük, és meghatározzuk a tömegét, ami a siker tényleges mennyiségét adja. A nedves siker 5 grammjából formált golyó átmérőjének 1 óra alatt bekövetkező változását megmérve kapjuk meg a siker területkenységét.

2.1.1. Sikértartalom

A nedves siker mennyiségének (S%) meghatározásához a lisztből 24 g-ot dörzsmozsárba kimérünk, és 12 ml csapvízzel tésztát gyúrunk a törő segítségével. A kellőképpen homogenizált tésztát gömbformára alakítjuk, Petri-csészébe helyezük. A tésztagolyó felülete bőrsődésének, kiszáradásának elkerülése érdekében a tésztát egy főzőpohár aljába helyezett nedves papírral lefedjük. Az így lefedett tésztát 30 percig szobahőmérsékleten pihentetjük, ez idő alatt a sikerképző fehérjék vizet kötnek meg, megduzzadnak, és kialakul a siker. Az inkubációs idő letelte után a tésztából 30 g-ot kimérünk, és a tenyerünkbe téve, ujjunkkal nyomkodva egy szita felett kb. 20 °C-os csapvízzel, enyhe vízszög alatt elvégezzük a siker mosását, ügyelve arra, hogy a tészta egyben maradjon. A mosást mindaddig folytatjuk, amíg a lecsurgó

víz egy kálium-jodidos jódoldattal ellenőrizve nem mutat kék elszíneződést, vagyis mindaddig, amíg a mintánk keményítőmentes nem lesz. A következő lépésben a kimosott sikérből a vízfelesleget úgy távolítjuk el, hogy a sikért a tenyerünkbe téve addig nyomkodjuk, amíg a siker elkezd a tenyerünkhöz tapadni. A tenyerünkre tapadt nedvességet egy száraz törlővel folyamatosan letöröljük. Ezt mindaddig folytatjuk, amíg a siker elkezd ragadni a tenyerünkhöz, majd lemérjük a tömegét (M), és 5-tel szorozva megkapjuk a nedves sikértartalmat százalékos formában. A vizsgálatot három párhuzamos méréssel végeztük.

A sikértartalom számítása (1):

$$S\% \left(\frac{m}{m} \right) = 5M \quad (1)$$

2.1.2. Sikérterületkenység

A sikérterületkenység (ST) vizsgálatához a nedves sikértartalom meghatározásához elkészített nedves sikérből 5 g-ot kimérünk, melyből egy szabályos gömb formát alakítunk ki. Az így kapott sikérgolyót egy Petri-csészébe téve milliméterpapírra helyezük, és két egymásra merőleges irányban meghatározzuk a sikérgolyó átmérőjét (d_1 ; d_2). Ezután a sikért egy főzőpohár aljába helyezett nedves papírral lefedjük, és 1 órán át szobahőmérsékleten állni hagyjuk. Az inkubációs idő letelte után újból megmérjük a sikérgolyó két egymásra merőleges átmérőjét (D_1 ; D_2). A vizsgálatot három párhuzamos méréssel végeztük.

A sikérterületkenység számítása (2):

$$ST = \frac{(D_1 + D_2)}{2} - \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (2)$$

2.2. Savfok-meghatározás

A lisztminták vizes szuszpenziójában titrálható savtartalmat egy lúgos oldattal lekötjük. A titrálás végpontját fenolftalein indikátorral jelezzük. A savfok (SF) értéke 10 g liszt desztillált vizes szuszpenziójának közömbösítéséhez elhasznált 0,1 mol/dm³ koncentrációjú NaOH-mérőoldat cm³-einek számával (A) egyenértékű. A savfok meghatározása során egy főzőpohárba kimérünk 10 g vizsgálandó lisztmintát, melyhez 90 cm³ desztillált vizet adva egy üvegbot segítségével csomómentes szuszpenziót készítünk. A szuszpenziókhoz 5-5 csepp fenolftalein indikátort adunk, homogenizáljuk, majd egy bürettában jelre töltött mérőoldat segítségével elvégezzük a titrálást. A titrálás végpontját a 30 másodpercig kevergetés nélkül megmaradó halvány rózsaszínű elszíneződés jelzi. A vizsgálatot három párhuzamos méréssel végeztük.

A savfok számítása (3):

$$SF = Af, \text{ ahol az „f” a mérőoldat faktora} \quad (3)$$

2.3. A kenyér érzékszervi bírálata

A sütőipari termékek (pl. kenyér) érzékszervi tulajdonságainak bírálata során pontozásos módszerrel értékeljük a termék térfogatát, alakját, a héj színét és illatát, melyet az íz és a bélzet tulajdonságainak véleményezése követ. A végső pontszámot a súlyozott összes pontszám adja, melynek az értéke maximálisan 20 lehet. Az egyes tulajdonságokra maximálisan 5 pont adható, a pontszámokat az úgynevezett súlyozó faktorról szorozzuk. A kifogásolható termékek esetében 1 vagy 0 pontig csökkentett pontszám adható. A súlyozó faktor egy olyan szorzószám, amely 1 körüli szokott lenni. Amennyiben a vizsgált tulajdonság a termék esetében kisebb jelentőséggel bír, akkor egy alatt van, ha fontosabb, akkor egy vagy egynél kicsivel nagyobb. A kenyér érzékszervi vizsgálatánál az alábbi súlyozó faktorszám (sf) a használatos: Az alak és a héj tulajdonságoknál 0,6, a bélzetnél 1,4, a szag esetében 0,4, míg az íz tulajdonságainál 1,0 a faktorszám [15].

3. EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A lisztek technológiai szempontból fontos tulajdonságai közül az egyik legfontosabb a siker jellemzői. A búzalisztben átlagosan 11-13% fehérje van, ami a keményítővel együtt adja a búzaszem minőségét. A sikért alkotó fehérjék átlagos összetétele 75% gliadin és 25% glutenin. Ha sok a gliadin, akkor a siker lágy, ha nő a glutenin mennyisége, akkor pedig túl kemény. A siker olyan sárgás színű, gyöngyházfényű, gumyszerű anyag, amely a búzalisztből készült tésztát rugalmassá, nyújthatóvá, valamint a kelesztéskor ellenállóvá teszi a keletkező gázok feszítő hatásával szemben. Minősítés szempontjából a liszt nedvessikér-tartalmának (S%) BL55 liszt esetén legalább 27%-nak, BL80 és BL112 lisztnél 28%-nak kell lennie. Jó sikerűnek tekinthető a liszt, ha ez az érték (S%) 30–34% közé esik. A vizsgálatok során megállapítást nyert, hogy a S% tekintetében a Miskolci (30,5-33,5), a Penny (31), a Lidl (33), a Privát (31) és a Tesco (31,5) márkájú BL55 lisztek kiemelkedő minőséggel bírnak (3. táblázat).

A siker területkenységének (ST) meghatározásánál tudnunk kell, hogy a 4-6 mm területkenységű lisztből kaphatunk rugalmas és jól nyújtható tésztát, valamint nagy térfogatú készterméket. Ha ez az érték kisebb, mint 4 mm, akkor a siker szívósnak tekinthető, és általában túl domború lesz a termék. Az ilyen tésztáknál hosszabb érlelési idővel kell számolni. Amennyiben a területkenység mértéke meghaladná a 8 mm-t, akkor a siker területkenyennek tekinthető, lapos és kis térfogatú terméket kapunk. Ilyenkor rövidebb érési és kelési idejű tésztát készíthetünk. A fentiek ismeretében a legjobb ST (mm)

értékkel a Miskolci (5,5), a Hajdú (5), a BL55-ös Morzsi (4), valamint a BL80-as Putnoki (5) liszt tekinthető a legalkalmasabbnak nagyobb térfogatú kenyér, illetve többféle késztermék készítésére (3. táblázat).

A savfok (SF) leginkább a szabad zsírsavak mértékének függvénye, amelyeket a lipáz enzim szabadítja fel a zsírokból. Ha a lisztet hosszabb időn át meleg, nedves helyen tárolják, akkor nagyobb ütemben emelkedhet a zsírsavak koncentrációja, ami gátolhatja a keményítőt bontó enzimek tevékenységét. Minősítés szempontjából a megengedett maximumsavfok BL55 lisztnél 2,5, BL80-asnál 3,0, BL112-nél 3,5, míg például a GL200-asnál 5,0. Savfok tekintetében a Miskolci liszt (SF=2,4) bizonyult a legjobbnak. A többi lisztminta esetében a határértéknél magasabb SF-értékek valószínűleg annak tudhatóak be, hogy nem bontatlan csomagolású termékek kerültek bevizsgálásra, ez alátámasztja a megfelelő körülmények (hőmérséklet, levegő) között való tárolás fontosságát (3. táblázat).

3. táblázat. Lisztminták sikermennyisége, sikerterülekenysége, savfoka (n=3)

Lisztfajta	Lisztfajta	Átlag S%	Átlag ST (mm)	Átlag SF
BL55	Miskolci	33,5	5,5	2,4
BL55	Penny	31	0,3	3,5
BL55	Kunsági	27	0,8	3,7
BL55	AboMill	29,5	3	3,4
BL55	Lidl	33	3	3,7
BL55	Privát	31	1,5	3,7
BL55	Tesco	31,5	0,6	3,4
BL55	Morzsi	27	4	3,2
BL55	Hajdú	28	5	3,5
CH-csökkentett	Dia Wellness	27	0	6,4
BL112	Morzsi	n.a.	n.a.	3,9
BL Graham	Morzsi	26,5	1,5	1,6
BL80	Putnoki	28,5	5	3,7

4. táblázat. Kenyérminták érzékszervi bírálata

Kenyér	Alak (0,6)	Héj (0,6)	Bélzet (1,4)	Szag (0,4)	Íz (1)	Összpontszám
Lauder BL 55	5	5	5	5	5	20
Penny félbarna	5	5	5	5	5	20
BL55	5	5	5	5	5	20
Nyírmadai fehér	5	5	5	5	5	20
Tesco félbarna	5	4	5	5	4	18,4
Baktai BL80	5	5	5	5	5	20
Kisvárdai BL55	5	5	4	4	5	16,6
Lidl félbarna	5	5	5	5	5	20
Házi BL55	5	4	5	4	5	19
Kemecsei BL55	4	4	5	3	4	17
Baktai BL55	5	5	5	5	5	20
Félbarna	3	4	4	5	4	15,8
Coop félbarna	4	4	4	5	5	17,4
Vitajó barna cipó	5	4	5	3	5	18,6
Durcás	4	4	5	4	4	17,4
Coop fehér	5	4	5	4	4	18
Coop fehér	5	3	4	5	5	17,4
HS-csoport rozs	5	5	5	4	4	18,6

A kenyérminták érzékszervi bírálatánál hét kenyér esetében is a maximális 20 pont került megállapításra, míg a többi kenyér is a minimális határérték feletti (15,8–19). Ha a súlyozott összpontszám nem éri el a 11,2-es értéket, akkor a termék „nem megfelelő” minősítést kapna (4. táblázat).

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A gabonaszem három fő része a héj, mely a rostokat tartalmazza, a magbelső, amelyben a fehérjék, a zsírok és a keményítő található, valamint a csíra, ami ásványi anyagokban és vitaminokban gazdag. A malomipari eljáráskor, az őrlés során leválasztják a héjat (korpa) és eltávolítják a búzacsírat, így a liszt csak a magbelső tartalmazza. A teljes kiőrlésű liszt és a grahاملiszt a teljes gabonaszemet tartalmazza, így ezek tekinthetők az egészségesebb lisztfajtáknak, és egészségesebbek a belőlük készült élelmiszerek is. A búza finomliszt (BL55) tehát nem tartalmazza a búza héjat és a búzacsírat, így sokkal kevesebb a vitamin-, az ásványianyag- és a rosttartalma a teljes kiőrlésű vagy a grahاملiszthez képest. A búzaliszt feldolgozhatóságának egyik legfontosabb jellemzője a sikértartalom és annak minősége. Minél nagyobb a liszt sikértartalma, és minél jobb minőségű a benne található siker, annál több CO₂-gázt képes magában tartani a tészta. Nagy térfogatú, laza bélzetű kenyeret és könnyű, foszlós kelt tésztát vagy jól nyújtható rétestésztát csak magas sikértartalmú lisztből képes készíteni egy sütőipari vállalkozás, ahol kritikus kérdés a folyamatos jó minőségű termékek előállítás.

A kenyereket a felhasznált lisztek típusa alapján csoportosíthatjuk. Eképpen megkülönböztetünk búzakenyereket, rozskenyereket, tartós és különleges kenyereket. A búzakenyerek korpatartalmukban és adalékanyagaikban különböznek. A fehér kenyerek csak búzalisztból készülnek, míg a félbarna kenyerek rozslisztet is tartalmaznak. A friss kenyér héja ropogós, sárgásbarna, a bélszerkezet lágy, rugalmas szerkezetű. A teljes kiőrlésű lisztből készült kenyerek több héjrész tartalmaznak, magasabb a korpatartalmuk, ezért funkcionálisan értékesebbek, mivel nagyobb a rost-, az ásványianyag- és a B-vitamin-koncentráció bennük. Héjuk sötétbarna, a bélszerkezet barnás színű. A rozs fehérjéi nem képesek sikert kialakítani, ezért önmagában rozslisztből nem készítenek kenyeret, csak búzaliszttel keverve. A rozskenyér min. 50% rozslisztet tartalmaz, a rozsos kenyér pedig 30–50%-ot. A rozsliszttel készült kenyerek bélszerkezete tömöttebb, héja sima, nem cserepes és barna színű. A kenyerek érzékszervi bírálati során kapott eredmények alapján általánosságban elmondható, hogy a kereskedelmi forgalomban kapható kenyerek széles körben kielégítik a vásárlói igényeket.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] P. Pepó és M. Sárvári, Gabonanövények termesztése, 2011.
- [2] Z. Šramková, E. Gregová és E. Šturdíka, Chemical composition and nutritional quality of wheat grain, *Acta Chimica Slovaca*, Vol.2, No.1, pp. 115–138, 2009.
- [3] M. Figler, Élelmiszer-tudományi ismeretek, Medicina Könyvkiadó Zrt. Budapest, 2015.
- [4] T. Kismányoky, Versenyképes búzatermesztés, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2013.
- [5] I. Láng, A minőség dimenziói az agrárgazdaságban. *Agro-21 füzetek*, 14 pp. 3–7, 1997.
- [6] R. Lásztity, Gabonafehérjék, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 1981.
- [7] Á. Barancsi, „Kenyerék, kalácsok, kemencék – mesterek, receptek, csemegék” – sütőipari hagyományaink felélesztésének mintaprogramja
- [8] G. Láng, Szántóföldi növénytermesztés Mezőgazdasági kiadó, Budapest, 1976.
- [9] E. Lakatos, Élelmiszeripari technológiák I., Palatia Nyomda és Kiadó Kft., 2013.
- [10] Magyar élelmiszerkönyv, Codex Alimentarius Hungaricus, 2-201 számú irányelv, Malomipari termékek
- [11] F. Kajdi, A búza minősége és annak vizsgálata, Agronapló, 2011.
- [12] S. Magda és S. Marsalek, Élelmiszeripar, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 2000.
- [13] Z. Györy és M. I. Györiné, A búza minősége és minősítése, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 1998.
- [14] S. Tömösközi, Jó úton haladunk? Mennyiséget vagy minőséget termelünk búzából? Tegyük rendbe a fogalmakat. *Agronapló*, 2014/07. pp. 73–81, 2014.
- [15] S. J. Komárominé, Laboratóriumi alapgyakorlatok, Nemzeti Szakképzési Intézet, Budapest, 2005.

ENERGETIKA SEKCIÓ

Napelemek állapotfelmérése és károsodásvizsgálata

Condition and Damage Assessment of Solar Modules

Bodnár István

Miskolci Egyetem, 3515 Miskolc-Egyetemváros, vegybod@uni-miskolc.hu

Összefoglaló: *A napelemes erőművek magyarországi kapacitása az utóbbi évtizedben exponenciális jellegű növekedést mutatott. Jelenleg 3000 MW teljesítménnyel a legnagyobb kapacitású erőműnek számít. Azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a napelem a félvezető voltából adódóan öregszik, üzemi körülmények során károsodik és tönkremegy. Ez a folyamat már 5–10 éves időtávban is jelentős problémát vet fel az erőművek működésében, ezért szükségessé vált diagnosztikájuk. Tanulmányomban a napelemek állapotfelméréseinek és a károsodások feltárásának módszereit mutatom be kiemelten a termovíziós állapotfeltérképezéssel.*

Kulcsszavak: *napelem, állapotfelmérés, diagnosztika, termovízió, elektrolumineszcencia, napelemes erőmű*

Abstract: *The capacity of solar power plants in Hungary has grown exponentially in the last decade. It is currently the largest power plant with a capacity of 3,000 MW. However, it should not be overlooked that the solar cell will age, damage and break under operating conditions due to its semiconductor nature. This process poses a significant problem in the operation of power plants for a period of 5–10 years, so their diagnostics has become necessary. In my study, I present the methods of surveying the condition of solar cells and exploring the damage with the help of thermalising condition mapping.*

Keywords: *solar cell and panel, condition assessment, diagnostics, thermalise, electroluminescence, photovoltaic power plant*

1. BEVEZETÉS

A hazai napelemes erőművek beépített kapacitásának növekedése az elmúlt évtizedben exponenciális jelleget mutatott. Míg 2010-ben mindösszesen csak 2 MW, 2018-ban már 660 MW volt a napelemes erőművek összkapacitása. Ez az érték 2020 végére meghaladta a 2200 MW-ot, 2022 első negyedében pedig már át is lépte a 3000 MW teljesítményt. A Nemzeti Energiastratégia célkitűzései között szerepel, hogy 2030-ig további 4000–6000 MW-nyi kapacitásnövekedés várható, így a hazai napelemes rendszerek összkapacitása elérheti a 7000–9000 MW-ot. Azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a napelemek igen szélsőséges időjárási körülmények között üzemelnek, amelyek így nagyban befolyásolják a hatásfokukat és az élettartamukat. Ilyen tényező a megvilágítás intenzitása és spektrális összetétele, a környezet és a napelem felületi hőmérséklete, a légkör és a napelem felületi szennyezettségének mértéke, valamint a természetes és indukált öregedés. Minden felsorolt tényező a napelem hatékonyságát közvetlenül befolyásolja, rendszerint rontja. A megvilágítás spektruma jellemző időtávlatban nem változik, az intenzitása pedig a Nap járásától függően Gauss-eloszlást mutat fixen telepített rendszerek esetében. A napelem hőmérséklete a napelem félvezető volta miatt jelentős mértékben befolyásolja annak élettartam-csökkenését. A felületi szennyeződések hatása kettős, egyrészt az árnyékhatás révén a szennyezett cella belső ellenállását növeli, amely a rajta átfolyó áram hatására többlet Joule-hőt termel, másrészt a szennyezőanyag hővezető réteggént is viselkedhet, így tovább növelve a cella hőmérsékletét. A legmeghatározóbb élettartamot befolyásoló, csökkentő tényező a hőmérséklet. Minél nagyobb a napelem hőmérséklete, annál intenzívebb a cellaöregedés. A túlhevült napelemek kristályszerkezete megváltozik, amely így élettartam-csökkentő hatást is gyakorol. Tartósan nagyobb hőmérsékleten üzemelő cella esetében a kiegészítő, azaz azonnali tönkremenettel is számolni kell. Mindezek mellett nem szabad figyelmen kívül hagyni mindezeknek a villamos paraméterekre gyakorolt hatását sem. A napelem panelen belüli hőmérséklet-különbségei megváltoztathatják a panel karakterisztikáit is, így a villamos hálózatra nézve az inverteren keresztül további hálózati visszahatásokat okoznak.

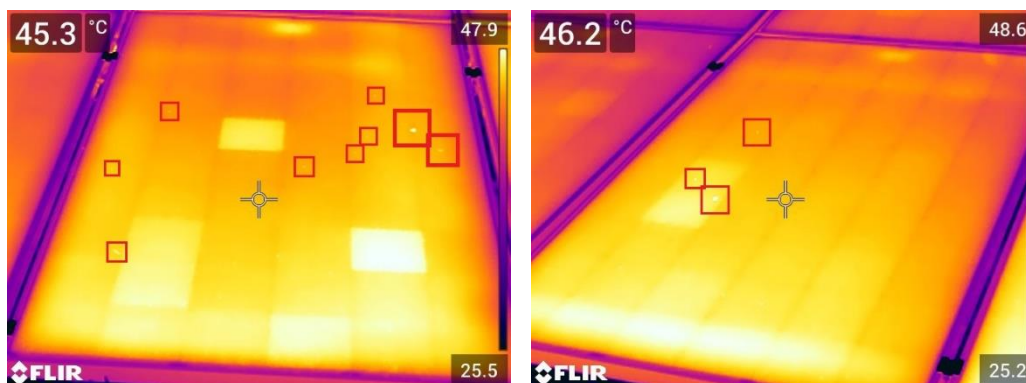
A napelemek hatékonyságcsökkenése és károsodása már 5–10 éves időtávlatban is kimutatható. Az állapotfelmérésre számos módszer terjedt el az „in-situ” és az „ex-situ” módszereket ideértve [1] [2] [3]. A napelemek úgynevezett „in-situ”, azaz helyben történő, megbontás és beavatkozás nélküli állapotfelméréseinek egyik lehetséges módszere a hőkamerás felvételekkel történő hibaazonosítás. A Flash-teszt a napelemek állapotfelméréseinek egyik „ex-situ” módszere. Lényege, hogy villamos mérések útján határozzuk meg egy napszimulátor segítségével megvilágított napelem villamos paramétereit. A mérés során a napelem aktuális feszültségének, áramerősségének és teljesítményének meghatározása mellett felvázolásra kerül az U-I karakterisztika is. Flash-teszt során a napelemet egy fekete dobozban helyezik el, ahol rendszerint egy LED-Halogén reflektorokból kialakított napszimulátorral világítják meg. Egy másik „ex-situ” módszer az elektrolumineszcencia-vizsgálat. Az elektrolumineszcencia-vizsgálat során a napelemeket nem termelőként, hanem fogyasztóként kötjük be egy egyenfeszültségű hálózatra. A napelemben áthajtott egyenfeszültség hatására a napelem fényt/hőt sugároz ki. Ezt a kibocsátást kamerával detektálni lehet, és az így elkészített felvételeken jól

elkülöníthetővé válnak a napelemezben lévő hibák. A vizsgálat során monokróm képet kapunk, amelyen a fekete foltok jelentik a hibás pontokat [3] [4] [5] [6] [7] [8].

2. A NAPELEMEK ÁLLAPOTFELMÉRÉSE HŐKAMERÁVAL

Kutatómunkám során egy üzemelő napelemez erőmű napelemeinek állapotfelmérésével foglalkoztam. Első körben hőkamerás felvételek készültek az esetlegesen sérült napelemek beazonosítása céljából. Az elv azon alapul, hogy a felületi sérülések, árnyékhatások és kiégések okozta tönkremeneteli pontokon, zónákban a napelem érintkezési, átmeneti vagy állandósult ellenállása nagyobb, mint az ép celláké, pontoké, felületeké. A nagyobb ellenálláson az átfolyó áramok hatására felszabaduló Joule-hő tovább melegíti a hibás (sérült vagy szennyezett) cellákat, így a napelempanelen jól elkülöníthetők az egyes hibaforrások. A gyártási hibák rendszerint mikrorepedésekként jelentkeznek, amelyek a forrasztási helyeken alakulnak ki, és csak a hőhatásövezetben, kis hatótávon okoznak átmeneti ellenállást, így a túlmelegedés is csak lokális, azaz egy cellán belül is változó a hőmérséklet-eloszlás. Az árnyékhatás rendszerint nagyobb kiterjedésű és egyenletes, így egy cellán belül csak kisebb mértékű hőmérséklet-differenciát okoz. Az árnyékhatás származhat telepítési és üzemeltetési problémákból. Egy napelempanelen belül még teljesen ép (gyári) állapotban is előfordulhat 15 °C hőmérséklet-különbség. Ezt számos tényező befolyásolja, mint például a telepítés jellege, a jellemző széljárás, annak eloszlása. Ennél nagyobb hőmérséklet-különbség csak akkor jöhet létre, ha a panelen belül gyártási, telepítési vagy üzemeltetési hibák miatt károsodott cellák vagy szennyeződéslerakódások találhatók [4] [5] [9] [10] [11].

Az 1. ábrán a piros négyzögekkel jelölt részek apró meleg pontok figyelhetők meg. Külső sérülés hiányában ezek a pontok valószínűleg gyártásból adódnak. A kis méretű repedések idővel nagyobbodhatnak, és ezzel az egész cellát tönkretehetik. A kis forró pontok több problémát is okozhatnak. Egyrészt a melegedés megemeli a felette elhelyezkedő cellák hőmérsékletét, ami feszültségkülönbséget idéz elő a cellákon a többihez képest. Ez megegyező hatás a cella részleges letakarásával, ami teljesítménycsökkenést okoz a kimeneten. Másrészt hosszú távon a cella átlagosan megemelkedett hőmérsékletű működése lassú, fokozatos öregedéshez és meghibásodáshoz vezet, állandó hozamcsökkenéssel. A napelem már kisebb hőmérsékleten is képes delaminálódni, azaz az egyes rétegek egymástól elválhatnak. A nagy hőmérséklet, az anyagban lévő szennyezőanyagokat megolvasztja, ezek diffundálnak, és így egy rövidzárt hoznak létre, amin a nagy áram még nagyobb hőt hoz létre, és így képes megolvasztani a szilíciumot. A megolvadt félvezető képes kilyukasztani a napelem hátsó részét és így tüzet is okozni.

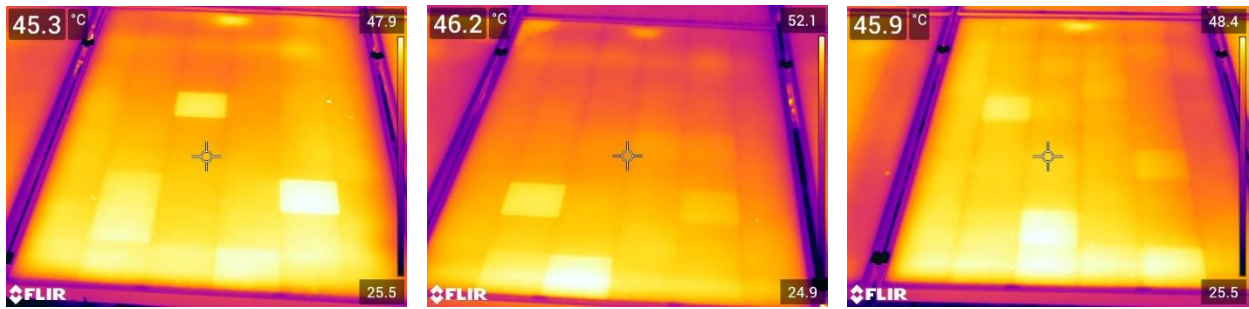


1. ábra. Mikrorepedések okozta melegedések

A 2. ábra három képet mutat, mindegyike külön napelemezről készült, de könnyen észrevehetőek rajtuk a hasonlóságok. Mind a három képen látható, hogy több cella felmelegedett az átlag-panelhőmérséklet felé, és ezek elszórva helyezkednek el. Mivel szabad szemmel külső befolyásoló tényező (pl. szennyeződés) nem észlelhető a paneleken, így arra lehet következtetni, hogy a cellák eltérő paraméterűek a gyártásból adódnak, és emiatt nagyobb mértékű disszipáció lép fel ezeken a cellákon. A panelek átlaghőmérsékletei (45,3 °C / 46,2 °C / 45,9 °C). A legmelegebb pont mind közül (52,1 °C), ez a cella 5,9 °C-kal melegebb a többihez képest. A szórt elhelyezkedés miatt mindegyik cellafűzér teljesítményét befolyásolják a melegedő cellák, ezáltal a modul összteljesítményét is.

A napelemek felületére számos szennyeződés lerakódhat a környezetüktől függően vagy attól függetlenül. A szél például mindenhol olyan tényező, amely számos anyagot szállíthat a levegőben, szállópor, homok stb. Emellett a közvetlen környezet hatása is nagyban befolyásoló lehet. Ilyen szennyeződés lehet a gyártelepek kibocsátása, az építkezések pora, a mezőgazdasági műveletek, a közlekedés hatása stb.

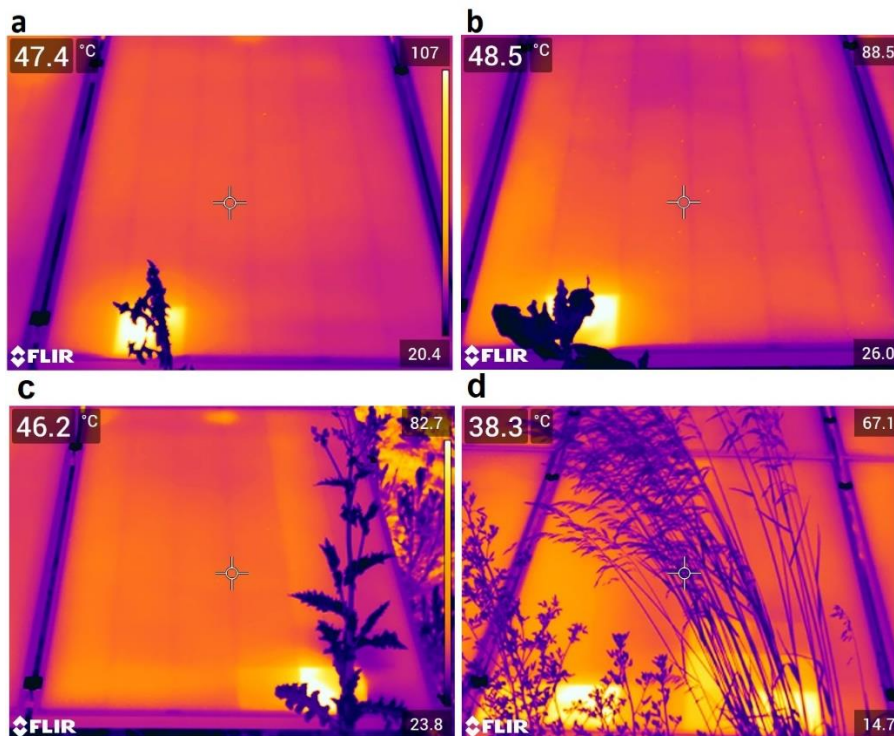
A felületet egységesen betérítő szennyeződések gátolják a sugárzás hasznosulását, és ezáltal redukálják a rendszer hatékonyságát. A felület dőlése miatt az esőzés mossa és lefelé szállítja a lerakódott szennyeződést. Ez foltokat okozhat, amelyek árnyékoló hatással bírnak, és a korábban említett forró pontok keletkezhetnek miattuk. A mosóhatás következtében a panel alsó részén, a keret mentén és a sarkokban koncentrálódhat a teljes felületről érkező szenny, és emiatt a letakarás szintén melegedést okozhat.



2. ábra. Eltérő cellák melegedése

A következőkben olyan eseteket szeretnék ismertetni, amelyek gyakran előfordulnak földfelszíni telepítésű napelemes parkok, rendszerek esetében. Ebben a részben a modulon túl magasodó növényzet árnyékoló hatását fejtém ki, ami a képeken is jól látszik. Az árnyék sokféle lehet a kiterjedtsége, formája, állandósága alapján. Mind más-más hatással van ezek függvényében az energiatermelésre és a napelem hosszú távú károsodására.

A földfelszíni telepítésű rendszereknél fordul elő, hogy az aljnövényzet megnő a napelem aljánál magasabbra, és így árnyékot vet a felületére. A földi telepítés tartószerkezetén általában 2-4 sorban helyezkednek el a modulok. Leggyakrabban az alsó sorban lép fel ez a probléma, de előfordulhatnak olyannyira felmagasodó növények is, amelyek a panelek közül kibújva a felső sorban lévő modulokat is árnyékolják. A 3. ábra felvételein lévő napelemek mind az alsó sorban helyezkednek el. A felületükön egyéb szennyeződés, hiba és eltérő melegedés a vizsgáltakon kívül nem látható. A panelek átlaghőmérséklete közel azonos, (47,4 °C / 48,5 °C / 46,2 °C / 38,3 °C). Az egyik legrosszabb eset, amikor a keletkezett árnyék csak egy cellát takar, mert ekkor itt koncentrálódik az összes többi ép cella energiája hő formájában. Ez három képen látható (a, b, c). A legmagasabb hőmérséklet a képeken a hőskála legnagyobb értéke, ezek az árnyékolt cellák alapján (107 °C / 88,5 °C / 82,7 °C). Ezek a cellák olyannyira drasztikusan felmelegedtek, hogy szinte biztosra vehető a teljes károsodásuk és ezzel a funkciójuk vesztese.



3. ábra. A növényzet árnyékoló hatásának következménye

Az utolsó képen látható (d), hogy a nagyon magasra nőtt növényzet a panel alját teljesen árnyékolja. Feltételezhető, hogy a legnagyobb hőmérséklet (67,1 °C) azért alacsonyabb az előzőekhez képest, mert itt több cellát érint a melegedés, ezek megnövekedett ellenállásain arányosan alakul hővé az ép cellák (lecsökkent) energiája. Látható, hogy mindhárom cellafüzért érinti a melegedés, ami a bypass diódák működése esetén a teljes modul kapcsolását áthidalja, így kimaradva a termelésből. Ezenfelül amennyiben az árnyékoló hatás nem szűnik meg, idővel a melegedő cellák tovább károsíthatják magukat és a körülöttük lévőket, élettartamuk csökken, a teljes panel tönkremegy.

Az eddigiek alapján, az árnyékoló növényzet súlyos hatással van a napelemek működésére és élettartamára. Ez egy gyakori probléma földfelszíni telepítésű rendszereknél, amit csak rendszeres ellenőrzéssel és a talaj megfelelő gyomtalanításával lehet megelőzni.

3. A NAPELEMEK KÁROSODÁSVIZSGÁLATA

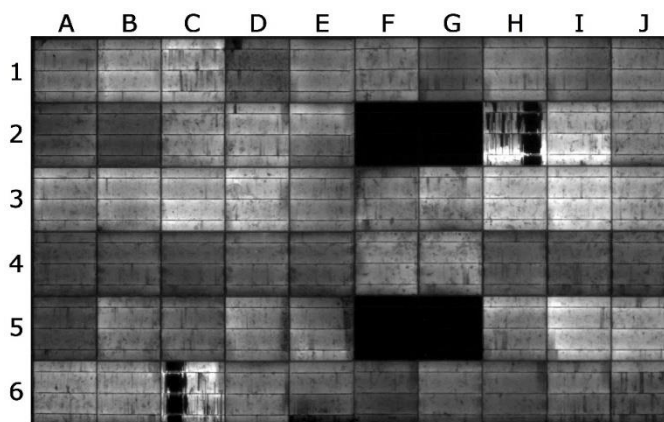
Az elektrolumineszcencia-vizsgálat lényege, hogy a napelemeket fordított üzemben működtetjük, azaz egy egyenfeszültségű tápegységről tápláljuk meg. Ilyenkor a napelem fogyasztóként működik, és fényt/hőt bocsát ki. Ezt a kibocsátást kamerával pásztázva feltárhatók a napelem hibái. A kibocsátott fény/hő intenzitása a napelem ellenállásának függvénye. A nagyobb ellenállással rendelkező részek fekete foltként jelennek meg a felvételeken, ezáltal a hibák egyértelműen beazonosíthatók [3] [4] [5] [6] [7] [8].

A vizsgált napelempanel 60 db cellát tartalmaznak. Az első 10 üzemévükben a 10%-os, maximálisan megengedett hatásfokvesztés esetében 6 cellányi teljesítménykiesés megengedett. Ez jelentkezhet a forrasztás hibájából is, amely elsősorban érintkezési hiba révén jelent kiesést. 30 db cella esetében megengedett a repedés nélküli cellasérülés, amely elsősorban az üzem közbeni hőingadozás miatti átkristályosodással valósulhat meg. 3 db cella teljes kiégése szintén határértéken belül elfogadható. Maximum 12 db cellában keletkezhetnek új repedések, amelyek nagy valószínűséggel lehetséges áramvesztéssel, teljesítménykieséssel, valamint biztosan termelőkieséssel járnak. 3 db cellánál elfogadható a pókháló jellegű repedés. 30 db cella esetében megengedettek a kritikussággal, azaz az áramvesztéssel és teljesítménykieséssel nem járó repedések. 6 db cellánál következhetnek be olyan repedések, amelyek 20%-nál kisebb energiatermelés-kiesést okoznak, illetve szintén 6 db cellánál engedhetők meg a 20%-nál nagyobb termelőkieséssel járó repedések.

Azonban a napelemek öregedése sem tekinthető lineárisnak az első 10 üzemévben, így a fentebbi meghibásodások megengedett darabszáma az üzemév függvényében határozható meg. Polikristályos napelemeknél az első üzemévben jellemzően 3%-os teljesítménycsökkenés, illetve hatásfokromlással lehet számolni. A 2. és a 10. üzemév között pedig várhatóan 0,77%/év a teljesítménycsökkenés, illetve a hatásfokvesztés. A 10. és a 25. év között 0,33%/év (összesen 5%/15 év) a gyártói megengedett teljesítménycsökkenés és hatásfokvesztés. Ezen értékek gyári adatok, azaz valós üzemi körülmények között üzemelő napelemek esetében (főleg, ha azok telepítése nem szakszerűen történt, és a karbantartások/tisztítási folyamatok is elmaradtak) ezen értékeknél minden bizonnyal magasabb veszteséggel, gyorsabb tönkremenetellel kell számolni.

Először szemléljük meg a 4. ábrát, amely egy gyárilag 260 W teljesítményű, azonban a napelemes erőműben károsodott napelempanel elektrolumineszcencia-felvételét mutatja. A második és ötödik sorban (F2, G2, F5 és G5) vannak nem működő cellák (a sötét részek a hibákat, a világos területek a jól működő cellarészeket mutatják). Ezért ezek a cellák egyáltalán nem termelnek áramot, sőt ellenállásként hatnak a velük sorba kötött cellákra nézve [6] [12] [13].

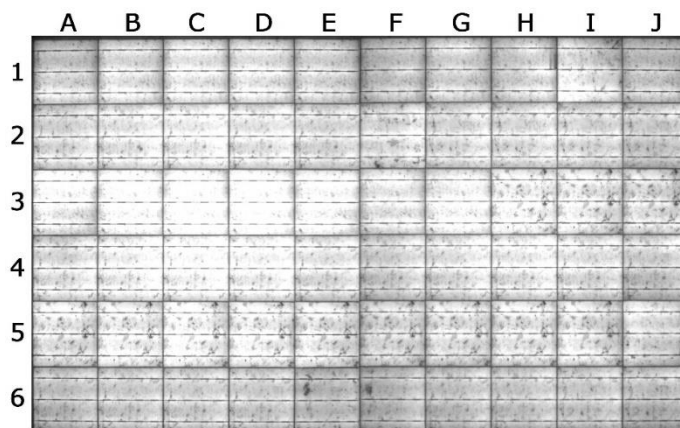
Mivel a panelen belül az 1 és a 2 jelű sorban lévő cellák egy sorra vannak felfűzve, ezért ez a cellasor nem képes a szükséges feszültségszintet elérni. Az 5 és a 6 jelű cellasor hasonlóan viselkedik. A 3 és a 4 jelű cellasor alkalmasabb energiatermelésre, mert az nem tartalmaz kritikus hibát. A legtöbb cella jó állapotban van, de a H2 és a C6 jelű cellákban kritikus repedések figyelhetők meg, amelyek tovább csökkentik a cellasor működőképességét. Mindezek alapján elmondható, hogy a napelempanel mérésből származó feszültsége miatt csak a gyártó adatainak 27,4%-a (gyári munkaponti feszültség: 34,8 V). A napelempanel aktuális teljesítménye 68,28 W, azaz a gyártáskori teljesítményhez képest 73,73%-os a teljesítménycsökkenés. Gyakorlatilag csak a 3 és a 4 jelű cellasor képes energiatermelésre, azonban a másik két, rosszul működő cellasor lerontja annak működési tulajdonságait, ezért csökkent több-kevesebb mint harmadára a napelempanel teljesítmény-leadó képessége.



4. ábra. Egy meghibásodott napelempanel elektrolumineszcencia-felvétele

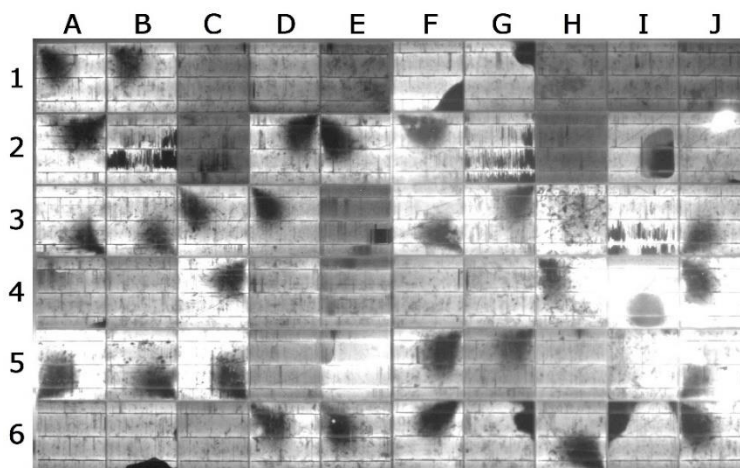
Az 5. ábra egy új napelempanelnek az elektrolumineszcencia-felvételét mutatja. Minden cella világos, repedés vagy törés nem látható. Az apró sötét foltok több cellán hasonló mintázatot mutatnak, így azok forrasztási (pl. 5. sor) és

anyaghibával (pl. E6 és F6) magyarázhatók. Ezek nem tekinthetők jelentős gyártási hibának, így nem is akadályozzák a panel megfelelő működését.



5. ábr.: Egy gyári állapotú napelempanel elektrolumineszcencia-felvétele

A 6. ábra egy olyan napelem elektrolumineszcencia-felvételét mutatja, amelyen porlerakódás miatti anyaghiba jelei figyelhetők meg. A károsodott cellákon a nagyobb méretű sötét foltok tölcserék formájában vannak jelen (A1, B1, C3, D3...). Ezen hibafajták üzemeltetési problémákra utalnak, azaz a panel felülete hosszú ideig szennyezett volt, és ezáltal a szennyező anyagok elkezdtek bediffundálni a napelempanel szerkezetébe. A B6, F1 és I3 cellákon kritikus méretű repedések, további öt cellánál nagy méretű cellaleválás, cellatörés figyelhető meg (B2, F1, G1, G6 és I6).



6. ábra. Egy anyaghibás napelempanel elektrolumineszcencia-felvétele

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Összességében tehát elmondható, hogy hőkamerás vizsgálatokkal kimutathatók az úgynevezett forró pontok (Hot-Spot), valamint a napelemmodul teljes felületére vonatkoztatott hőmérséklet-eloszlás, amely a hibadetektálás első lépése. Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy az árnyékhataások által okozott napelem-meghibásodás esetén garanciális cserére nem számíthatunk, mert a meghibásodás nem gyártói, hanem üzemeltetői hiba következménye. Javasolt tehát egyrészt még a telepítéskor megfelelő érzékenységű hőkamerával feltárni a napelempanel állapotát, illetve az esetleges árnyékjelenségeket, továbbá azokat évi rendszerességgel ellenőriztetni. Amennyiben már a telepítést követően, az első használat során is tapasztalhatók celladefektusok, akkor célszerű egyből a forgalmazóhoz/gyártóhoz fordulni, mert akkor még érvényesíthető lehet a garancia.

Hőkamerás vizsgálatokkal a hiba megléte ugyan detektálható, azonban annak típusa és közvetlen hatása a napelem villamos paramétereire és tulajdonságaira nem egyértelműen definiálható, ezért további mérések elvégzése szükséges. Ezen mérések az ún. „ex-situ” módszerek, amelyek elsődlegesen a Flash-teszteket (villamos tulajdonságok mérése) és az elektrolumineszcencia-vizsgálatokat (hibatípus feltárása) jelentik.

Az elektrolumineszcencia-vizsgálattal a napelem szerkezetében található meghibásodások, károsodások feltárhatók. Az ismertetett napelemeknél egyértelműen beazonosíthatók mikro- és ujjnyi méretű repedések, forrasztási

hibák, cellaletörések és anyaghibák, amelyek a napelempanel működésére, teljesítményleadó képességére és hatásfokára jelentős hatást tudnak gyakorolni.

A sérült, károsodott napelemek villamos paraméterei instabilak, ezáltal a hálózatra tápláló inverter nagyobb szabályozási igénnyel rendelkezik, aminek következtében megnövekedik a hálózati visszahatás, amely elsősorban a felharmonikus tartalom jelentős, akár ugrásszerű növekedésével is járhat. A nagyobb felharmonikus tartalom zavarhatja a hálózaton lévő fogyasztók működését, mindemellett nagyobb veszteséget is okoz, így a károsodott napelemek tartós üzemeltetése a villamosenergia-rendszer szempontjából is káros, mindamellett, hogy az erőmű gazdaságos üzemeltethetőségét és megtérülési idejét is negatívan befolyásolja.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] M.U. Ali, S. Saleem, H. Masood, K.D. Kallu, M. Masud, M.J. Alvi, A. Zafar, "Early hotspot detection in photovoltaic modules using color image descriptors: An infrared thermography study." *International Journal of Energy Research*, Vol. 1, p. 12, 2021.
- [2] O.E. Ikejiofor, Y.E. Asuamah, H.O. Njoku, S.O. Enibe, "Detection of Hotspots and Performance Deteriorations in PV Modules under Partial Shading Conditions Using Infrared Thermography." *Engineering Proceedings*, Vol. 2, p. 71, 2020.
- [3] S. Gallardo-Saavedra, L. Hernández-Callejo, M.C. Alonso-García, J.D. Santos, J.I. Morales-Aragonés, V. Alonso-Gómez, Á. Moretón-Fernández, M.Á. González-Rebollo, O. Martínez-Sacristán, "Nondestructive characterization of solar PV cells defects by means of electroluminescence, infrared thermography, I–V curves and visual tests: Experimental study and comparison." *Energy*, Vol. 205, paper 117930, p. 13, 2020.
- [4] A. Gerber, V. Huhn, T.M.H. Tran, M. Sieglösch, Y. Augarten, B.E. Pieters, U. Rau, "Advanced large area characterization of thin-film solar modules by electroluminescence and thermography imaging techniques." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 135, pp. 35–42, 2015.
- [5] I. Berardone, J. Lopez-Garcia, M. Paggi, "Analysis of electroluminescence and infrared thermal images of monocrystalline silicon photovoltaic modules after 20 years of outdoor use in a solar vehicle." *Solar Energy*, Vol. 173, pp. 478–486, 2018.
- [6] A.S. Rajput, J.W. Ho, Y. Zhang, S. Nalluri, A.G. Aberle, "Quantitative estimation of electrical performance parameters of individual solar cells in silicon photovoltaic modules using electroluminescence imaging." *Solar Energy*, Vol. 173, pp. 201–208, 2018.
- [7] W. Tang, Q. Yang, K. Xiong, W. Yan, "Deep learning based automatic defect identification of photovoltaic module using electroluminescence images." *Solar Energy*, Vol. 201, pp. 453–460, 2020.
- [8] H.R. Parikh, Y. Buratti, S. Spataru, F. Villebro, G.A.D. Reis Benatto, P.B. Poulsen, S. Wendlandt, T. Kerekes, D. Sera, Z. Hameiri, "Solar Cell Cracks and Finger Failure Detection Using Statistical Parameters of Electroluminescence Images and Machine Learning." *Applied Sciences*, Vol. 10, paper 8834, 2020.
- [9] E. Klugmann-Radziemska, E. Shading, "Dusting and Incorrect Positioning of Photovoltaic Modules as Important Factors in Performance Reduction." *Energies*, Vol. 13, paper. 1992, 2020.
- [10] S. Tang, Y. Xing, L. Chen, X. Song, F. Yao, "Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels." *Solar Energy*, Vol. 214, pp. 51–61, 2021.
- [11] A.M. Salazar, E.Q.B. Macabebe, "Hotspots Detection in Photovoltaic Modules Using Infrared Thermography." MATEC Web Conf, paper. 10015, 2016.
- [12] A.S. Rajput, C.D. Rodríguez-Gallegos, J. Ho, J. Wei., S. Nalluri, S. Raj, A.G. Aberle, J.P. Singh, "Fast extraction of front ribbon resistance of silicon photovoltaic modules using electroluminescence imaging." *Solar Energy*, Vol. 194, pp. 688–695, 2019.
- [13] K. Drabczyk, G. Kulesza-Matlak, A. Drygała, M. Szindler, M. Lipiński, "Electroluminescence imaging for determining the influence of metallization parameters for solar cell metal contacts." *Solar Energy*, Vol. 126, pp. 14–21, 2016.

Napeleminverter tervezése és szimulálása

Design and simulation of a solar inverter

Boros Rafael Ruben^{1*} – Bodnár István²

¹ Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros,
elkruben@uni-miskolc.hu

² Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros,
vegybod@uni-miskolc.hu

Összefoglaló: Ez a cikk egy egyfázisú kimenettel rendelkező hálózatcsatlott inverter tervezését és szimulációját mutatja be. A napelemek egy rezonáns LLC feszültségnövelő DC/DC konverteren keresztül csatlakoznak az inverterhez. A DC/DC konverter a 25-40 V-os bemeneti feszültséget 340 V-ra emeli. Az inverter kimenetén a hatásos és látszólagos teljesítmény nagysága külön állítható, amit egy szabályozó áramkör állít be. Az inverter transzformátor nélküli LCL szűrőn keresztül csatlakozik a hálózathoz. A tanulmány ismerteti az invertert, a PLL áramkört, az LCL szűrőt és az LLC átalakítót is. A szimuláció MATLAB-alapú grafikus fejlesztőkörnyezetben (Simulink) valósult meg.

Kulcsszavak: napelem, inverter, LLC konverter, MATLAB, LCL szűrő

Abstract: This paper presents the design and simulation of a grid-tie inverter that has one-phase output. Solar panels connected to the inverter through LLC boost converter. The DC/DC converter boosts the 25-40 V input voltage to 340 V. The magnitude of the effective and apparent power at the output of the inverter can be adjusted separately, which is set by a control circuit. The inverter is connected to the grid through an LCL filter without a transformer. The study describes the inverter, the PLL circuit, the LCL filter and the LLC converter as well. The simulation was implemented in a MATLAB based graphical development environment (Simulink).

Keywords: solar panel, inverter, LLC converter, MATLAB, LCL filter

1. BEVEZETÉS

Napjainkban folyamatosan új napelemes rendszereket telepítenek a hálózat áramellátására. Jellemzően ezek a rendszerek úgy épülnek fel, hogy sorba kapcsolt napelemek (sztringek) csatlakoznak az inverterre, az inverter szinuszos áramot táplál a hálózatba. Az inverter szabályozó algoritmus tartalmaz egy fáziszárt hurok (PLL) visszacsatoló rendszert, amely megvalósítja a hálózat szinkronizálását. A PLL az inverter frekvenciáját a hálózat frekvenciájához igazítja úgy, hogy ne keletkezzen fáziskülönbség. A hálózatba táplálás során nagy mennyiségű harmonikus tartalom keletkezne, ha nem lenne szűrő az inverter kimenetén. A magas harmonikus tartalom a teljesítmény-félvezetőknek köszönhető, amelyeket impulzusszélesség-moduláció (PWM) vezérel. A teljes harmonikus torzítás (THD) mértékét nagymértékben csökkenti az LCL (induktivitás-kondenzátor-induktivitás) szűrő. Az invertert az áramszabályozó vezérli úgy, hogy a hálózati feszültség és az áram között ne legyen fáziskülönbség, így csak hatásos teljesítmény jut a hálózatba [1].

Bizonyos problémák adódhatnak a napelemsztringek használatakor, ha az egyik napelem árnyékolts és/vagy megsérült. Egy napelem árnyékolása önmagában a töredékére csökkenti a teljes sztring teljesítményét, ha a napelemek sorba vannak kapcsolva. Egyetlen napelem árnyékolása sokkal kisebb teljesítménycsökkenést eredményez, ha párhuzamosan vannak csatlakoztatva, mint egy több sorba kapcsolt cellából álló árnyékolás. A jelenség miatt célszerű a napelemeket párhuzamosan üzemeltetni. A napelem üzemi feszültsége típustól függően néhány tíz volt. Ezenkívül a napelem feszültsége számos tényezőtől függ, mint például a terhelés, a fényintenzitás, a hőmérséklet stb. Az inverter csak akkor tud betáplálni a hálózatba villamos energiát, ha az a hálózati feszültségnél nagyobb feszültséget állít elő. 230 V-os hálózat esetében ez kb. 326 V. Így az invertereknek nagyobb csúcshőfeszültséget (kb. 340 V-ot) kell előállítaniuk a napelempanelek feszültségéből, ámbar ez csak 25-40 V. Ezért egy feszültségnövelő DC/DC átalakító közbeiktatása szükséges a napelemek és az inverter közé. A DC/DC átalakító stabil feszültséget állít elő a napelem ingadozó alacsony feszültségéből. Jó hatásfokú, rezonáns LLC (induktivitás-induktivitás-kondenzátor) átalakító használata célszerű ez esetben [2].

A korábbi kutatásokhoz egy LLC átalakító készült el, amely megfelel a célnak. Ezért ez a cikk nem foglalkozik részletesen az LLC konverter tervezésével, csak a szimulációban felhasznált paramétereket mutatja be [2] [3]. Ez az írás a következőképpen áll össze: a 2. fejezetben: az LLC átalakító leírása található. A 3. fejezet bemutatja a szabályozókört és az invertert. A 4. fejezetben a tárgyalt LCL szűrő kialakítása kerül bemutatásra. Végül a szimulációs eredmények az 5. részben láthatók.

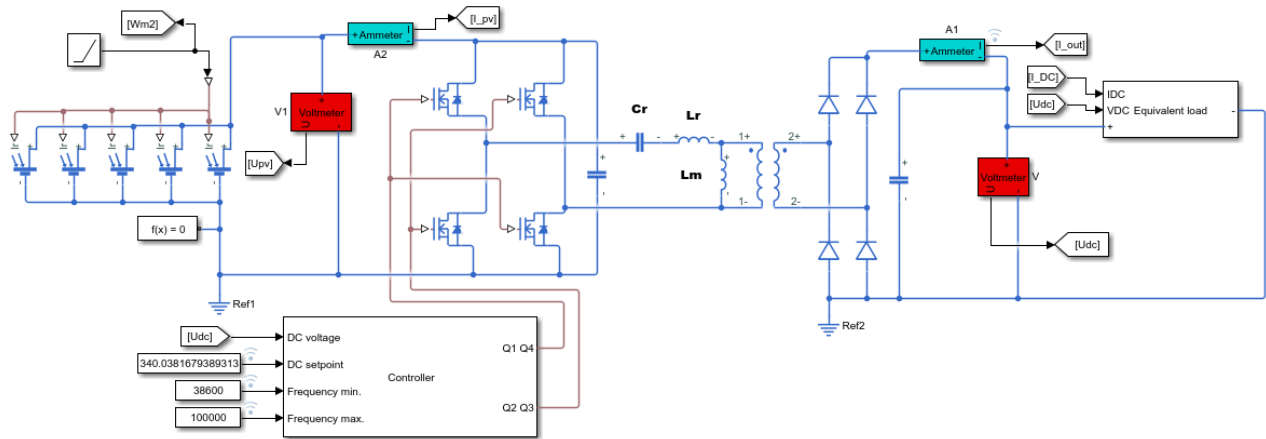
2. LLC REZONÁNS KONVERTER

Az LLC konverter egy rezonáns kapcsolóüzemű tápegység, amely a nagy hatásfokának és viszonylag kis méretének köszönhetően elterjedt. Az LLC konverterek típustól függően nagyfrekvenciás transzformátort és külső

induktivitásokat tartalmaznak. Az LLC konverterek feszültségnövelő és -csökkentő konverterként is használhatók. A kapcsolási frekvencia növelésével a transzformátor mérete csökkenthető, bár a félvezetők nagyobb kapcsolási hőveszteséggel működnek, ami nagyobb hűtési igényt, nagyobb hűtőbordát, kisebb hatásfokot eredményez [3].

A rezonáns konverterekkel a kapcsolási veszteség nagymértékben csökkenthető. A rezonáns konverterek esetén a félvezetők akkor kapcsolódnak, ha a kapcsolóelemen a feszültségesés nulla (ZVS: Zero Voltage Switching), vagy az áram értéke nulla (ZCS: Zero Current Switching). Ezek a kapcsolási módok a félvezető lágy bekapcsolását eredményezik, így a félvezető dinamikus teljesítményvesztése jelentősen csökken [2] [4]. Az LLC konverterek ZVS üzemmódban működnek üzemszerűen. Ez az üzemmód csak induktív tartományban érhető el. A ZCS kapcsolási módot kerülni kell, mivel ebben az esetben az áram siet a feszültséghez képest, így a MOSFET (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor) árama fordított irányban folyik, mielőtt a MOSFET kikapcsol. Kikapcsolás után nagy áram folyik át a testdiódán. A hídban lévő MOSFET bekapcsolásakor kemény kommutáció következne be. Ez nagy visszatérési veszteséget, zajt és nagy áramcsúcsot okoz, ami az eszköz meghibásodásához vezethet [2] [4] [5].

A feladathoz az 1. ábrán látható LLC teljes hídkapcsolású konvertert célszerű használni. Az ábra a Simulinkben létrehozott szimulációs elrendezést szemlélteti. Az LLC konverter nagy előnye, hogy a változó terhelések széles tartománya esetén a kapcsolási frekvenciát csak szűk tartományon kell állítani, így nagyon kis terhelésen vagy terhelés nélkül is jól szabályozható. További előnye az alacsony elektromágneses interferencia a lágy kikapcsolásnak köszönhetően. Azonban nem mindig érdemes rezonáns átalakítókat használni. Közepes teljesítményű alkalmazásokban (néhány 10 kW-ig) érdemes használni, mivel e fölött az LLC tank elemei nagyon nagyok és nehezek lesznek [2].



1. ábra. Teljes hídkapcsolású LLC átalakító

A szimulációs elrendezésben a napelemek az LLC átalakító bemenetére párhuzamosan kapcsolódnak. Egy panel 80 cellát tartalmaz sorba kapcsolva, 0,5 V-os üresjárású feszültséggel. A fényintenzitás a szimuláció során folyamatosan csökken 1000 W/m²-ről. A MOSFET-ek csatornaellenállása 35 mΩ-ra van állítva (R_{DS-ON}), így nem veszteségmentes. Ez a paraméter nagymértékben befolyásolja az átalakító hatásfokát. Az LLC konverter főbb paramétereit az 1. táblázat tartalmazza. Ezek az értékek korábbi kutatásokból származnak [2] [3]. A számított értékek alapján készült el az LLC konverter.

1. táblázat. LLC konverter paramétereit

Paraméter	Érték	Mértékegység	Megnevezés
U_{be}	25-40	V	bemeneti feszültség
U_{ki}	340	V	kimeneti feszültség
P_{ki}	400	W	kimeneti teljesítmény
$I_{DC\ ki}$	1,1765	A	kimeneti áram
a	0,128414	-	transzformátor áttétele
C_r	2154	nF	rezonáns kapacitás
L_r	1,1756	μH	rezonáns induktivitás
L_p	9,405	μH	primer induktivitás
L_m	8,2294	μH	mágnesező induktivitás
f_r	100	kHz	rezonáns frekvencia
f_{min}	38,6	kHz	minimumfrekvencia

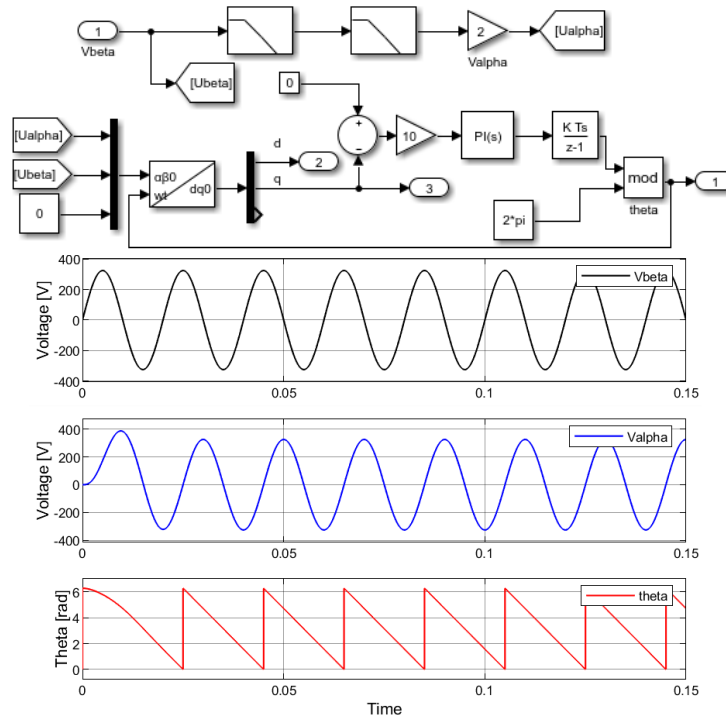
A MOSFET-eket PID szabályozó és pulzusfrekvencia-moduláció (PFM) vezérli. A szabályozóra azért van szükség, mert az átalakító kimeneti feszültsége nagymértékben függ a terhelés nagyságától. Ezért szükséges a kimeneti feszültség figyelése és az inverter frekvenciájának folyamatos beállítása. A szabályozó alapjele 340 V, a kimenete pedig a kapcsolási frekvencia értéke. Az inverter váltakozó feszültséget állít elő állandó 50%-os kitöltési tényező mellett, miközben a frekvencia változik, így valósítja meg a PFM-et (Pulse Frequency Modulation). A szimuláció során a konverter kimenete nincs közvetlenül csatlakoztatva a hálózatról táplált inverterhez. Az LLC konverter Simscape komponensekkel, az inverter Simulink komponensekkel lett szimulálva. A két rendszer nem kompatibilis egymással, ezért egyenértékű terhelésblokk terheli az LLC átalakítót, amelyet a hálózatról táplált inverter bemeneti árama és az LLC konverter kimeneti feszültsége vezérel. Az inverter az LLC konverter kimeneti feszültségét közvetlenül használja. Ez a módszer nem befolyásolja a szimuláció pontosságát.

3. LLC ÁRAMSZABÁLYOZÓ KÖR ÉS A HÁLÓZATCSATOLT INVERTER

Az LLC konverter kimenete az inverter bemenetére csatlakozik. Az inverter négy MOSFET-ből és a hozzájuk tartozó vezérlő áramkörből áll. Park-transzformáció (közvetlen-kvadratúra-nulla transzformáció) szükséges az inverter kimeneti hatásos és meddő teljesítményének külön szabályozásához. A hatásos teljesítmény a d tengelyen, a meddőteljesítmény pedig a q tengelyen van beállítva. A Park-transzformáció transzformációt hajt végre $\alpha\beta 0$ stacionárius koordináta-rendszerből dq0 forgó koordináta-rendszerbe. Ha a forgó koordináta-rendszer az α tengelyhez igazodik $t = 0$ -nál, akkor a Park-transzformációt az I . egyenlet határozza meg [6].

$$U_s = u_d + j \cdot u_q = (u_\alpha + j \cdot u_\beta)e^{-j\omega t} \quad (1)$$

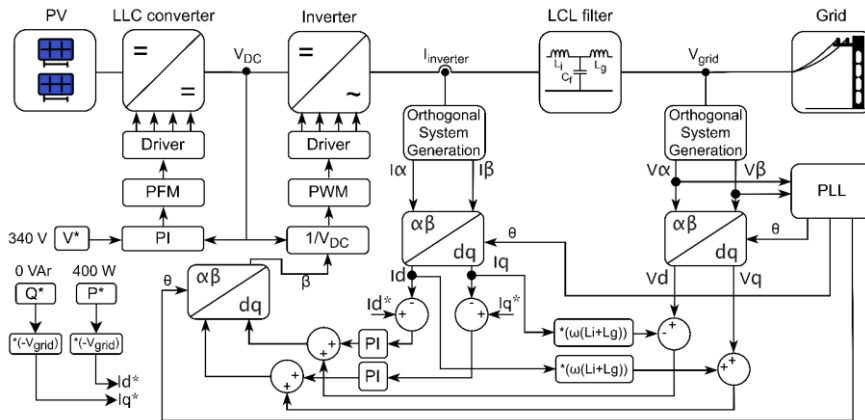
A Park-transzformáció bemenetén ortogonális rendszer (α, β) szükséges. Egyfázisú hálózatokhoz azonban nem érhető el, és az OSG (Orthogonal System Generator) segítségével kell előállítani [6]. Ezenkívül a hálózati feszültség pillanatnyi fázishelyzete szükséges a Park-transzformációhoz. Ezt a PLL algoritmus generálja, melynek felépítését és működését a 2. ábra mutatja. Az ábra tetején az OSG látható, amely aluláteresztő szűrőkből épül fel. Az ábra alján a feszültség körfrekvenciája látható, amely a Park-transzformációkhoz szükséges.



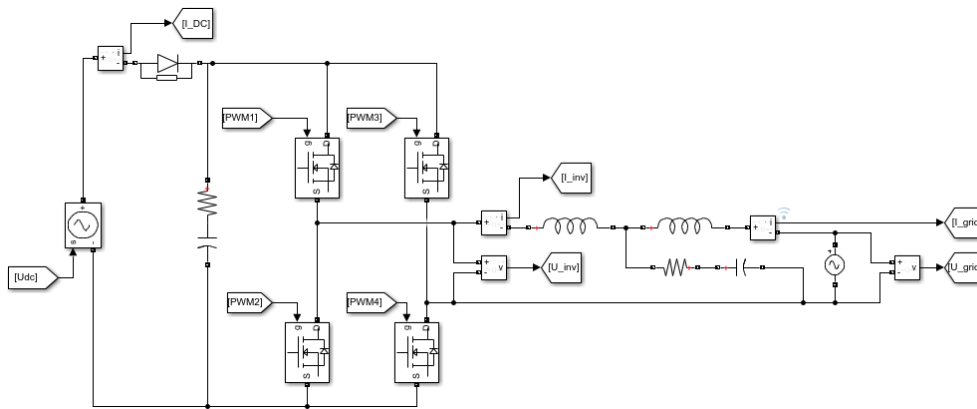
2. ábra. A PLL algoritmus struktúrája és működése

A szabályozórendszer és az erőátviteli rendszer a 3. ábrán látható. Az invertert egy áramszabályozó vezérli, amelynek alapjeleit (i_d^* , i_q^*) egy külön blokk számítja ki a hálózati feszültségből és a kívánt betáplált teljesítményből. A két komponens i_d^* és i_q^* arányos a hatásos és meddő teljesítménnyel. Az alapjelek és a két áramkomponens különbsége csatlakozik a két PI szabályozó bemenetére [7]. A jelenlegi európai szabványok szerint meddő teljesítményt nem szabad a hálózatba betáplálni. Emiatt az i_q^* értéke mindig nulla. Mivel az LLC átalakító kimenete 400 W-ra képes, a P^* alapjel is 400 W. Az áramszabályozó kimeneti értékéből egy blokk kiszámítja a referenciasfeszültséget. A referenciasfeszültség alapján a PWM generátor vezérli a MOSFET-eket az inverterben. A PWM jel kitöltési tényezője a referenciasfeszültségtől függően változik.

A szimulációhoz elhelyezett inverter a 4. ábrán látható. A bemeneten egy feszültségvezérelt feszültséggenerátor található, amelyet az LLC konverter vezérel. Kimenetén az LCL szűrő található, amely csökkenti a magas harmonikus tartalmat.



3. ábra. A PLL algoritmus struktúrája és működése



4. ábra. A hálózatsatolt inverter és az LCL szűrő

4. LCL SZÜRŐ

Az LCL szűrő csillapítása a rezonanciafrekvencia feletti frekvenciákon 60 dB/dekád, ezért az átalakítónál alacsonyabb kapcsolási frekvencia alkalmazható. Ezenkívül jobb szétválasztást biztosít a szűrő és a hálózat impedanciája között, és simább áramot biztosít a hálózati induktivitáson keresztül. Az LCL szűrő kialakítása könnyen megtervezhető bevált képletek alapján. Az egyik legfontosabb paraméter a vágási frekvencia. A vágási frekvenciának a lehető legalacsonyabbnak kell lennie, az invertert vezérlő PWM kapcsolási frekvenciája alatt. A kapcsolási frekvenciának azonban magasabbnak kell lennie, mint a hálózati frekvencia és a rezonanciafrekvencia (f_{res}). Érdemes a szűrőbe csillapító ellenállást is építeni, mivel a szűrő a vágási frekvencia környékén erősíti a jeleket. A kondenzátorral sorba kapcsolt ellenállás azonban kismértékű teljesítményvesztést okoz. L_i az inverter oldali induktivitása, L_g pedig a hálózat oldali induktivitása [8].

Az LCL szűrő tervezéséhez a következő paraméterek szükségesek: U_g (hálózati feszültség), P_n (névleges kimeneti teljesítmény), U_{DC} (DC köri feszültség), f_n (hálózati frekvencia), f_{sw} (kapcsolási frekvencia), f_{res} (rezonanciafrekvencia). Először két bázisparamétert kell meghatározni, amelyekből további paraméterek definiálhatók: Z_b (2. egyenlet) és C_b (3. egyenlet) [8].

$$Z_b = \frac{U_g^2}{P_n} \quad (2)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_n \cdot Z_b} \quad (3)$$

Az L (L_i , L_g) és C_f komponensek értékei a következőkben vannak meghatározva. Az inverter oldali induktivitásának értékét a 4. egyenlet adja meg. A ΔI_{Lmax} a névleges amplitúdóhoz viszonyított maximális áramingadozás, amelyet 5%-nak kell megadni (5. egyenlet) [8].

$$L_i = \frac{U_{DC}}{16 f_{sw} \cdot \Delta I_{Lmax}} \quad (4)$$

$$\Delta I_{Lmax} = 0.05 \frac{P_n \sqrt{2}}{U_{hálózat}} \quad (5)$$

Kikötés továbbá, hogy a teljesítménytényező legfeljebb 5%-os változása megengedett a szűrő kimenetén. Így a C_f értéke könnyen meghatározható az alap (C_b) értékből (6. egyenlet) [8].

$$C_f = 0.05 \cdot C_b \quad (6)$$

Az L_g hálózat oldali induktivitás a 7. képlet alapján határozható meg. Ahol r az L_g és L_i aránya $r = 0,6$ [8].

$$L_g = r \cdot L_i \quad (7)$$

A rezonanciafrekvencia mindezekből meghatározható a 8. egyenlet alapján [8].

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i \cdot L_g \cdot C_f}} \quad (8)$$

Megfelelő nagyságú csillapítás érdekében az R értéke a 9. képlet alapján alakul [8]:

$$R = \frac{1}{6 \cdot \pi \cdot f_{res} \cdot C_f} \quad (8)$$

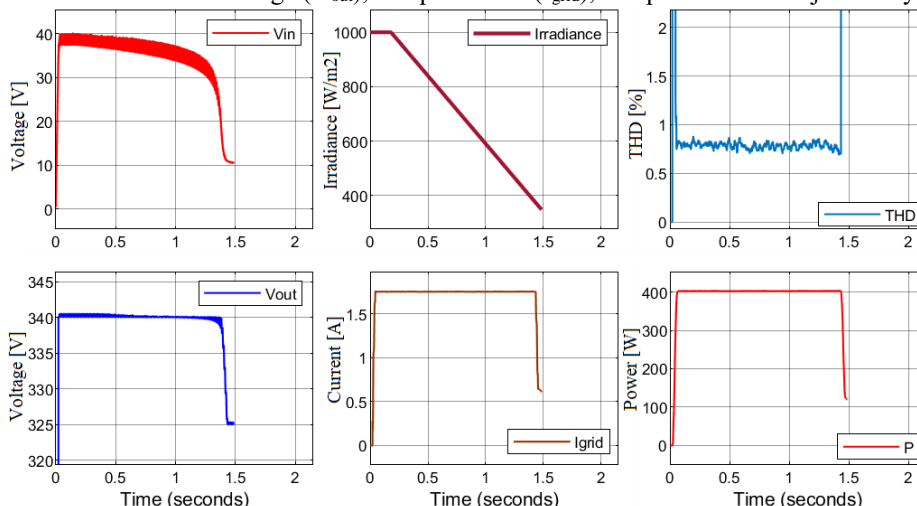
A 2. táblázat mutatja a számítások eredményeit, a szimuláció ezen paraméterek felhasználásával készült.

2. táblázat. LLC szűrő paraméterei

Paraméter	Érték	Mértékegység	Megnevezés
Z_b	132.25	Ω	bázisimpedancia
C_b	24.069	μF	báziskapacitás
L_i	4.32	mH	inverter oldali induktivitás
$\Delta I_{L_{max}}$	0.123	A	áram hullámosságága max.
C_f	1.2034	μF	szűrőkapacitás
L_g	2.592	mH	hálózat oldali induktivitás
f_{res}	3.604	kHz	rezonanciafrekvencia
R	12.2299	Ω	csillapító ellenállás
f_{sw}	40	kHz	kapcsolási frekvencia

5. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

Különös figyelmet érdemel a hálózatba táplált áram harmonikus tartalmának, valamint kimenő teljesítményének változása a fényintenzitás függvényében. Az 5. ábra a következő paraméterek változását mutatja az idő függvényében: LLC konverter bemeneti feszültsége (V_{in}), fényintenzitás (Irradiance), betáplált hálózati áram teljes harmonikus torzítása (THD), LLC konverter kimeneti feszültsége (V_{out}), betáplált áram (I_{grid}), betáplált hatásos teljesítmény (P).

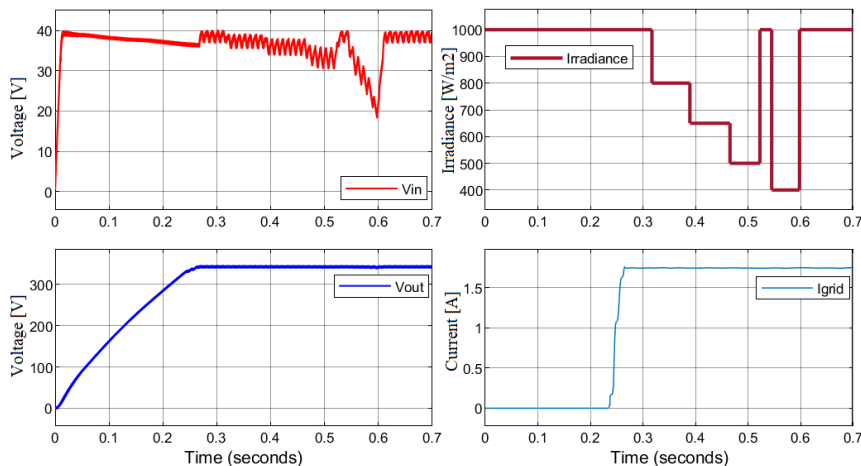


5. ábra. A szimulációs eredmények időben

A szimuláció kezdetekor a napelem tölti a bemeneti szűrőkondenzátort, amelynek kapacitása 20 mF. Erre a viszonylag nagy kapacitásra azért van szükség, mert segíti a feszültségingadozás mértékének csökkentését. Ezután az LLC konverter kimenetén 340 V feszültség keletkezik (a kimeneti kondenzátor 315 V-ra van inicializálva a gyors szimuláció miatt). A PLL áramkör és az áramszabályozó stabilizálása után az inverter stabilan 400 W-ot szolgáltat a hálózatnak, miközben a THD körülbelül 0,81%. Eközben a fény intenzitása folyamatosan csökken. Az esés addig nem

probléma, amíg az LLC átalakító bemenetén a feszültség kb. 21 V alá nem esik. Ekkor a kimeneti feszültség 340 V alá csökken, mert az alacsony bemeneti feszültség miatt az átalakító már nem tudja fenntartani a kimeneti feszültséget. A hálózatba injektált meddő teljesítmény nem nulla, de elhanyagolható. Ennek oka a PI vezérlő és az LCL szűrő minimális hibája. A minimális meddő teljesítmény betáplálása azonban kompenzálható úgy, hogy az i_q^* értéke kissé eltér nullától.

A szimulációk során a tranziensek is vizsgálatra kerültek. A fényintenzitás dinamikus változásának függvényében az alábbiak lettek kimutatva az idő függvényében: LLC konverter bemeneti feszültsége (V_{in}), fényintenzitás (Irradiance), LLC konverter kimeneti feszültsége (V_{out}), betáplált áram (I_{grid}). Az eredmények a 6. ábrán láthatóak az idő függvényében.



6. ábra. A szimulációs eredmények időben (tranzien)

A fényintenzitás dinamikus változása akkor jelent problémát, ha a bemeneti feszültség tartósan kb. 21 V. Ekkor a kimeneti szűrőkondenzátor lemerül, és a feszültség 340 V alá esik. A rövid távú (kb. 70 ms) fényárnyékolás nem befolyásolta a kimeneti feszültséget. A napelem feszültsége 100 Hz frekvenciával ingadozik, mert az inverter bemenetén az áram is ezzel a frekvenciával változik (főlszínusz hullám), így tehát a napelem terhelése is eszerint változik. Ez az ingadozás az LLC konverter kimeneti feszültségében is megmutatkozik, azonban a kimenő kapacitás nagy értéke miatt elhanyagolható a feszültség hullámzás.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A szimulációk során kapott eredmények igazolják az elméleti számítás helyességét, a hangolt PID szabályozók megfelelő működését is. Ezek alapján a gyakorlatban a számított paraméterekkel megépíthető az LCL szűrővel ellátott hálózatcsatolt inverter. Opcionális a szuperkondenzátorok használata vagy akkumulátor beszerelése a kisfeszültségű egyenáramú körbe. Ez segít csökkenteni a bemeneti feszültség ingadozásait. Az LLC konverter hatékonysága javítható kisebb csatornaellenállású MOSFET-ek használatával. Az inverter jelenleg építés és fejlesztés alatt áll, TMS320F28335 digitális jelprocesszor-vezérlő látja el a szabályozási, vezérlési feladatokat. A jövőben a szimulált értékek összevetésre kerülnek a valóságban mért értékekkel.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] J. Sedo, S. Kascak, "Design of output LCL filter and control of single-phase inverter for grid-connected system" *Electrical Engineering*, 2017, 99(4), 1217–1232. p. 16.
- [2] R. R. Boros, B. István, "Grid and PV Fed Uninterruptible Induction Motor Drive Implementation and Measurements" *Energies*, 2022, Vol. 15, No. 3: 708. p. 18.
- [3] R. R. Boros, B. István, "LLC Resonant Converter Design and Simulation for PV Motor Drives" In Proceedings of the 2021 22nd International Carpathian Control Conference (ICCC), Ostrava, Czech Republic, 31 May–1 June 2021; pp. 1–5.
- [4] M. Escudero, M.-A. Kutschak, F. Pulsinelli, N. Rodriguez, and D. P. Morales, "On the Practical Evaluation of the Switching Loss in the Secondary Side Rectifiers of LLC Converters". *Energies* 2021, 14, 5915. p. 23.
- [5] A.-R. Sam, "Resonant LLC Converter: Operation and Design" *Infineon*, 2012, 1, p. 19.
- [6] B. Crowhurst, E. F. El-Saadany, L. E. Chaar, L. A. Lamont, "Single-phase grid-tie inverter control using DQ transform for active and reactive load power compensation," 2010 IEEE International Conference on Power and Energy, 2010, pp. 489–494
- [7] M. Liserre, F. Blaabjerg and S. Hansen, "Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1281–1291.
- [8] A.E.W.H. Kahlane, L. Hassaine, M. Kherchi, "LCL filter design for photovoltaic grid connected systems." *the Journal of Renewable Energies*. 2014. 227–232. p. 6.

A klímaadaptációt célzó intézkedések várható eredményei a városi szintű stratégiai dokumentumokban, különös tekintettel a városi zöldinfrastruktúra módszereire

Expected results of climate adaptation measures, in particular of urban green infrastructure methods in city-level strategy documents

Dr. Hancz Gabriella

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Építőmérnöki tanszék, hgabi@eng.unideb.hu

Összefoglaló: A városi zöldinfrastruktúra elemeit már évtizedek óta javasolt beépíteni a városi szintű stratégiai tervekbe, programokba. A klímaváltozás megfékezésének egyik módszere a karbonsemlegesség elérése a klímaváltozást okozó gázok kibocsátásának csökkentésével. A tanulmányban arra keresem a választ, hogy a városi zöldinfrastruktúra módszerének a klímaváltozást okozó gázok kibocsátásának csökkentése terén bizonyított, közvetett pozitív hatását figyelembe vették-e és számszerűsítették-e ugyanezekben a programokban. A klímaváltozás városokra gyakorolt hatásait a hatásokhoz való alkalmazkodással is csökkenthetjük. A tanulmányban arra is keresem a választ, hogy ugyanezekben a programokban a városi zöldinfrastruktúra módszerének a klímaváltozás hatásaihoz való alkalmazkodás terén bizonyított, pozitív hatását figyelembe vették-e és számszerűsítették-e.

Kulcsszavak: környezeti vizsgálat, smart city program, városi energetika, természetalapú megoldások, dekarbonizáció, városi szintű mitigáció, városi szintű adaptáció, városok ellenállóképessége

Abstract: It has been recommended to integrate the elements of urban green infrastructure into strategic plans and programs at the city level for decades. One way to eliminate climate change is to achieve carbon neutrality by reducing emissions of the greenhouse gases. In this study, I am looking for the answer to whether the proven indirect positive impact of the urban green infrastructure method in reducing climate change emissions has been considered and quantified in the same programs. We can also reduce the effects of climate change on cities by adapting to the unavoidable effects. In this study, I am also looking for the answer to whether the proven positive impact of the urban green infrastructure method on adaptation to the effects of climate change has been considered and quantified in the same programs.

Keywords: strategic environmental assessment, smart city program, urban energetics, nature-based solutions, decarbonization, urban level mitigation, urban level adaptation, urban resilience

1. BEVEZETÉS

Statistikai adatokra és szakirodalomra hivatkozva áttekintem az üvegházhatású gázok városokhoz köthető kibocsátásával kapcsolatos adatokat, célkitűzéseket és intézkedéseket, valamint hogy ebben az összefüggésrendszerben milyen szerepet kap a városi zöldinfrastruktúra. Bemutatom az üvegházhatású gázok tekintetében legszennyezőbb – városokhoz köthető – nemzetgazdasági ágazatokat, a klímaváltozás hatásait a városok energiaigényére, a városi zöldinfrastruktúrának a kibocsátások csökkentése – mitigáció – és a hatásokhoz való alkalmazkodás – adaptáció – terén várható hatásait. Áttekintést nyújtok Debrecen város releváns stratégiai programjairól, és hogy ezek hogyan veszik figyelembe a városi zöldinfrastruktúrát mint mitigációs és adaptációs lehetőséget. A stratégiai programok megalkotásakor az intézkedések hatásosságára és hatékonyságára pozitív hatással van, ha a célok elérését elősegítő, esetleg akadályozó más programok intézkedéseit, azok várható eredményeit számításba vesszük.

2. A TELEPÜLÉSI ZÖLDINFRASTRUKTÚRA

A biológiai sokféleség megőrzésének a 2015–2020 közötti időszakra szóló nemzeti stratégiája szerint „zöldinfrastruktúrának nevezzük azokat a természetes és félig természetes területeket, valamint egyéb növényzettel fedett és ökológiai funkciót betöltő területek stratégiaileg megtervezett hálózatát, amelyet úgy terveztek és irányítanak, hogy széles körű ökoszisztéma-szolgáltatások nyújtására legyen képes. A

zöldinfrastruktúra gerincét a zöld felületek („zöld” elemek) és a vízfelületek („kék” elemek) adják. A zöldinfrastruktúra kiegészítheti vagy esetenként kiválthatja a műszaki, azaz „szürke” infrastruktúra-elemeket – utak, csatornák, vezetékek és berendezések, épületek stb.”

3. KLÍMAVÁLTOZÁST OKOZÓ GÁZOK KIBOCSÁTÁSA A VÁROSOKBAN

A világ lakosságának több mint fele él a városokban és a városokhoz köthető az energiaigény több mint 70%-a [1] [2]. A kibocsátás koncentrációja miatt a mitigációs beavatkozásokat is ide célszerű koncentrálni. Ahhoz, hogy a hőmérséklet-emelkedés 1,5 °C-os küszöbértéke alatt maradjunk, a városok jelentős dekarbonizációjára van szükség, ehhez pedig alacsony CO₂-kibocsátású energiaellátó és közlekedési rendszerekre, a hűtés és kockázatkezelés természet alapú megoldásaira (NBS, nature-based solutions) történő áttérésre [1]. A szén-dioxid a legjelentősebb üvegházhatású szennyező anyag a nemzetgazdaságban [3], az ÜHG-leltárban a teljes kibocsátás 72%-a az energiaszektor számlájára írható 2019-ben [4]. Magyarországon az üvegházhatású gázok kibocsátása és a bruttó hozzáadott érték tekintetében abszolút szétválás figyelhető meg [3].

4. A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSAI A VÁROSOKBAN

A klímaváltozás városokban megfigyelhető legsúlyosabb hatásai az épületek és a műszaki infrastruktúra károsodása a szélsőséges időjárási események és a tengerszint emelkedése miatt, valamint a vízhiány és a megemelkedett hőmérséklet okozta egészségügyi hatások. A vízkészletek csökkenése a megnövekedett vízigényekkel együtt korlátozhatja a vízenergia-termelést, a bioenergia-termelést, valamint a hűtővizet igénylő hőerőművek és nukleáris erőművek termelését. A felhőborítás, a szélsőséges és szélirány változása, valamint a szélsőséges időjárási események befolyásolhatják a napenergia és szélenergia hasznosítását is. Ezek a hatások érezhetők az energia árának változásban és az üzemanyag-ellátás időszakos bizonytalanságában. A klímaváltozás az energiaigényre is hatással van: a megnövekedett hőmérséklet a városi hősziget hatásaival felerősítve növelheti a légkondicionálás energiaigényét, ami a csúcsidei energiafogyasztásban is megmutatkozik, maga után vonva az energiatermelés kapacitásának szükségszerű növelését. A kockázatos hatások a visszacsatolós folyamat során felerősödhetnek (1. ábra) [5].

5. A VÁROSI ZÖLDINFRASTRUKTÚRA ÁLTAL NYÚJTOTT MITIGÁCIÓS LEHETŐSÉGEK

A mitigáció az éghajlatváltozás csökkentése. „Komplexitása és multifunkcionalitása miatt a zöldinfrastruktúra (ZI) a csapadékos időszakok hatását jól kezelő, költséghatékony és rugalmas megoldás, amely sok egyéb előnnyel szolgál közösségi szinten” [7]. Városi szinten csökkenti a rendkívül magas hőmérsékletet és szabályozza a vízminőséget [8]. „A ZI a zöld felületek integrált rendszerként tervezett és működtetett hálózata, amely multifunkcionalitása révén szinergikus pozitív hatásokat eredményez” [9]. Ezzel összhangban az EU megfogalmazásában a ZI természetes és félig természetes területek stratégiai tervezéssel létrehozott és rendszerként üzemeltetett hálózata, amely az alkotóelemek egyedi tulajdonságai révén számos ökoszisztéma-szolgáltatást nyújt [10]. A városok gazdaságának zöldítése, melynek egyik alappillére a zöldinfrastruktúrába való beruházás, globálisan is hatékony eszköznek tekinthető [11] [12]. A városi zöld felületek karbonmegkötő és tároló képessége fontos mitigációs eszköz [13] [14], bár többen vitatják, hogy ez elégséges megoldás lenne a kompenzációra [13] [14] [15] [16]. Az energiaigény csökkenése, ennek következményeképpen az üvegházhatású gázkibocsátás csökkenése, a hőkomfort javulása, a levegőminőség javulása, az árvízi kockázat csökkenése, a lefolyó csapadékvíz minőségének javulása [13] mind kézzelfogható hatások. A klímaváltozást közvetlenül csökkentő és a klímaváltozás hatásait csökkentő közvetett mitigációt az 1. ábrán belül piros nyilakkal jelöltem. Sok önkormányzat helyi politikájával támogatja a fásítást, a meglévő zöld felületek megőrzését és újabban a zöldépítést – zöldtetők, zöldfalak – az ezektől várható pozitív hatások érdekében [13].

6. A VÁROSI ZÖLDINFRASTRUKTÚRA ÁLTAL NYÚJTOTT ADAPTÁCIÓS LEHETŐSÉGEK

Az előre nem látott városiasodással és klímaváltozással küzdve a városok ellenálló képességének növelése egyre nagyobb hangsúlyt kap. Az adaptáció az éghajlatváltozás hatásaihoz való alkalmazkodás, az alkalmazkodóképesség erősítése. A legutóbb elfogadott, 2030-ig tartó időszakra vonatkozó fenntartható fejlődési menetrend a fenntartható fejlődés elérését szolgáló 17 célt fogalmazott meg, melyek közül a 11. szerint a városokat és a településeket felzárkóztatóvá, biztonságossá, ellenállóvá és fenntarthatóvá kell tenni.

A zöldinfrastruktúrának a klímaváltozáshoz való alkalmazkodás terén számításba vehető módszerei fontos eszközkészletet jelentenek a fenntartható, alkalmazkodó fejlődésnek, miközben más területeken is jelentős előnyöket biztosítanak, melyeket az 1. ábra piros szaggatott vonallal jelenít meg [17] [18]. Az adaptáció lényeges eleme az is, hogy ezek az eszközök többszörös funkciójuk révén – a szennyezőanyagok megkötése, a város mikroklíma-javítása, a vízkészletek fejlesztése, a különböző típusú árvizek és az erózió kockázatának csökkentése,

a passzív öntözés biztosítása – hatékonyak és gazdaságosak, ezért jelentős megtakarításokat lehet a stratégiai tervezéssel elérni.



1. ábra. A klímaváltozásnak a városokban megfigyelhető releváns hatásait fekete nyilak jelölik, a klímaváltozást csökkentő hatásokat (mitigáció) folyamatos piros nyilak jelölik, az alkalmazkodásban (adaptáció, ellenálló képesség) betöltött szerepe a szaggatott piros vonalakkal kiemelt területeken várható. [5][17][18] alapján a szerző

A fenntartható városok tervezésének sarkalatos eleme a fenntartható, ellenálló infrastruktúrába való beruházás, melynek alapfeltétele a klímaváltozás infrastruktúrára gyakorolt hatásainak figyelembevétele [17] [18], az azokhoz való alkalmazkodás megvalósítása. A fenntartható vízgazdálkodásnak – a tanulmány szempontjából releváns – legfontosabb kritériumai [19] [20], hogy a tervezés a lehetséges szélsőséges időjárási körülmények és következményeik figyelembevételével történjen, és a tervezett megoldás a változásokhoz igazítható, módosítható legyen [20], a vízkészletvédelem decentralizált megoldásait alkalmazzuk a záporvízkezelés és szennyvíztisztítás területén annak érdekében, hogy a hasznosítható vízkészletek a keletkezés helyén kerülhessenek hasznosításra [20], a meglévő városi zöld területeket alakítsuk át, és újakat hozunk létre egy ellenálló csapadékvíz-hálózat részeként, melyek tárolják, újrahasznosítják, tisztítják és továbbítják a csapadékvizet, mindezek eredményeként integrálják a városi vízkörforgást a többszörös vízhasználattal és egyéb funkciókkal a fenntarthatóság érdekében [20]. A zöldinfrastruktúra eszközkészletét képező természetes megoldások (Nature-based solutions [NbS]) úgy csökkentik a kockázatokat, hogy a jövőben várható változásokhoz igazíthatók, és számos előnyhöz juttatnak. A megoldások alkalmazása az új infrastruktúra tervezésekor a leghatékonyabb, vagy amikor felújítást, illetve bővítést végzünk, de így is számítani lehet rá, hogy a későbbiekben módosításra kerül sor. A rendkívüli időszakokra elegendő tartalékkal rendelkező, változatos ellátórendszerek magától értetődően sokkal rugalmasabbak, mint a máig jellemző készenléti rendszerek. A klímaváltozással kapcsolatos alkalmazkodást a hosszú távú területi tervekbe, stratégiákba kell beépíteni, hogy minél ellenállóbb megoldásokat valósítsunk meg, és ne kényszerüljünk évtizedeken át egy sérülékeny rendszert üzemeltetni. Összegezve az ellenálló infrastruktúra változatos, minél hosszabb időtávra és lehetőleg többféle forgatókönyv figyelembevételével kerül megtervezésre [20].

Az ISO 37123 szabvány, a *Fenntartható városok és közösségek – az ellenálló városok mutatói* – tartalmazza az ellenálló városokat jellemző mutatókat, amelyek segítenek megállapítani, hol tart egy adott város az ellenállóra válás útján, és hol vannak hiányosságok [21]. Az alábbiakban kiemelek néhány, a városi zöldinfrastruktúra mint adaptációs lehetőség szempontjából releváns mutatót [21]:

- a kék-zöld infrastruktúra fejlesztésére költött pénz aránya a város költségvetésében
- a városi hősziget hatásának mértéke
- a vízáteresztő felületek aránya
- a vízvisszatartás eszközeinek aránya a megelőzés eszköztárában

7. A VÁROSI ZI MINT MITIGÁCIÓS ÉS ADAPTÁCIÓS LEHETŐSÉG BEÉPÍTÉSE DEBRECEN VÁROS STRATÉGIAI ANYAGAIBA

Az EU Zöldinfrastruktúra Stratégiája az ökoszisztéma szolgáltatások megőrzését támogatja városi és városokon kívüli területeken egyaránt [10]. Ez a stratégia a városok tervezésében természetközeli megoldásokat ajánl alkalmazni [22]. Ezt követően sok ország és város kezdte tudatosan alkalmazni ezeket a megoldásokat [23]. Debrecen városi szintű stratégiai dokumentumait azzal a céllal tekintetem át, hogy mitigáció vagy adaptáció céljával alkalmazzák-e a városi ZI-t, illetve, más szemszögből nézve a más programokban alkalmazott, betervezett ZI mitigációs és/vagy adaptációs hatásait figyelembe veszik-e. A közelmúltban és a jelenleg érvényben lévő alábbi stratégiai terveket, programokat tekintetem át:

- Debrecen Megyei Jogú Város Fenntartható Városfejlesztési Stratégiája, 2021–2027 [24]
- Debrecen Megyei Jogú Város Fenntartható Energia- és Klímaakcióterve (SECAP), 2017. [25]
- Debrecen Megyei Jogú Város Smart City Stratégiája [26]

A programokban megkerestem és az alábbiakban ismertetem a városi zöldinfrastruktúra – esetleg körülírva vagy más néven utalva rá – intézkedésként való megjelenését, célját, a tőle várt – esetleg számszerűsített – eredményeket, különösen a város szintjén megvalósítható mitigáció, valamint a kivédhetetlen hatásokhoz való adaptáció terén.

7.1. Debrecen Megyei Jogú Város Fenntartható Városfejlesztési Stratégiája, 2021–2027

Az egyik releváns stratégiai cél az egészséges, zöld, értékőrző városi környezet és városüzemeltetés, melynek alcéljai között szerepel az adaptív vízgazdálkodás. Az ezt megvalósító egyetlen intézkedési csomag az energetikai fejlesztések – ezen belül a humán szolgáltatások infrastruktúrájának energetikai fejlesztése, a zöldenergia-termelés növelése és a hulladékudvarok kialakítása, *ami nem tükrözi a zöldinfrastruktúra mint eszköz szerepét* [24].

Az önkormányzat 2021 végén megújította a nyilatkozatát, amelyben 2050-re a klímasemlegesség elérését vállalta. A célhoz kapcsolódó beavatkozási területet így foglalja össze: A zöld felületek bővítésével, illetve megfelelő gondozásával növelhető az ÜHG-elnyelő kapacitás a városban, mivel a zöld növények a fotoszintézis révén szén-dioxidot nyelnek el. A zöld felületek az elnyelés mellett a városi hőszigetelést is csökkentik, vitalitásuk a megváltozott klimatikus viszonyokhoz alkalmazkodó fajok kiválasztásával növelhető. Nemcsak a zöld felületek növelése fontos, hanem azok megfelelő, minél kisebb ökológiai lábnyommal járó karbantartása is, hiszen a degradálódott zöld felületek levelesebb CO₂ megkötésére képesek. A zöld felületek gondozását különösen nagyobb városi területeken a pontos, naprakész digitális nyilvántartások és üzemeltetési környezet alkalmazásával kívánja elérni.

A városi mikroklíma kedvezőtlenül alakul, romlása 80%-os valószínűséggel bekövetkezik. Ez csökkenti a városi terek élıhetőségét, a hőszigetek miatt a hűtés magasabb energiafelhasználást okoz, a betonfelületek a csapadék helyben tartását gátolják. A hatás kezelése – a várostervezés az utcai és beltéri hőstressz csökkentésével, zöld, tágas terek, nyílt terek és a légáramlás kialakításával, fák ültetésével, az albedó növelésével és az antropogén hőtermelés csökkentésével lehetséges.

7.2. Debrecen Megyei Jogú Város Fenntartható Energia- és Klímaakcióterve (SECAP), 2017

A zöldinfrastruktúrát nem említi [25]. A város 40%-kal mérsékeli a CO₂-kibocsátás mennyiségét 2030-ig (2013-as bázisévhez képest). Az éghajlatváltozás és annak hatásai Hajdú-Bihar megyében című fejezet tartalmazza a csapadékeloszlással kapcsolatos hatásokat, és az alkalmazkodás módját az alábbiak szerint fogalmazza meg: A csapadékkal összefüggő veszélyeztetettség (intenzív csapadékhullás rövid időn belül, belvíz, villám, árvíz, aszály) esetében a csapadékelvezetésért felelős infrastruktúra rendszeres és folyamatos karbantartása (takarítás, javítás), bővítése, modernizálása, valamint a zöld felületek, zöld területek bővítése szükségeltetik elsősorban a városi környezetben.

A hőmérséklet emelkedésével kapcsolatos hatások mérséklésére szükséges a pontos megfigyelés-előrejelzésen alapuló lakossági célú tájékoztatás mellett az önkormányzat tulajdonában levő infrastruktúra alternatív módú hasznosítási lehetőségeinek felmérése, bővítése (légkondicionált épületek, köztéri ivóutak számának növelése, párapaduk alkalmazása, közterület locsolása stb.)

7.3. Debrecen Megyei Jogú Város Smart City Stratégiája

„A Debrecen Smart City célja, hogy javítsa a városi jólétet és életminőséget. Mindezt teszi úgy, hogy ..” csak a releváns elemeket kiemelve [26]:

- bővíti az infrastruktúrát,
- megújítja a városban működő közműszolgáltatásokat,
- fenntartható zöldszemléletet alakít ki, és hozzájárul az innovatív technológiák alkalmazásához.

8. MEGÁLLAPÍTÁSOK

8.1. Debrecen Megyei Jogú Város Fenntartható Városfejlesztési Stratégiája, 2021–2027

Megjelenik a programban:

- a zöldinfrastruktúra az ökoszisztéma-szolgáltatások elősegítése érdekében, vagyis a program számításba veszi a városi szintű beszivárgás növelését, a levegőminőség javulását, a CO₂ megkötését és tárolását, az energiaháztartás javulását, a zajszűrő hatást, a vízháztartás javulását, a javuló hőkomfortot, melyek mind vagy mitigációt és/vagy adaptációt jelentenek.

Bár az EU 2020 stratégiájának tematikus céljaival való összhangot táblázatosan megjeleníti a program, az alább felsorolt EU-s 4.,5.,6. tematikus célokat tükröző ITS-beli célok nem építenek kellő mértékben a zöldinfrastruktúrában rejlő lehetőségekre:

- a 4. tematikus cél az alacsony CO₂-kibocsátású gazdaság felé történő elmozdulás támogatása minden ágazatban (R2, R3, R5),
- az 5. tematikus cél az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás, kockázatmegelőzés és -kezelés előmozdítása (R3, R5),
- a 6. tematikus cél a környezetvédelem és az erőforrás-felhasználás hatékonysága (R2, R5),
- az R2-ITS cél az iparterület infrastrukturális fejlesztése,
- az R3-ITS cél a város felsőoktatási és kutatási intézményei infrastruktúrájának a fejlesztése, a tudományos eredmények gyakorlati hasznosításának erősítése,
- az R5-ITS cél az épített és természeti környezet védelme, állapotának javítása.

8.2. Debrecen Megyei Jogú Város Fenntartható Energia- és Klímaakcióterve (SECAP), 2017

- A zöldinfrastruktúrát nem említi [28].
- A CO₂-kibocsátás-csökkentő intézkedések között nem szerepel a ZI.
- A csapadékvíz elvezetését szolgáló infrastruktúra karbantartásától várja az intenzív csapadékeseményekhez köthető kockázatok csökkenését.
- Megemlíti a zöld felület bővítésének szükségességét, de a víz visszatartás jelentősége nem kap hangsúlyt, a várható eredményt nem nevesíti.
- A városi hőmérséklet-emelkedés hatásainak kezelésében nem kap szerepet a zöldinfrastruktúra.

8.3. Debrecen Megyei Jogú Város Smart City Stratégiája

A program fenntartható zöldszemléletet alakít ki, de nem foglalkozik a zöldinfrastruktúrával sem – esetleg más fogalmakkal helyettesítve – a csapadékvíz-visszatartással, a víz visszatartással, a csapadékvízzel, a természetalapú megoldásokkal, a vízgazdálkodással, az adaptációval, a zöld felületek által biztosított mitigációval.

9. KÖVETKEZTETÉSEK

Debrecen stratégiai tervei, dokumentumai a városi zöldinfrastruktúrát – a szakirodalomban széleskörűen publikált, igazolt hatások ellenére – a klímaváltozás szempontjából sem mitigációs, sem adaptációs eszközként nem veszik számításba, a klímaváltozás csökkentésében és a hozzá való alkalmazkodásban minimális szerepet kap. A zöldinfrastruktúra egyes módszerei egyes programokban megjelennek, de szerepük nem köthető a klímaadaptációhoz, így a városok ellenálló képességéhez sem.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] C. Nangini, A. Pregon, P. Ciais, U. Weddige, F. Vogel, J. Wang, F.-M. Bréon, S. Bachra, Y. Wang, K. Gurney, Y. Yamagata, K. Appleby, S. Telahoun, J. G. Canadell, A. Grüber, S. Dhakal & F. Creutzig; Data Descriptor: A global dataset of CO₂ emissions and ancillary data related to emissions for 343 cities
- [2] UN-Habitat, 2016 URBANIZATION AND DEVELOPMENT Emerging Futures; WORLD CITIES REPORT 2016)
- [3] A nemzetgazdasági ágak üvegházhatásúgáz- és légszennyezőanyag-kibocsátása, KSH; <https://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/idoszaki/pdf/ueghazhatas15.pdf>
- [4] <https://legszenyezetseg.met.hu/kibocsatas/agazati-kibocsatasok>
- [5] R.J. Dawson, D. Thompson, D. Johns, S. Gosling, L. Chapman, G. Darch, W. Watson, Powrie, S. Bell, K. Paulson, P. Hughes, R. Wood "UK Climate Change Risk Assessment Evidence Report: Chapter 4, Infrastructure. London: Adaptation SubCommittee of the Committee on Climate Change." 2016.
- [6] E. Garmendia, E. Apostolopoulou, W. M. Adams, D. Bormpoudakis, "Biodiversity and green infrastructure in Europe: Boundary object or ecological trap?" Land Use Policy 56, 315–319. 2016.

- [7] U.S. EPA. "What Is Green Infrastructure?" <https://www.epa.gov/green-infrastructure/what-green-infrastructure#:~:text=In%202019%2C%20Congress%20enacted%20the,landscaping%20to%20store%2C%20infiltrate%2C%20or>
- [8] C. Avciokurt, M. Dinu, N. Hacıoğlu, R. Efe, A. Soykan, "The Value of Urban Green Infrastructure for Sustainability of Urban Ecosystems"; ISBN 978-954-07-4021-8 St. Kliment Ohridski University Press, Sofia 2015.
- [9] S.T. Lovell, J.R. Taylor, "Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States". *Landsc. Ecol.*, 28, 1447–1463. 2013
- [10] European Commission. Green Infrastructure (GI) — Enhancing Europe's Natural Capital; European Commission: Brussels, Belgium, 2013.
- [11] D. Dodman, G. McGranahan, B. Dalal-Clayton "Integrating the environment in urban planning and management: Key principles and approaches for cities in the 21st Century". United Nations Environment Programme. p.43., 2014.
- [12] L. Lebel, P. Garden, M. Banaticla, R. Lasco, A. Contreras, A. Mitra, C. Sharma, H. Nguyen, G. Ooi, A. Sari "Integrating carbon management into the development strategies of urbanizing regions in Asia: implications of urban function, form, and role" *Journal of Industrial Ecology* 11(2): 61–81. , 2007.
- [13] D. Nowak, E. Greenfield, R. Hoehn, E. Lapointe, "Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States". *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*. 178C. 229-236. 10.1016/j.envpol.2013.03.19. 2013.
- [14] M. Ariluoma, J. Ottelin, R. Hautamäki, E.-M. Tuhkanen, M. Mänttari, "Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki". *Urban Forestry & Urban Greening*. 57. 126939. 10.1016/j.ufug.2020.126939. 2020.
- [15] E. Velasco, M. Roth, L. Norford, I. T. Molina, "Does urban vegetation enhance carbon sequestration?" *Landsc. Urban Plan.* 148, 99–107. 2016.
- [16] Final Government Distribution Technical Summary IPCC AR6 WG III
- [17] WORLD CITIES REPORT 2016.
- [18] J.&J.Marsalek, P.-A & K. Blanca & Malmquist, J. & C. M. & Goldenfum, "Urban Water Cycle Processes and Interactions". 10.1201/9781482288544. 2007.
- [19] Sustainable Urban Water Management; Conference Paper · September 2008; DOI:
- [20] J.W. Hall¹, J.C.J.H. Aerts², B.M. Ayyub³, S. Hallegatte⁴, M. Harvey⁵, X. Hu⁶, E.E. Koks⁷, C. Lee⁸, C., X. Liao⁹, M. Mullan¹⁰, R. Pant¹¹, A. Paszkowski¹², J. Rozenberg¹³, F. Sheng¹⁴, V. Stenek¹⁵, S. Thacker¹⁶, E. Väänänen¹⁷, L. Vallejo¹⁸, T.I.E. Veldkamp¹⁹, M. van Vliet²⁰, Y. Wada²¹, P. Ward²², G. Watkins²³, C. Zorn²⁴. *Adaptation of Infrastructure Systems: Background Paper for the Global Commission on Adaptation*. Oxford: Environmental Change Institute, University of Oxford. 2019.
- [21] ISO 37123 szabvány
- [22] EC, 2018, Directive (EU) 2018/410
- [23] N. Faivre, M. Fritz, T. Freitas, B. de Boissezon, S. Vandewoestijne "Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges". *Environ Res.* 159:509-518. doi: 10.1016/j.envres.2017.08.032. Epub 2017 Sep 8. PMID: 28886502. 2017
- [24] Debrecen Megyei Jogú Város Fenntartható Városfejlesztési Stratégiája, 2021–2027
- [25] Debrecen Megyei Jogú Város Fenntartható Energia- és Klímaakcióterve (SECAP), 2017.
- [26] Debrecen Megyei Jogú Város Smart City Stratégiája

Sérült napelemek funkcionális működésének vizsgálata

Testing the functional operation of damaged solar panels

Kozsely Gábor^{1} – Bodnár István²*

¹Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros, gabor.kozsely@uni-miskolc.hu

²Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros, vegybod@uni-miskolc.hu

Összefoglaló: A napelemek szélsőséges időjárási körülmények között üzemelnek, így azok sérülésének veszélye nem hanyagolható el. A sérülések bekövetkezhetnek természeti jelenségek, mint például villámcsapás és jégeső következtében is. Azonban a legnagyobb gyakorisággal maga a napelem hőmérséklete okozza a sérülést, illetve a tönkremenetelt. A sérülések akár látható, akár mikroszkopikus méretűek, hasonlóan befolyásolják a napelem funkcionális működését. Tanulmányunkban sérült napelemek funkcionális működésének vizsgálatát mutatjuk be.

Kulcsszavak: napelemcella és -panel, állapotfelmérés, Flash-teszt, funkcionálisműködés-vizsgálat

Abstract: Solar panels operate in extreme weather conditions, so the risk of damage cannot be ignored. Damage can occur due to natural phenomena such as lightning and hail. However, the most common cause of damage or failure is the temperature of the solar panel itself. Damage, whether visible or microscopic, similarly affects the functional operation of the solar cell. In our study, we present an investigation of the functional operation of damaged solar cells.

Keywords: solar cell and panel, diagnostics, Flash-Test, functional operation test

1. BEVEZETÉS

Mindennapjaink szerves és nélkülözhetetlen részévé vált a villamos energia, amelynek felhasználása évről évre egyre nagyobb mértékeket ölt, ami jellemzően a környezet nagyobb mértékű terhelését vonja maga után. A környezetterhelés és a globális felmelegedés lassításának érdekében fontos, hogy a megtermelt villamos energia minél inkább megújuló energiaforrásokból származzon. Hazánkban a legnagyobb potenciállal a napenergia rendelkezik, amelyet a biomassza követ. Ahhoz, hogy a napenergia minél hatékonyabban legyen átalakítható villamos energiává, fontos a napelemek üzemkötésének vizsgálata, állapotának felmérése. A 2022. év első negyedében a magyarországi napelemes erőművek összkapacitása meghaladta a 3000 MW teljesítményt, és további 500 MW-nyi erőműépítés van folyamatban.

Korszerű diagnosztikai módszerek alkalmazásával a napelemek hosszú távú működésére és hatékonyságára lehet következtetni, továbbá az ismert hibákat feltárni és a negatív hatású körülményeket megszüntetni vagy éppen megelőzni. Ezen ismeretek nemcsak villamosenergetikai, hanem környezetvédelmi és gazdasági megtérülés szempontjából is fontosak, hiszen a napelemes rendszerek tervezett élettartama rendszerint 25-30 év. Azonban a tervezés, a telepítés vagy éppen az üzemeltetés során elkövetett hibák akár 10 évre is lerövidíthetik a napelemek élettartamát.

A napelemen fellépő hibák már rövid távon is nagyban befolyásolják – jellemzően csökkentik – a napelem energiatermelését és élettartamát, továbbá növelik a napelemes erőművek által okozott hálózati visszahatások mértékét. A hálózati visszahatás tekintetében az árnyékhatásban lévő, illetve a sérült napelemek azonos viselkedést mutatnak, mert a napelemes rendszerekben alkalmazott inverterek nagyobb szabályozási igényét eredményezik, amely következtében a hálózatba nagyobb felharmonikus tartalmú szinuszos áramot szolgáltatnak. Tehát megjelennek a műszaki szempontok is a villamos energia minőségi paramétereinek fenntarthatóságában.

Dolgozatunkban a napelempanelok szemmel észrevehető öt leggyakoribb hibáit gyűjtöttük össze. Vizsgálataink során valós erőművi üzemelési körülményekből származó, sérült napelemet vetettünk funkcionális működési vizsgálat alá. A méréseket laboratóriumi körülmények között végeztük, amely vizsgálatokból következtetni lehetett a napelem aktuális villamos paramétereire és karakterisztikáira.

2. NAPELEMEK TÖNKREMETELELE ÉS GYAKORI HIBATÍPUSAI

A degradáció egy alkatrész vagy egy rendszer jellemzőinek a fokozatos romlása, amely befolyásolja annak működését, hogy az elfogadhatóság határain belül működjön. A napelemknél a degradáció – a dióda jellegből adódóan –, egyrészt természetes alapon, másrészt a környezeti hatások révén indukált módon játszódik le. A napelem a degradációs folyamat során továbbra is elláthatja az elsődleges funkcióját, még akkor is, ha a használata már nem optimális. Azonban a modul problematikusává válhat, ha ez a degradáció eléri egy kritikus szintet. Ez a gyártók szerint

akkor következik be, amikor a teljesítmény lecsökken a kezdeti teljesítmény 80%-ára. Ez várhatóan 25 év alatt következik be [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9].

Egy napelem teljesítménye (hatékonysága) különböző tényezők miatt romolhat, mint például a hőmérséklet, a páratartalom, a besugárzás mértéke vagy a mechanikai behatás. Ezek különféle indukált öregedést, anyagszerkezeti átalakulást idézhetnek elő. Tipikusan korrózió, elszíneződés vagy akár repedések, törések keletkezhetnek egyes cellákon, de nem elhanyagolható a napelemeket borító edzett üveg térfogati és/vagy felületi struktúrájának a megváltozása sem. A napelemek degradációját szimulációs modellezéssel próbálják megjósolni, elsősorban anyagtechnológiai modellek segítségével. A teljesítménycsökkenési arány akár 0,6-5%/év is lehet, de a szimulációs értékek nem feltétlen a legpontosabbak, ugyanis a degradáció mértéke nemcsak a környezeti feltételektől, hanem az alkalmazott napelemtechnológiáktól is függ. Az amorf és a vékony rétegű napelem jelentősen nagyobb lebomlási sebességgel rendelkezik, mint egy polikristályos szilíciumalapú panel. Ma már széles körben elfogadott az az alaphipotézis, miszerint a napelemmodulok degradációs foka lineáris jellegű a hosszú távú működés során, de a működés megkezdésének első néhány évében a degradációs arány eltér a linearitástól. Ennek a jelenségnek a vizsgálatával számos kutató foglalkozik. A legszembetűnőbb eredmény, hogy az első évben az amorf szilícium akár 13,8%-kal, míg a kristályos szilíciumrendszerek akár 7,9-9%-kal szolgáltatnak kisebb teljesítményt [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9].

A napelemek tönkremenetelének időbeni lefutását a gyártók jellemzően két értékpárral adják meg. A napelemek első 10 évében 90%-os, az azt követő 15 évben pedig 80%-os teljesítménygaranciát adnak. A valóságban az üzemeltetés és karbantartás jellegétől függően ezen értékek jelentősen eltérhetnek. A gyakorlatban a napelemek hőmérséklete a leggyakoribb degradációs ok. A napelemeknek is van hőtehetlensége, így a változó megvilágítások során ún. hőmérsékleti transziens folyamatok játszódnak le. Ezek a folyamatok egyfajta hőkezelési ciklusnak tekinthetők, amely folyamat során indukált degradáció alakul ki. Egy panel részleges árnyékba kerülése vagy megnövekedett degradációja hőmérséklet-különbséget hoz létre a napelempanelen, ami tovább fokozza a teljes panel tönkremenetelét. E hatások lényegében gyorsító paraméterként tekinthetők, így a napelemeknek a gyártó által garantált használati időhöz képest korábbi tönkremenetelét eredményezik. Ezen indukált tönkremenetel mikrorepedések megjelenésével, a korábbi mikrorepedések kiszélesedésével, cellarészleválásával járhat [10].

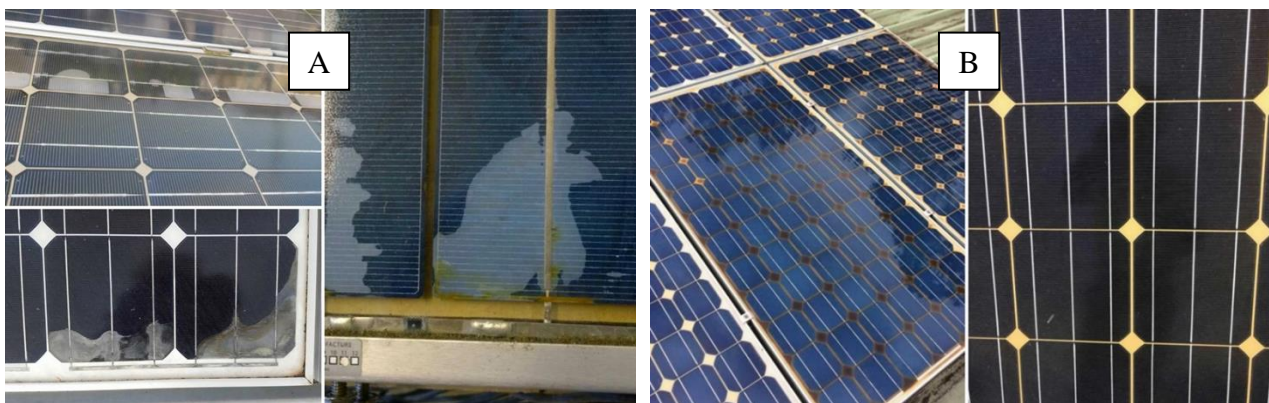
A leggyakoribb degradációs hibák [10] [11] [12] [13] [14]:

- rétegenkénti leválás,
- korrózió,
- elszíneződés,
- árnyékolás,
- mikro- és ujnyi méretű repedések,
- PID.

Delaminációnak vagy rétegenkénti leválásnak nevezzük azt a jelenséget, amikor az anyagfolytonosság a cellák között vagy a cella és az elülső üveg között következik be (1. ábra, A kép). Ez a jelenség két komoly problémát is kivált, egyrészt növeli a fényvisszaverődést, másrészt pedig elősegíti a víz behatolását a panel szerkezetébe. A rétegtávoldás akkor a legsúlyosabb, amikor a panel szélein fordul elő, ugyanis nemcsak teljesítményromlást okoz, de a villamos kapcsolódás kockázatát is jelenti. Ez a leválás meleg és nedves környezeti feltételek mellett a leggyakoribb. A szakirodalmi mérések azt állítják, hogy a delaminálódást a só felhalmozódása és a nedvesség behatolása okozhatja a panelekben [10] [11] [12] [13] [14]. A nedvesség, amely a panelba a laminált szélein jut be, korróziót okoz. A megnövekedett nedvesség növeli az anyag elektromos vezetőképességét. A korrózió továbbterjed a cellák fémes csatlakozásaira is, károsítva a cellák és a fémkeret közötti tapadást, és a szivárgási áramok növekedése miatt teljesítményvesztés lép fel. Az egyik kutatás azt vizsgálta, hogy milyen a cellák lebomlása adott páratartalom és hőmérséklet esetén. A vizsgálatot 85 °C-on és 85%-os páratartalom mellett végezték. A teszt kiértékelése után megállapították, hogy a korrózió 1000 óra után jelentkezett. Bizonyos modulokon végzett tesztek után kimutatták, hogy az üveg nátriumtartalma a nedvességgel reagál, és ez a modulok szélén jelentkező korrózióknak a fő tényezője. A nedvesség behatolásának megakadályozása a megfelelő tömítés, alacsony diffuzivitású, nagy mennyiségű szárítószert tartalmazó tömítések használatával lehetséges [10] [11] [12] [13] [14].

Az elszíneződést, más néven opálosodást általában az EVA (etilén-vinil-acetát) ragasztóanyag bomlása okozza az üveg és a cellák között (2. ábra, B kép). Az elszíneződés a cella színváltozása, amely sárga vagy néha barna színeként jelenik meg. Ez a jelenség csökkenti a cellákig eljutó fény intenzitását, ezáltal csökken a napelempanel által megtermelt villamos energia is. Az EVA lebomlásának fő oka az UV-sugárzás. Az elszíneződés a napelem különböző pontjain léphet fel, ennek okai a különböző karakterisztikájú polimerek. Ezen jelenség vizsgálatára mesterséges sugárzást használtak, ahol csak az UV-sugarak hozzájárulását nézték meg 280-380 nm hullámhosszúságú tartományban. Amikor 4000 W/m² volt a sugárzás felületegységre jutó teljesítménye, akkor a moduloknak a degradációja felgyorsult, és 400 óra után a fényérzékenység és az áteresztőképesség is növekedett. Ennek oka, hogy az UV-abszorber nyomása nő. Ezeken felül a cellák sárgulni kezdtek, ami teljesítménycsökkenést is okozott. Azonban 1000 W/m² sugárzásnál nem történt változás. További UV-teszteket végeztek a paneleken 60 °C hőmérséklet mellett, és azt állapították meg, hogy elszíneződés csak akkor következik be, amikor a globális UV-sugárzás eléri a 15 kWh/m²-t anélkül, hogy meghaladná a 250 W/m² expozíciót. Az elszíneződés hatással van a rövidzárlati áramra. A degradáció az elszíneződés mértékében lehet akár 6-

8%-ig, illetve akár 10-13%-ig is terjedhet. A panel maximális teljesítményére is negatív hatással van az elszíneződés [10] [11] [12] [13] [14].

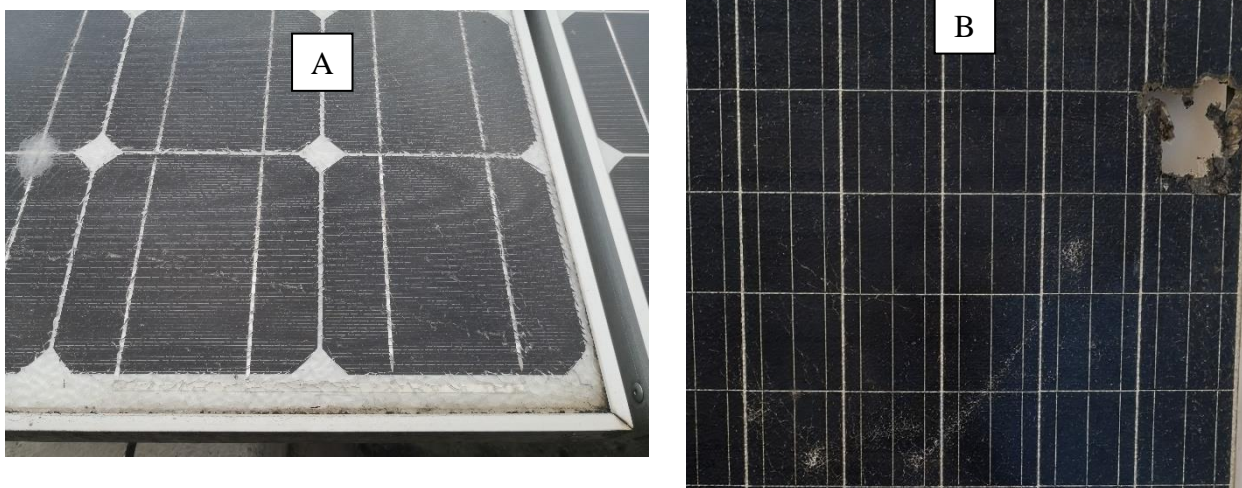


1. ábra. A delamináció vagy rétegleválás (A) és az opálosodás (B) jelensége napelemeken

A napelemek részleges árnyékolása nagyobb problémát jelent, ugyanis túlmelegedést és gyorsan bekövetkező meghibásodást is okozhat, ami kihat az egész modul működésére. Kutatómunkánk során különböző típusú napelempanelket vizsgáltunk részleges árnyékolásra vonatkozóan, különböző mértékű és helyzetű árnyakkal a modul hosszanti és keresztirányába egyaránt. Arra a következtetésre jutottunk, hogy az árnyékhatás növekedésével a kimeneti teljesítmény és a kapcsolófeszültség egyaránt csökken, a napelem átlaghőmérséklete pedig fokozatosan nő. Általánosságban elmondható, hogy a keresztirányú árnyékolás a modulon nagyobb teljesítménycsökkenést okoz, amely visszavezethető a panelen belüli cellasorok összekapcsolására. Ezért érdemes a napelemek úgy telepíteni, hogy ne legyen rájuk hatással semmilyen árnyékoló objektum, vagy ha ez nem megvalósítható, akkor az árnyékolás hosszanti irányba történjen, hogy minimalizálva legyen a teljesítményvesztés [10] [11] [12] [13] [14].

A repedések valódi problémát jelentenek a fotovoltaikus modulok számára. Az új típusú paneleken a repedéseknek viszonylag csekély hatása van mindaddig, amíg a cellák elektromos kapcsolatban maradnak. Azonban, ahogy a napelem „előregszik”, egyre több hő-, illetve mechanikai hatásnak van kitéve, és repedések keletkezhetnek. A különböző repedésirányok nagyon eltérő hatást gyakorolhatnak a modulok teljesítményére. Akár egy repedés is a cella megfelelő részén jelentősen csökkentheti a teljesítményt. A mikrorepedések akár 3-4%-os teljesítményvesztést is okozhatnak, ami jelentős gazdasági veszteséget is jelenthet [10] [11] [12] [13] [14].

Egy másik gyakori meghibásodási jelenség a napelemet borító üvegen fellépő repedés. Ez a hatás elsősorban jégeső következtében jön létre, azonban a napelemek szállítása és telepítése során is keletkezhetnek a belső mechanikai túlfeszültségek következtében. A fellépő mikrorepedések a napi hőingadozások hatására kitágulhatnak, és a teljes üvegfelületre továbbterjedhetnek. A 2. ábra A képe szemlélteti a jégeső okozta üvegrepedés hatását.

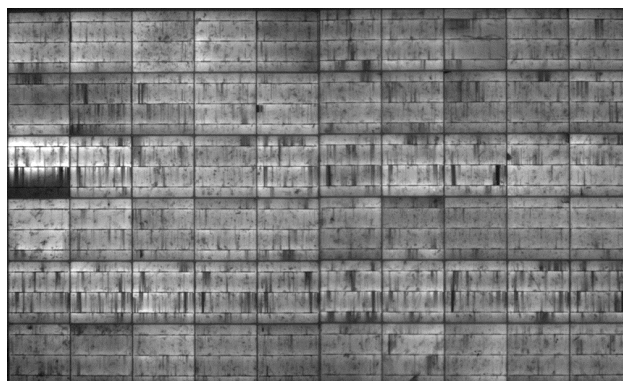


2. ábra. Jégeső (A) és villámcsapás (B) okozta repedések

Időnként a napelemek villámcsapást is szenvednek. Ilyen esetekben nemcsak az üveg reped be, hanem maga a napelemcella is sérülhet, vagy megéghet a becsapódás helyén. A 2. ábra B képe egy villámcsapást szenvedett napelemet mutat. A cellákban lévő repedések orientációja nagy szerepet játszik abban, hogy mekkora lesz a teljesítményromlás. Legjelentősebb a függőleges vagy többirányú repedés. Felmérések alapján a repedések 6%-a gyártás és a szállítás folyamán keletkezik. Ezért is fontos a telepítés előtti ellenőrzés és jóváhagyás, hogy megállapítsuk, vannak-e repedések,

illetve az esetleges repedés súlyosságát. A repedés akár teljes elválasztást is okozhat, ami inaktív cellát fog maga után vonni. A különféle repedések akár növekedhetnek is alakjuktól és elhelyezkedésüktől függően. Ennek több oka is lehet, például szállítás közbeni sérülés, környezeti terhelés, nem megfelelő telepítés. A repedések feltárásának egyik módszere az elektrolumineszcens vizsgálat. A 3. ábra egy általunk vizsgált napelem elektrolumineszcens felvételét mutatja, amin szabadszemmel is jól láthatók a mikroszkopikus és ujjnyi méretű repedések, cellatörések [10] [11] [12] [13] [14].

A napelemes rendszer egyes moduljai leggyakrabban sorba vannak kapcsolva a rendszer feszültségének a növelése érdekében. Ennek következtében a potenciálkülönbség időként akár több száz volt is lehet. Ezért a védelem érdekében minden fém szerkezetet leföldelnek. A potenciálkülönbség miatt lehetséges, hogy a napelemes modulokhoz használt anyagokból a földelt kereteken keresztül elektronok szivárognak, amikor a szerkezet és az aktív réteg kapcsolata nem tökéletes, és ekkor szivárgási áram jön létre. Ez a jelenség ronthatja a cellák villamos jellemzőit. Ezt nevezzük PID-nek (Potential Induced Degradation), azaz feszültség indukálta lebomlásnak (a teljesítmény fokozatos romlása a kristályos szilíciummodulok esetén). Kutatások kimutatták, hogy ez a jelenség a nedves éghajlaton sokkal nagyobb valószínűséggel fordul elő, illetve a szivárgási áram nagysága a növekvő páratartalom hatására nő [10] [11] [12] [13] [14].



3. ábra. Egy vizsgált napelempanel elektrolumineszcens felvétele

3. A SÉRÜLT NAPELEMOK FUNKCIONÁLIS VIZSGÁLATÁNAK EREDMÉNYEI

A gyártó a modulok teljesítményét a végső tesztnél úgynevezett villogó fényel (Flash) méri. Ezeket a laboratóriumi méréseket napfény-szimulátor segítségével végzik. A mérési folyamat során a napelemet a napfény-szimulátor segítségével villanófény világítja meg, míg a kapcsait változó ellenállással terhelik. Egyetlen villanás a másodperc ezredrészéig, így a Flash-teszt nagyon gyors vizsgálati eljárás. Laboratóriumi méréseink során egy négy éve üzemelő naperőműből származó, leszerelt és különböző módon megrongálódott napelemeket vetettük alá a Flash-tesztnek. A kapott eredményeket összehasonlítottuk egy referenciamodul értékével, amely ugyanolyan gyártmányú, de korábban nem használt napelem. A vizsgált napelemekre a gyártó által megadott tolerancia 3%. A mérések 25 °C-os modulhőmérsékleten, 1000 W/m² intenzitás mellett, homogén és merőleges beesési szög mellett történtek.

A vizsgált napelemek:

- hibátlan (4. ábra, A kép), Panel 1
- opálosodott (4. ábra, B kép), Panel 2
- delaminálódott (4. ábra, C kép), Panel 3
- jégvert (4. ábra, D kép), Panel 4
- villámcsapott (4. ábra, E kép), Panel 5

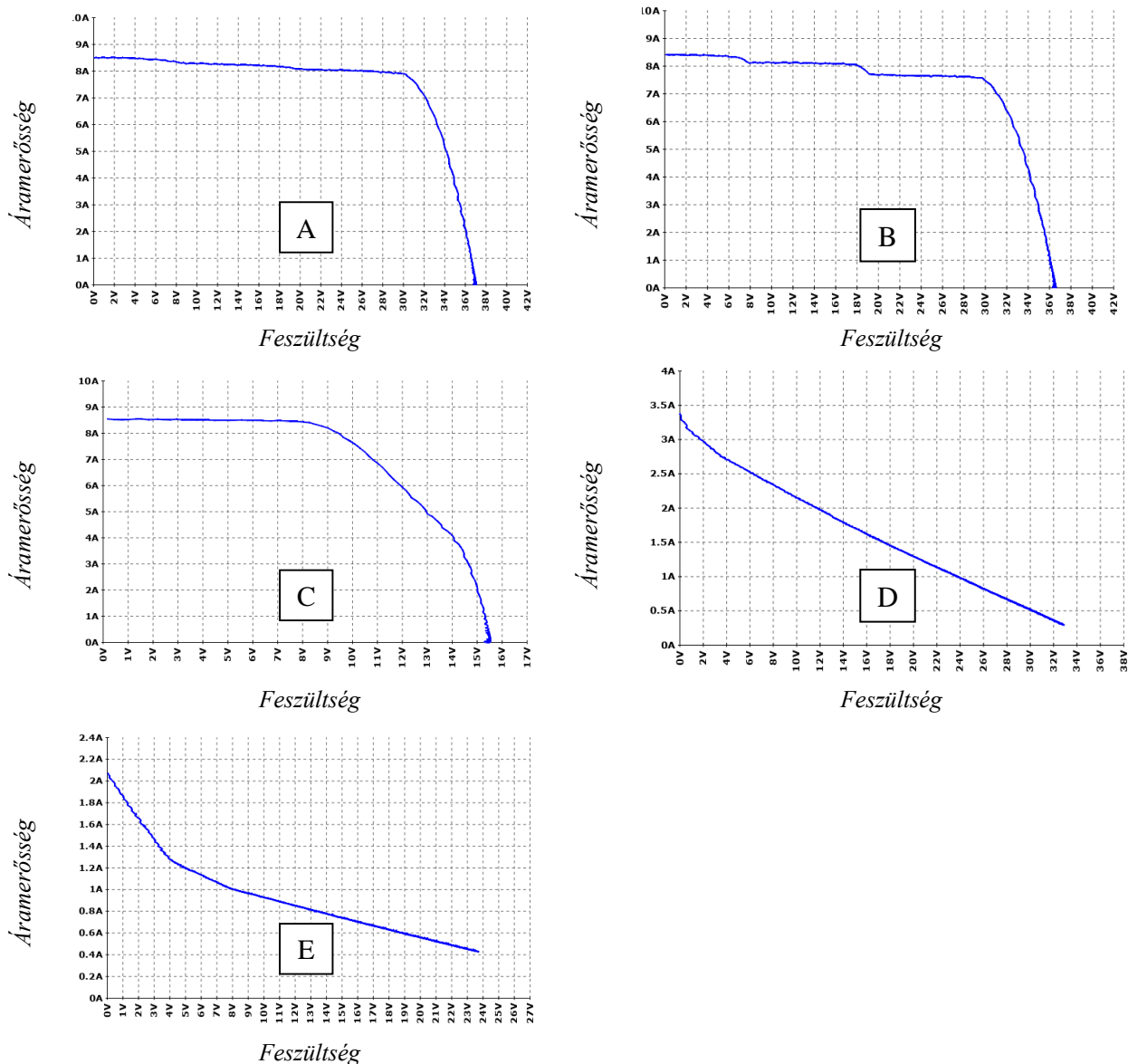
Az 1. táblázat a vizsgált napelempanelek villamos paramétereit tartalmazza. Mind a 4. ábrán a B képen, mind pedig az 1. táblázatban (Panel1) megfigyelhető, hogy az opálosodásnak csak kis hatása van a napelem működésére. Az opálosodott napelem teljesítménye 6,63%-kal volt kisebb, mint a hibátlanul működő panelé. Az opálosodott napelem I-U karakterisztikája (4. ábra, B kép), alig tér el a hibátlanul működő napelem (4. ábra, A kép) U-I karakterisztikájától.

A napelemekre a gyártó $\pm 3\%$ -os teljesítménytűrést adott meg. Továbbá a gyártó a napelem első üzemévére 3%-os, az azt követő 9 évre pedig évi 0,7%-os teljesítménycsökkenést prognosztizált. Tekintve, hogy a vizsgált napelemek 4 évet üzemeltek, az opálosodott napelem esetében a 3%-os negatív tűrést és a várható 5,1%-os élettartam-csökkenésből adódó teljesítménycsökkenést figyelembe véve további használatra alkalmasnak tekinthető.

A delaminálódott napelem feszültség-áram karakterisztikájában (4. ábra, C kép) egy erőteljes letörés látható, amely a delaminálódott cellák okozta termelékiesés miatt figyelhető meg. A delaminálódott napelem teljesítménye mindösszesen csak 32%-a a hibátlanul működő napelemnek. A delaminálódás a napelempanelen belül két cellasort érintett.

A jégkárt szenvedett napelem (4. ábra, D kép) és a villámcsapást szenvedett napelem (4. ábra, F kép) U-I karakterisztikái erőteljesen eltérnek a hibátlan napelem jelleggörbétől. A jégkár a napelemet borító teljes üvegen

repedéseket indított el, erősen sérült. A villámcsapott napelemen a becsapódás helyénél átszakadt, és az érintett cella szétégett. A felületen cikázó villám további repedéseket indított meg.



4. ábra. A napelemek Flash-tesztel kapott eredményei

1. táblázat. A vizsgált napelemek Flash-tesztel kapott villamos paraméterei

	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Panel 4	Panel 5
Aktuális teljesítmény	279,77	261,22	89,54	30,98	13,65
Munkaponti feszültség	35,42	34,54	11,78	22,47	21,96
Munkaponti áramerősség	7,898	7,562	7,602	1,379	0,621
Üresjáratú feszültség	37,02	35,56	15,45	32,85	23,64
Rövidzárási áramerősség	8,449	8,408	8,528	3,355	2,074

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkánk során sikerült rámutatnunk arra, hogy a napelemek a környezeti hatások miatt képesek meghibásodni, tönkremenni jóval a várható élettartamuk előtt. A leggyakoribb sérülések közül az opálosodás, a

delaminálódás, a jégkár és a villámkár villamos paraméterekre és feszültség-áramerősség karakterisztikára gyakorolt hatását vizsgáltuk. Kimutattuk, hogy az opálodódás hatása elhanyagolható, a teljesítménycsökkenésre gyakorolt hatása természetes öregedésnek is betudható. Az opálosodott napelem további használatra alkalmasa. A delaminálódás, az erős jégkár és a villámcsapás hatása azonban jelentősen csökkentette a napelem teljesítményét, és a V-I jelleggörbéjét is erősen torzította, így ezek a napelemek további használatra nem alkalmasak. A sérült napelemek hatást gyakorolnak az adott stringben lévő többi napelem működésére. Amennyiben egy stringen belül több napelem is sérült, meghibásodott, akkor az az egész string működésképtelenségéhez vezethet, így a sérült napelemek mihamarabbi cseréje szükséges a hosszú távú termelés kiesés elkerülése érdekében.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] E. Skoplaki, J.A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations." *Solar Energy*. 2009. Vol. 83. No. 5. pp. 614–624.
- [2] A. Ndiaye, C.M.F. Kébe, B.O. Bilal, A. Charki, V. Sambou, P.A. Ndiaye, "Study of the Correlation Between the Dust Density Accumulated on Photovoltaic Module's Surface and Their Performance Characteristics Degradation." *Innovation and Interdisciplinary Solutions for Underserved Areas*. 2018. pp. 31–42.
- [3] S. Oh, B.W. Figgis, S. Rashkeev, "Effect of thermophoresis on dust accumulation on solar panels." *Solar Energy*. 2020. Vol. 211. pp. 412–417.
- [4] A.S. Alghamdi, A.S. Bahaj, L.S. Blunden, Y. Wu, "Dust Removal from Solar PV Modules by Automated Cleaning Systems." *Energies*. 2019. Vol. 12. paper. 2923.
- [5] E. Klugmann-Radziemska, E. Shading, "Dusting and Incorrect Positioning of Photovoltaic Modules as Important Factors in Performance Reduction." *Energies*. 2020. Vol. 13. paper. 1992.
- [6] S. Tang, Y. Xing, L. Chen, X. Song, F. Yao, "Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels." *Solar Energy*. 2021. Vol. 214. pp. 51–61.
- [7] A. Gerber, V. Huhn, T.H.M. Tran, M. Siegloch, Y. Augarten, B.E. Pieters, U. Rau, "Advanced large area characterization of thin-film solar modules by electroluminescence and thermography imaging techniques." *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. Vol. 135. pp. 35–42.
- [8] A.M. Salazar, E.Q.B. Macabebe, "Hotspots Detection in Photovoltaic Modules Using Infrared Thermography." *MATEC Web Conf*. 2016. paper. 10015.
- [9] I. Berardone, J. Lopez-Garcia, M. Paggi, "Analysis of electroluminescence and infrared thermal images of monocrystalline silicon photovoltaic modules after 20 years of outdoor use in a solar vehicle." *Solar Energy*. 2018. Vol. 173. pp. 478–486.
- [10] J. Carolus, J.A. Tsanakas, A. Heide, E. Voroshazi, W. Ceuninck, M. Daenen, "Physics of potential-induced degradation in bifacial p-PERC solar cells." *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019. Vol. 200. paper. 109950.
- [11] M. Barbato, A. Barbato, M. Meneghini, G. Tavernaro, M. Rossetto, G. Meneghesso, "Potential induced degradation of N-type bifacial silicon solar cells: An investigation based on electrical and optical measurements." *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 168. pp. 51–61.
- [12] J. Šlamberger, M. Schwark, B.B. Van Aken, P. Vrtič, "Comparison of potential-induced degradation (PID) of n-type and p-type silicon solar cells." *Energy*. 2018. Vol. 161. pp. 266–276.
- [13] Z. Kherici, N. Kahoul, H. Cheghib, M. Younes, B.C. Affari, "Main degradation mechanisms of silicon solar cells in Algerian desert climates." *Solar Energy*. 2021. Vol. 224. pp. 279–284.
- [14] R. Asadpour, X. Sun, M.A. Alam, "Electrical Signatures of Corrosion and Solder Bond Failure in c-Si Solar Cells and Modules." *IEEE Journal of Photovoltaic*. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 759–767.

A napenergia szerepe a magyarországi villamosenergia-termelésben

The role of solar energy in electricity generation in Hungary

Matusz-Kalász Dávid*

Miskolci Egyetem, 3515 Miskolc-Egyetemváros, elkmkd@uni-miskolc.hu

Összefoglaló: Egy évtizeddel ezelőtt a magyarországi naperőművi kapacitást jellemzően a kis méretű háztartási erőművek alkották. Az utóbbi években elkezdődött a nagy méretű, közcélú naperőművek építése, amelyeknek villamosenergia-rendszerbe való illesztése komoly kihívásokat tartogat. Ebben a rövid tanulmányban alapvetően statisztikai adatokra alapozom a megállapításaimat, többek között, hogy a beépített naperőművi kapacitás és az éves szinten napenergiából megtermelt villamos energia között nagyjából 10-15%-os eltérés figyelhető meg.

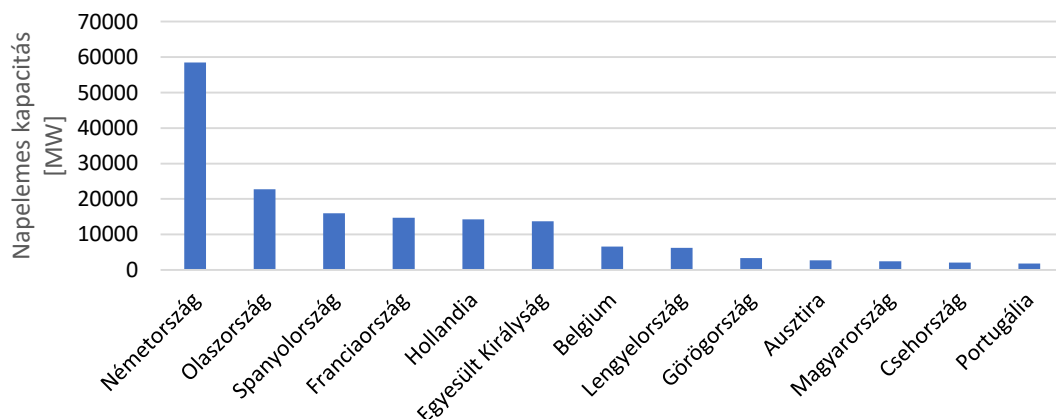
Kulcsszavak: napelem, villamosenergia-termelés, teljesítménycsökkenés

Abstract: A decade ago, the capacity of solar power plants in Hungary was typically made up of small household power plants. In recent years, the construction of large-scale public solar power plants has begun, the integration of which into the electricity system poses serious challenges. In this short study, I base my findings on statistical data, including the fact that there is a difference of roughly 10-15% between the installed capacity of a solar power plant and the electricity generated from solar energy on an annual basis.

Keywords: solar cell, electricity generation, power reduction

1. BEVEZETÉS

Tíz évvel ezelőtt Magyarország a beépített napelemes kapacitás európai rangsorában a 20. hely körül volt rangsorolva, ellenben az utóbbi években a 10. hely közelében található. Az Európai Unió élmezőnyében a nagy népességű és hazánknál sokkal nagyobb gazdasági teljesítőképességű országokat találjuk, Németország, Olaszország, Spanyolország, Franciaország és Hollandia sorrendben. Az első tizenben találjuk még Belgiumot és Lengyelországot, ezen országok rendelkezésre álló kapacitása is kétszer akkora, mint hazánké. Érdekesség, hogy sok éven át az Egyesült Királyság is az élmezőny része volt, azonban az elmúlt öt évben jóval kisebb mértékben telepítettek új erőműveket (valamint egy ideje nem EU-tagállam). Ugyanakkor a beépített erőművi kapacitás értéke önmagában nem tükrözi az adott ország villamosenergia-rendszerében betöltött szerepét. A több mint 16 millió fős lakosú Hollandiának közel azonos napelemes erőműparkja van, mint a több tízmilliós Egyesült Királyságnak vagy Franciaországnak.



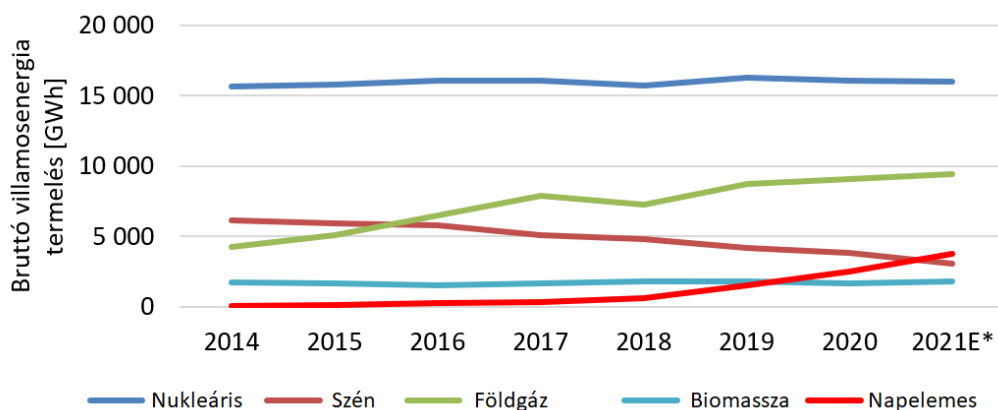
1. ábra. A legjelentősebb napelemes kapacitással rendelkező európai országok 2021-ben [1]

Szoros versenyben állunk olyan országokkal, mint Ausztria, Csehország, Görögország és Portugália. Ezek hasonló területű és lakosságszámú országok, közel hasonló természeti adottságokkal. Habár ki kell emelni Görögországot és Portugáliát, amelyek közelebb helyezkednek a Ráktérítőhöz, így ebben a két országban nagyobb az egy négyzetméterre jutó és hasznosítható napenergia mennyisége. Továbbá érdemes megfigyelni, hogy Görögország már éveken keresztül elérte a 2000-3000 MW beépített kapacitásértéket Csehországhoz hasonlóan, és ez az érték azóta stagnál, érdemben csak a tavalyi évben növekedett. Ez a tendencia figyelhető meg még Románia, Szlovákia, Bulgária és Szlovénia esetében is.

A felsorolt országok közül Romániából érkeztek olyan hírek az utóbbi években, hogy a megújuló energiaforrások villamosenergia-termelésben betöltött növekvő szerepe gondokat okoz a rendszerfelügyelet számára azok kiszabályozása végett. A nehezen kontrollálható megújuló energiaforrások, jellemzően a szélenergia, olyan hirtelen ingadozásokat okoznak a villamosenergia-rendszer termelési oldalán, amelyek nem követik a fogyasztási oldal igényeit és tendenciáit, így nagyobb valószínűséggel fordulhatnak elő rendszerszintű áramkimaradások.

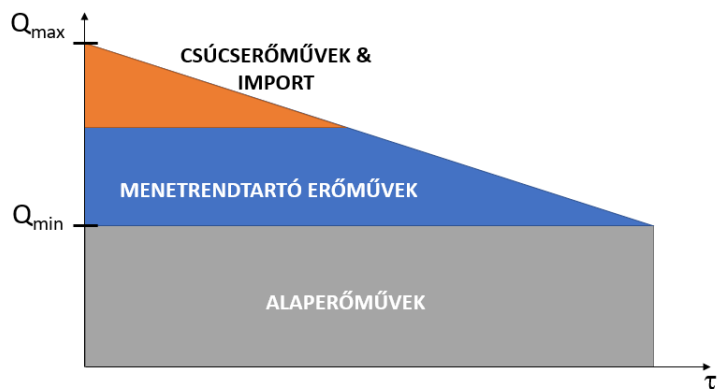
2. A MAGYARORSZÁGI VILLAMOSENERGIA-TERMEELÉS 2021-BEN

Ahogy azt a 2. ábra mutatja, az utóbbi években a hazai villamosenergia-termelés jelentős részét a Paksi Atomerőműben állították elő. A széntüzelés visszaszorulásával a földgázüzemű menetrendtartó erőművek léptek elő a képzeletbeli dobogó második fokára, valamint 2021-ben a napelemes energiatermelés is megelőzte a széntüzelést, ezzel előrelépett a harmadik helyre. Jól észrevehető a napenergia dinamikus térnyerése, azonban ez az érték még mindig jelentősen elmarad a nukleáris és földgázalapú energiatermeléstől. Ennek legfőbb oka, hogy a napelemes erőművek kihasználtsága rendkívül alacsony, csupán 10-15%. Kihasználtság alatt azt a jellemzőt értem, hogy míg a Paksi Atomerőmű 2000 MW kapacitással szinte folyamatosan, alaperőműként üzemel, addig a napelemes erőművek 3000 MW-os összes kapacitása napi ciklikussággal és napi szinten csak 1-2 órán át termel ezen csúcserőmű közelében.



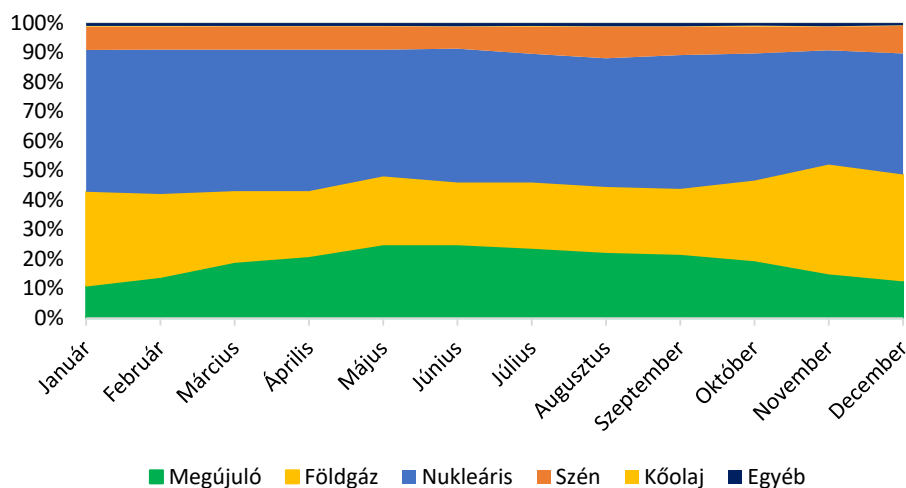
2. ábra. A különböző energiaforrásokkal termelt hazai villamos energia 2021-ben [2]

A 3. ábra hivatott bemutatni és összehasonlítani egy általános közcélú erőművi rendszer erőműtípusainak éves kihasználtságát. Ezen ábra mutatja, hogy minden közcélú villamosenergia-termelő rendszernek rendelkeznie kell megbízható alaperőművekkel, amelyek éjjel-nappal, az év minden évszakában közel állandó teljesítményt adnak le, lehetőleg olcsón. A nagymértékű fogyasztási ingadozásokat hivatottak kiegyensúlyozni a menetrendtartó erőművek, melyek már alacsonyabb kihasználtsággal üzemelnek ugyan, viszont az alaperőművekkel ellentétben sokkal rugalmasabbak, azokhoz képest gyorsabb indulási és leállítási idővel rendelkeznek. Jellemzően ezek a földgáz- és kőolajüzemű erőművek, valamint a megújuló energiaforrások közül a nap- és szélenergia sorolható ebbe a kategóriába. Ezt az erőművi rendszert egészítik ki a csúcserőművek és a környező országokból importált villamos energia [3].



3. ábra. A közcélú erőművi rendszer erőműtípusainak éves kihasználtsága

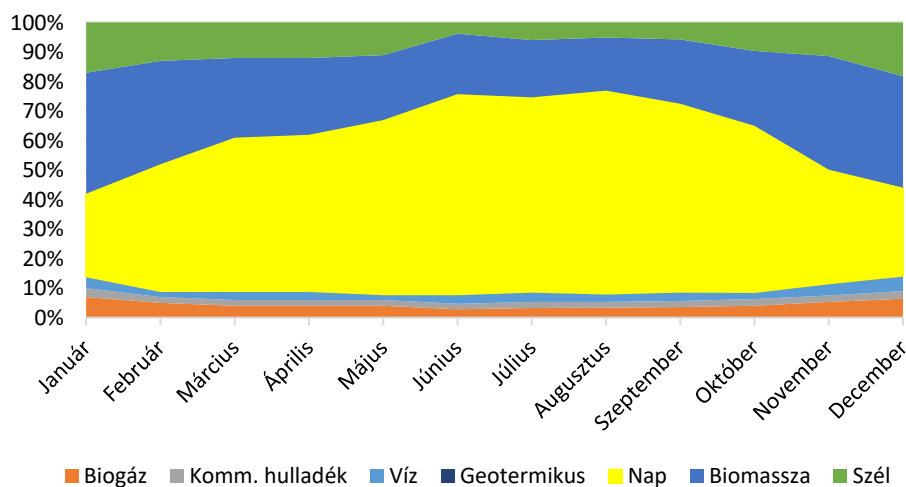
A 4. ábrán jó megfigyelhető a szén- és nukleáris tüzelőanyagú erőművek alaperőművi szerepe, mivel szinte egész évben közel állandó villamos energiát szolgáltatottak. A nukleáris forrásból származó energia részaránya februárban volt a legmagasabb, 49%, míg novemberben volt a legalacsonyabb, 38%. A megújuló energiák és a földgáz menetrendtartó szerepe is könnyen belátható. Földgáz esetén a maximális és minimális részesedés között jóval nagyobb különbség állt fenn. Novemberben 37%-os részarányban volt a legmagasabb, míg júniusban 21% volt az éves szinten szolgáltatott legalacsonyabb részarány a földgáz esetében. A nyári időszakban érte el a maximális értékét a megújuló energiaforrásokból származó energiatermelés részaránya, ami közel 25% volt. Ellenben a téli időszakban a januári 11% volt a legkisebb részesedési arány, amit a földgáz egyensúlyozott ki.



4. ábra. A megtermelt bruttó villamos energia százalékos megoszlása energiaforrások szerint 2021-ben [4]

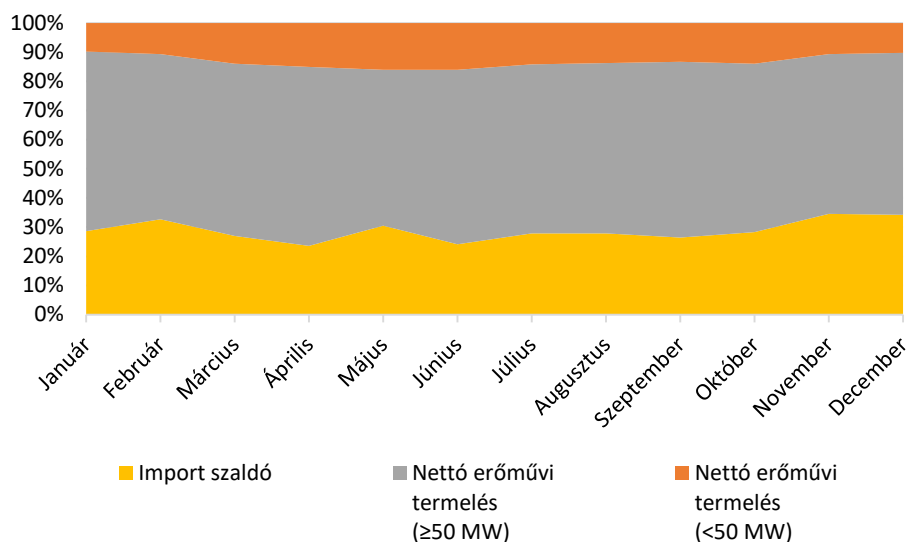
3. A MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOK ÉS A HAZAI VILLAMOSENERGIA-RENDSZER KAPCSOLATA

A megújuló energiaforrásból termelt villamos energia éves eloszlása az utóbbi években teret nyert napenergia szerepére vezethető vissza. Mivel a legtöbb megújuló energiaforrás beépített erőművi kapacitása nem változott, így a megtermelt áram mennyisége is közel állandó. Az 5. ábra jól prezentálja a napenergia dominanciáját az év túlnyomó részében. Maximális részesedését augusztusban érte el a megújuló energiaforrások között, akkor ez az arány közel 69% volt. Január hónapban szorult leginkább vissza a napenergia részesedése, amikor csak 28%-t tett ki. A második legjelentősebb megújuló energiaforrás a szilárd biomassza volt 2021-ben. Éppen ellentétes tendenciát mutatott a napenergiával, mivel a maximális 41%-os részesedését januárban, míg a minimális 18%-os részesedését augusztusban érte el.



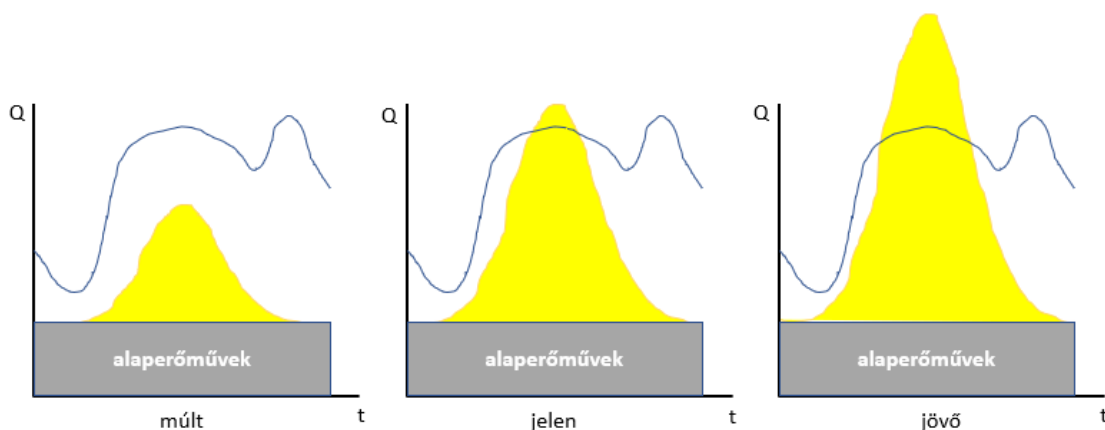
5. ábra. A megújuló energiaforrásból termelt villamos energia százalékos megoszlása 2021-ben [4]

A 6. ábra a magyar villamosenergia-rendszer importfüggőségét mutatja be a tavalyi év (2021) adatai alapján. 2021-ben a hazai fogyasztói igényeket 30%-ban külföldről importált villamos energia szolgáltatta ki. Az import mértéke április és június hónapokban volt a legalacsonyabb, ami 24%-os arányt jelentett. Megfigyelhető, hogy a nyári hónapokban az import mértéke mérséklődött, és inkább csak a téli hónapok során ért el 30%-nál nagyobb értéket. Továbbá az 50 MW-nál kisebb erőművi állomány jellemzően márciustól októberig termelt nagyobb mértékben, amit a nagy számban előforduló napelemes erőművi kapacitás eredményez ezen kategórián belül, mivel a hazai HMKE (háztartási méretű kiserőmű) kapacitás túlnyomó része napelemes, valamint a nagyobb (közcéli) napelemes erőművek többsége 50 MW alatti. Ez a tendencia a 4. és 5. ábrán is megfigyelhető.



6. ábra. A hazai villamosenergia-rendszer által szolgáltatott energia származásának megoszlása 2021-ben [5]

A 7. ábra szemléletesen ábrázolja a villamosenergia-termelés és -fogyasztás kapcsolatát átlagos napi, nyári időszakban. Az importfüggőség csökkenése a naperőművek menetrendtartó jellegéből következik (6. ábra). Az éjszakai völgyidőszak (alacsony energiaigény) után jellemzően növekedni kezd az energiaigény, amit a naperőművek az alaperőművekkel együtt jól lekövetnek. Évekkel korábban a hazai naperőművi kapacitás még nem volt képes meghaladni a fogyasztói igényeket, azonban tavaly és az idei év folyamán ez az állapot megváltozott. Tavaly számos nyári nap folyamán meghaladta a naperőművek által termelt energia a Paksi Atomerőmű által szolgáltatott mennyiséget, idén pedig már olyan időszakok is előfordultak, amikor a hazai rendszer exportált villamos energiát az import helyett. Ugyanakkor ez a lüktető, impulzusszerű energiatermelés nem teszi lehetővé, hogy a naperőművek alaperőművekként üzemeljenek. A leghatékonyabb megoldás az lenne, ha Magyarország rendelkezne számottevő vízerőművi kapacitással, ami kiegészíthetné a naperőművek energiatermelését, valamint a szivattyús-tározós erőművek képesek lennének kezelni azt a megtermelt többletenergiát, amelyre már nincs napközben igény.



7. ábra. A hazai villamosenergia-rendszer által szolgáltatott energia származásának megoszlása 2021-ben

4. A NAPERŐMŰVEK ÜZEMI PROBLÉMÁI

Jelenleg a hazai villamosenergetikai hálózat hiányosságai jelentik a napelemes energiatermelés további térnyerésének legnagyobb gátját. A villamos hálózatunk jellemzően elavult, régi struktúrákból áll, amelyeknek rugalmatlansága az egyik gátló tényező. Továbbá a napelemes energiatermelés számára a jelenleg kiépített, centralizált hálózat helyett egy decentralizált hálózatra lenne szükség. Az egymással versengő szolár inverterek eltorzíthatják a hálózati feszültség szinteket, valamint a folyamatosan változó fényviszonyok miatt felharmonikusokat is termelnek a hálózatra [6].

A hálózati problémákon túl érdemes megemlíteni, hogy a napelemek természetes és környezeti tényezők által felerősített élettartam-csökkenése jelentősen csökkenti a megtermelt villamos energia mennyiségét. Egy átlagos napelempanel az első év során 3-4%-ot veszít a teljesítményéből, a 10. évben ez a veszteség már 10%, míg 25 év elteltével 20% is lehet. Ez azt jelenti, hogy a napelemek öregedése okán a megépített napelemes erőművi kapacitás és a termelt áram mennyisége között akár 10-15%-os negatív eltérés is megjelenhet.

A napelemek veszteségét, illetve a természetesnél gyorsabb élettartam-csökkenését három fő tényező befolyásolja. Ezen tényezőket egyrészt a konstrukciós veszteségek, másrészt a tervezési és telepítési, harmadrészt az üzemeltetési problémák jelentik. A technológia és az anyaghasználat okozta hatásfokmaximumokon kívül a kész napelemek használata során fellépő külső tényezők is csökkenthetik a modulok hatékonyságát. A szennyezett cellák, a hőmérséklet és a terhelés mértéke sorolható ezen környezeti körülmények közé. A napelemmodulok karbantartást szinte nem igényelnek, ugyanakkor az üzemeltetésük során felmerülő felületi szennyeződés hatékonyság- és élettartam-csökkentő hatását nem hanyagolhatjuk el. Az évi villamosenergia-veszteség jelentős lehet, világszinten az értéke elérheti átlagosan a 17%-ot is, extrém nagy szennyezettségűnél (pl. sivatagi környezetben) akár az 50-70%-ot is. A napelemcellák hőmérséklete az átmeneti ellenállás-növekedés okozta hőképződés és a hőszigetelő rétegeként viselkedő szennyeződés miatt jelentősen megnőhet. A folyamat jellemzése nem egyszerű, hisz rengeteg tényező befolyásolja. A továbbiakban pontokba szedve mutatom be a legfontosabb paramétereket, amelyek összefüggést adnak a napelem felületi szennyeződése és a hatásfokromlás, valamint az élettartam-csökkenés mértéke között [7].

A lokális szennyeződések (például: madárürülék) nem elhanyagolható mértékben befolyásolhatják a napelem teljesítményét. A kristályos napelemeknél még kritikusabb e típusú szennyezés megléte, hisz a sorba kötött cellákból álló egység hatékonyságát jelentősen csökkenti egy-egy cella foltosított szennyeződése. A teljes napelem felületét betakaró por vagy egyéb szennyező réteg is káros hatással van a napelem megfelelő működésére. E lerakódások a nem megfelelő tisztítás következtében egymásra halmozódhatnak, az évek során egyre vastagabb és tartósabb „takaróréteget” képezve a napelem hasznos felülete előtt, és idővel képes beépülni, bediffundálni a napelempanelt borító üveglap felületébe, megváltoztatva annak struktúráját. A sarkokban kiemelkedően jelentős lehet a szennyező anyagok felgyülemelése, hisz ezeken a felületeken az eső tisztító hatása nem érvényesül kellőképpen. A vastag lerakódások a cellák túlhevülését is okozhatják, mert hőszigetelőként viselkednek. Ha egy cella károsodik, akkor a vele sorba kötött cellák is kieshetnek az energiatermelésből, így a napelem hatásfoka és élettartama is csökken.

Mivel a napelem felületén lerakódó porok közvetlenül fizikai kapcsolatba kerülnek a napelemmel, ezért az árnyékhatás mellett hőszigetelési problémákat is felvetnek, amelyek előre nem pontosan ismertek, dinamikusan változnak, ezért nehezen számszerűsíthetők. A valós hatások elsősorban kísérleti úton ismerhetők meg. Magyarországon a leggyakoribb szennyező anyag a szálló por. Az Egyenlítőhöz közeledve a sivatagi homok, míg a nagyvárosokban a közlekedésből származó légszennyező anyagok okozzák a legnagyobb problémát. Időnként az úgynevezett transzporok is megjelennek. Mivel az egyes szennyezőanyag-források szemcseméretében, sűrűségében és fényáteresztő képességében jelentős eltérések tapasztalhatók, ezért azok napelemek termelésére gyakorolt hatásai is igen széles skálán mozognak. Európában éves szinten akár 5-20%-os termelés kiesést okozhatnak a szennyeződések. Egyes szennyező anyagok, mint például a homok, formájukat és keménységüket tekintve karcoló, koptató hatást is kifejtenek a napelem felületén, ami a felületi struktúra megváltozását és maradé hatásfokromlást okoz. Eltávolításuk száraz tisztítási módszerekkel nem célszerű. Ilyen szennyező anyagoknál víz vagy speciális tisztítófolyadék alkalmazása javasolt [8].

A lágy, kis szemcsés anyagok mellett, hogy elektrosztatikusan tapadnak a napelem felületéhez, képesek bediffundálni a napelemet borító üveg vagy műgyanta szerkezetébe. Ennek következtében eltűnhetnek a felületi barázdák, azonban ez egyben az üveglap elszíneződését is okozhatja. A szálló porok jelentős része egy esőzést követően lefolyik a napelem felületéről, azonban a napelem sarkain feltorlódhat, és iszapos réteget képezhet. Ez további problémákhoz vezethet, elsősorban túlhevülést okozhat. A szálló pornál nagyobb problémát a növényi eredetű maradványok, mint például a falevél és az állati eredetű termékek, mint a madárürülék okoz. Amennyiben csak egy kis része szennyeződik a napelemnek, és nem az egész árnyékolódik, akkor a ByPass diódák nem aktiválódnak, és a Hot-Spot jelenség is kialakulhat, ami hosszabb távon visszafordíthatatlan kárt okoz a napelemben [9] [10].

Mivel az árnyékhatásnak kitett cella árnyékoláskor fűtőellenállásként viselkedik, az azon átfolyó áram további hőt generál. A szennyező anyag gátolja ennek a hőnek a kisugárzását, ezért a cella túlmelegszik. A lokális túlmelegedés a cellák kiégését okozhatja, ami a teljes napelempanel működésére hatással van. Csökken a panel áramerőssége, feszültsége és a teljesítménye, tehát a hatásfoka és természetesen az élettartama is. Amennyiben egy panelen belül több cella is kiég, akkor az a panel működésképtelenségéhez is vezethet, és elkerülhetetlen a cseréje. Ezért célszerű ezeket a szennyeződések mihamarabb eltávolítani. A madárürülék eltávolítása a legnehezebb feladat. Hatékonyan csak napelemtisztító folyadék vagy nagy nyomású lágyított víz alkalmazásával távolítható el. A túl kemény víz a száradást követően vízkőfoltokat hagy a napelem felületén, ami szintén csökkentheti annak teljesítményét. A napelem tisztítását

nem minden esetben végzi el az eső, általában a 9-10 mm-nél kisebb csapadék csak elmaszatolja a szennyező anyagokat, éppen ezért a napelemek tisztítására erőműmérettől függően különböző módszereket dolgoztak ki. A kis méretű robotoktól kezdve a takarító járművekig széles választék áll a rendelkezésünkre. Számítások szerint a napelemek gépesített tisztítása ugyan nagyobb költséggel jár, mint a poros napelemek termelés kiesése okozta bevételkiesés, azonban az élettartam-csökkenés elkerülése érdekében szükségessé válhat annak időközönkénti elvégzése a telepítés környezeti adottságainak függvényében.

ÖSSZEFOGLALÁS

Előszörban a villamos hálózat fejlesztésnek fontosságát és szükségességét emelném ki. Legjobb tudomásom szerint számos átalakítás és átépítés folyamatban van, mint például az alállomások esetében. Továbbá tudatos stratégiára van szükség, így megnyugtató azt látni, hogy a MAVIR az utóbbi időszakban korlátozni kezdte az újonnan létesíthető napelemes kapacitások mennyiségét. Ez a kényszerű korlátozás első hallásra drasztikusnak tűnhet, azonban fontos meglátás a hálózatfelügyelet részéről, biztosítja a tudatos, hosszú távú fejlődést a jövőben, amikor a villamos hálózat fejlesztése utoléri a napelemes kapacitás bővülését, ezzel kiküszöbölve az esetleges hálózati problémákat.

A napelemes erőművek üzemeltetése során egyre nagyobb problémát okoznak a napelemek felületén lerakódó porok, szennyező anyagok. A szennyeződések hatása többrétű. Egyrészt árnyékhatást okoznak, így a takartság miatt csökken a panel villamosenergia-termelése. Másrészt az árnyékhatás miatt megnő az érintett cella belső ellenállása. Az ellenállás-növekedés hatására a rajta átfolyó áram további hőt képez, így melegíti a cellát. Egyes szennyező anyagok hőszigetelő tulajdonsággal bírnak, így a szennyezett cellákon képződő hő nem tud átadódni a környezetnek. Az árnyékolódott, szennyezett cellák hőmérséklete akár 40-50 °C-kal is magasabb lehet, mint a tiszta celláké. A témában számos kutatást végeztem, melyeket kollégáimmal közösen publikáltam.

Végző soron úgy vélem, a szemléletváltás lenne a legsürgetőbb a megújuló energiák terén. Számos esetben a napelemes energiatermelés csupán egy befektetési lehetőség, az erőművek tönkremenetele után kérdésessé válhat azok elbontása, semlegesítése.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] "IRENA, International Renewable Energy Agency," 2021. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>
- [2] „MEKH, Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal,” 2022. [Online]. Available: <http://www.mekh.hu/eves-adatok>
- [3] „MEKH, Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal,” 2022. [Online]. Available: <http://www.mekh.hu/energiastatisztika-riport>
- [4] I. Bodnár, Villamosenergetika és biztonságtechnika, Miskolc : Miskolci Egyetem, 2019.
- [5] „MAVIR, Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító,” 2021. [Online]. Available: <https://www.mavir.hu/web/mavir/havi-piac-jelentesek>
- [6] R.R. Boros és I. Bodnár, "Grid and PV Fed Uninterruptible Induction Motor Drive Implementation and Measurements," *Energies*, 15, 3, 708, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15030708>
- [7] A. Ndiaye, C.M.F. Kébe, B.O. Bilal, A. Charki, V. Sambou, P.A. Ndiaye, "Study of the correlation between the dust density accumulated on photovoltaic module's surface and their performance characteristics degradation," *Innov. Interdiscip. Solut. Underserved Areas*, 204, pp. 31–42, 2018,.
- [8] D. Matusz-Kalász és I. Bodnár, "Operation Problems of Solar Panel Caused by the Surface Contamination," *Energies*, 14, 5461, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14175461>
- [9] M. Dhimish, V. Holmes, P. Mather, M. Sibley, "Novel hot spot mitigation technique to enhance photovoltaic solar panels output power performance," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 179, pp. 72–79, 2018.
- [10] S. Deng, Z. Zhang, C. Ju, J. Dong, Z. Xia, X. Yan, T. Xu, G. Xing, "Research on hot spot risk for high-efficiency solar module," *Energy Procedia*, 130, pp. 77–86, 2017.

A fosszilis és megújuló energiák helyzete Magyarországon

The situation of fossil and renewable energies in Hungary

Tóth József Barnabás^{1} – Fesztóry Ottó²*

¹ Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, Jármű és- Mezőgazdasági Géptani Tanszék, Nyíregyháza, Sóstói út 31/b, toth.jozsef@nye.hu

Összefoglaló: Földünk fosszilis energiahordozói korlátozott mennyiségben állnak rendelkezésre, és a készletek földrajzi megoszlása egyenlőtlen. Napjainkra ezért egyre gyakoribbak a nemzetközi feszültségek és konfliktusok, amelyeknek kiéleződése folyamatosan fokozódik. A legutóbbi gazdasági világválság, a 2014-es orosz–ukrán válság és a 2022-es háború, valamint a súlyos energetikai szankciók mind inkább abba az irányba mutatnak, hogy egyre nagyobb szükség van a megújuló energiák fokozott felhasználására és nagyarányú alkalmazására. Éppen ezért figyelmet kell fordítanunk Magyarországon jelenlegi fosszilis és megújuló energetikai helyzetére és jövőbeli fejlesztési lehetőségeire.

Kulcsszavak: megújuló energiák, fosszilis energiahordozók, napenergia, szélenergia, biomassza, energiatermelés

Abstract: Our Earth's fossil fuels are in limited supply, and the geographical distribution of these reserves is unequal. Nowadays, international tensions and conflicts are becoming more frequent and escalating. The recent global economic crisis, the 2014-Russia-Ukraine crisis and the war of 2022, as well as severe energy sanctions, are increasingly pointing to the growing need for increased use and large-scale use of renewable energy. That is why we need to pay attention to Hungary's current fossil and renewable energy situation and future development opportunities.

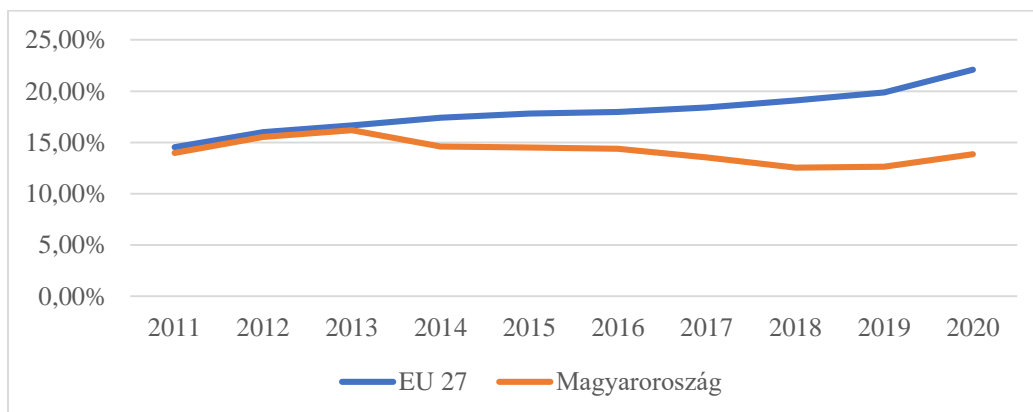
Keywords: renewable energy, fossil fuels, solar energy, wind energy, biomass, energy production

1. BEVEZETÉS

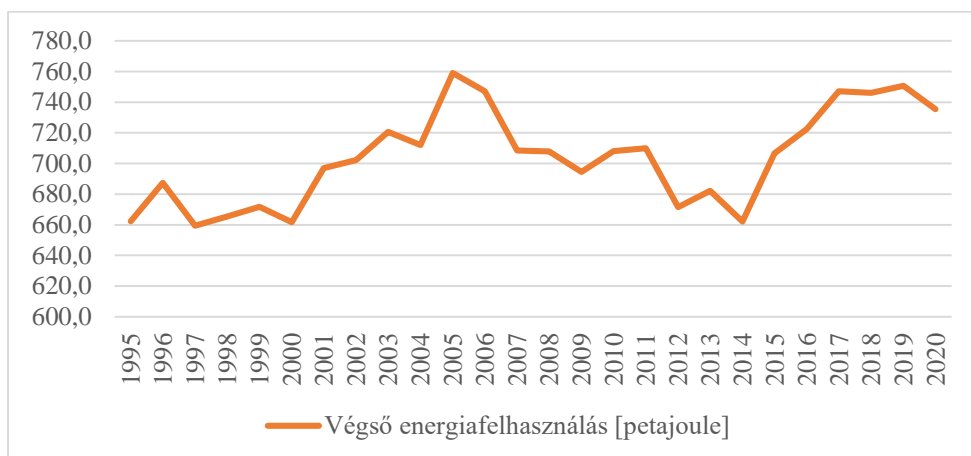
A 2022-es orosz–ukrán konfliktus kapcsán bevezetett nyugati szankciók az elkövetkező évekre súlyos energetikai válság felé vezethetnek abban az esetben, ha nem fordítunk kellő figyelmet a megújuló energiákban rejlő lehetőségek széles körű kihasználására és fejlesztésére.

Magyarországon a megújuló energiaforrásokból előállított energia felhasználásának részaránya 2020-ban a bruttó végső energiafogyasztásban 13,9%-ra emelkedett a megelőző évi 12,6%-ról, így hazánk teljesítette a megújuló energiaforrásból előállított energia támogatásáról szóló, 2009/28/EK irányelv alapján 2020-ra kitűzött célt (MEKH 2021). Az Európai Parlament és Tanács irányelve alapján a megújuló energiaforrások bruttó végső energiafogyasztásban való részesedésére vonatkozó, 2009-ben kijelölt, 2020-as kötelező célérték 13%, de ezt az egykori Nemzeti Fejlesztési Minisztérium által jegyzett, 2010 decemberében elfogadott Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Tervben a magyar kormány önkéntesen 14,65%-ra növelte. Ezt, a 14,65%-os célt tehát nem sikerült elérni az EUROSTAT adatbázisa szerint [2] [3].

Korábban (1. ábra) a részarány járt már 16% felett is (2013-ban), de a közel 80%-ban a biomassza (azon belül nagyrészt tűzifa) felhasználásának köszönhető arány a következő években fokozatosan csökkent, mivel a hazai megújulóenergia-termelés és -felhasználás abszolút értékben egészen 2018-ig, a napenergia-támogatások fokozódásának kezdetéig érdemben nem emelkedett, miközben az ország teljes energiafelhasználása nőtt (2. ábra).



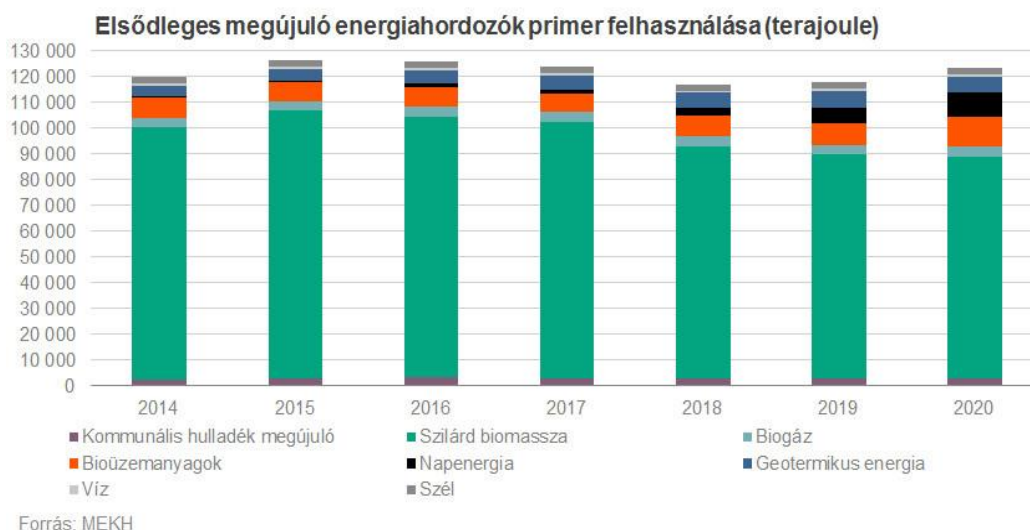
1. ábra. Magyarország és az EU 27 megújulóenergia-részarányának változása a bruttó végső energiafelhasználáson belül. [3] adatai alapján saját szerkesztés



2. ábra. Magyarország végző energiafelhasználása. [4] adatai alapján saját szerkesztés

A legjelentősebb megújuló energiaforrás a biomassza, de a termelése és a felhasználása is csökkent: részaránya a 2010-es évek közepén látott 80% feletti szintről 70% alá mérséklődött. A biomassza-felhasználás nagy részét a lakossági tüzifa-felhasználás teszi ki, melynek fenntarthatósága megkérdőjelezhető, miután gyakran elavult, szűrőberendezéshez nem kapcsolódó tüzelőberendezésekben valósul meg, ezáltal a súlyos egészségi problémákat és sok halálesetet okozó légszennyezéshez is hozzájárul (ráadásul sok, tüzfát égető háztartás vélhetően kommunális hulladékot is tüzel).

2014-től (3. ábra) nőtt ugyanakkor a bioüzemanyagok hazai termelése és felhasználása, részarányuk a felhasználásban 6%-ról közel 10%-ra emelkedett. A napenergia esetében a szabályozási környezet kedvező változása nyomán hasonló folyamat vette kezdetét, részaránya nulláról közel 8%-ra emelkedett 2020-ra. A vizsgált időtávon (2014–2020) érdemben nőtt a geotermikus energia termelése és felhasználási részaránya is (valamivel több mint 3%-ról több mint 5%-ra), de a bővülés az utóbbi években annak ellenére lelassult, hogy Magyarország e szempontból további jelentős potenciállal rendelkezik. A kommunális hulladék, a biogáz, a víz-, illetve a szélenergia magyarországi felhasználása az utóbbi években szintén stagnált vagy enyhén csökkent. A növekedésnek részben az ország természetes adottságai, részben a szabályozási környezet sajátosságai szabnak határt [2].



3. ábra. Elsődleges megújuló energiaforrások primer felhasználása [2]

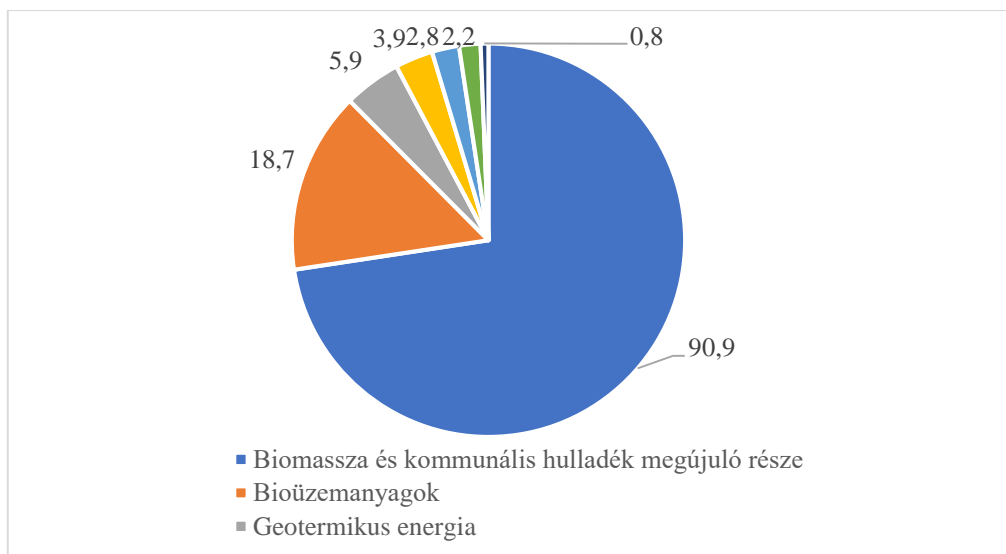
2. AZ EU ÉS MAGYARORSZÁG ENERGIAFÜGGŐSÉGE, A MEGÚJULÓ ENERGIÁK HELYZETE AZ EU-BAN ÉS MAGYARORSZÁGON

Az Eurostat 2022 adatai alapján [3] 2014-ben az EU-ban felhasznált energia 53,5%-a import energiaforrásokból származott, ami 2020-ra nemhogy csökkent volna, hanem 65,2%-ra növekedett. A napszél közel 90%-a, a földgáznak

66%-a, az egyéb szilárd energiahordozók (pl.: szén) 42%-a az EU-n kívülről érkezett. 2020-ban az összes uniós import több mint egyötödét tették ki ezen energiahordozók. Különösen függő helyzetben van az EU energiaellátása Oroszországtól, 2020-ban innen érkezett az olajimport 33%-a, a gázimport 39%-a, valamint a szilárd energiahordozók 26%-a. Hat tagállam (Bulgária, Észtország, Finnország, Szlovákia, Lettország és Litvánia) teljes gázszükséglete kizárólag Oroszországtól függ, ezek közülük három (Szlovákia, Lettország és Litvánia) teljes energiaszükségletének több mint negyedét földgázból fedezte a 2020-as évben.

Magyarország energiafüggősége az EU 27-hez hasonlóan alakult, 2014–2020 között 50,12%-ról 56,62%-ra növekedett. Különösen nagy a függőség Oroszországtól kőolaj és földgáz tekintetében.

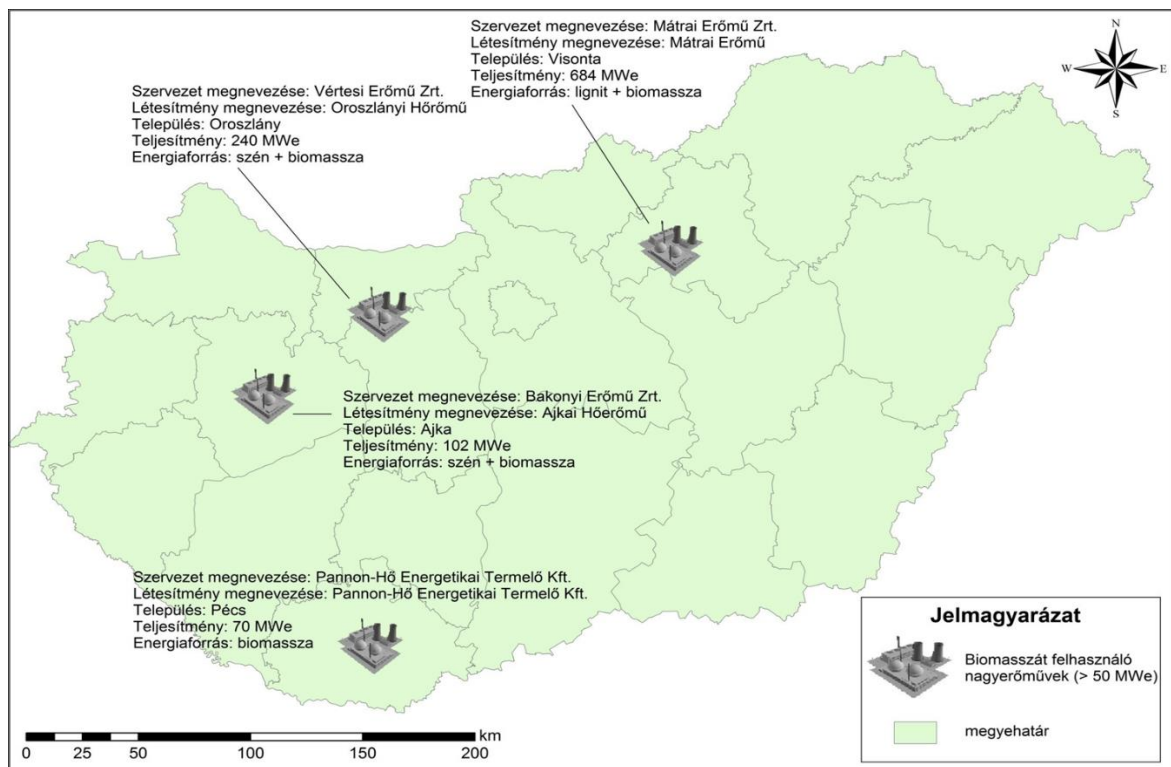
Az Eurostat adatai alapján [3] az EU energiamixében a megújuló energiák részaránya 2014-ben 15%-ot tett ki, ami 2020-ra 22%-ra növekedett. Magyarországon az EU-s tendenciákkal szemben 16%-ról 13,9%-ra csökkent a megújuló energiák részaránya, ami a 4. ábrán látható módon oszlik el az egyes megújuló energiák között [4]. Jelen tudományos közlemény terjedelmi korlátai miatt csak a biomassza mint megújuló energiaforrás magyarországi helyzetének részletes ismertetését tesszük meg.



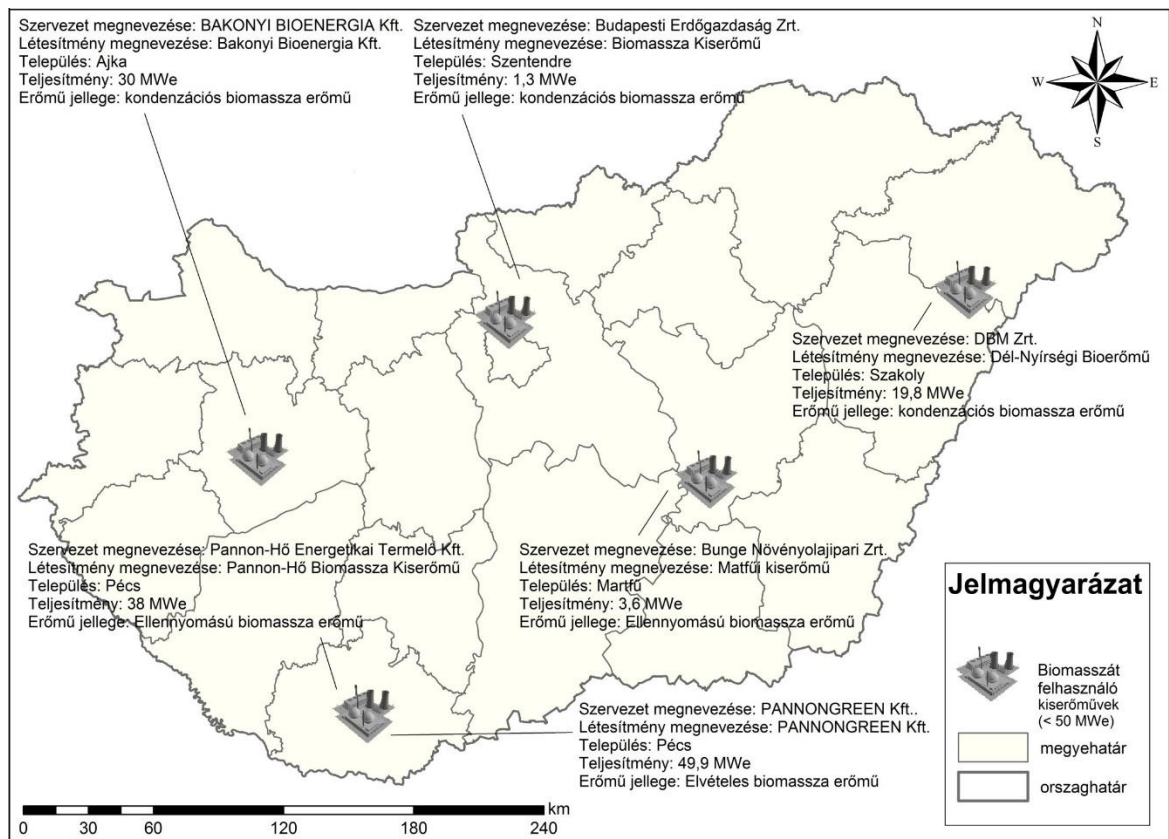
4. ábra. A megújuló energiák megoszlása Magyarországon a megújulóenergia-felhasználáson belül százalékban kifejezve. [4] alapján saját szerkesztés

A hazai megújulóenergia-termelés legnagyobb részét (90,9%-át) a biomassza teszi ki, ami 4 nagy erőműben (5. ábra) és 5 db 1 MW-nál nagyobb hasznos teljesítménnyel rendelkező, kizárólag biomassza-tüzelésű erőművel (6. ábra), fűtőművel és fűtőerőművel történik. Ezek többségére jellemző, hogy korábban szénrel üzemeltek, majd az energiapolitikai változásokra reagálva a legkisebb költségű beruházást választották, és biomasszát kezdtek keverni a szénhez. Később a legtöbb helyen a biomassza teljesen ki is váltotta a fosszilis tüzelőanyagot. Azonban az utóbbi években ezen energiatermelő egységek többsége (Kazincbarcika, Visonta, Tiszapalkonya, Oroszlány) alacsony hatásfokuknak és a magas üzemeltetési költségeiknek következtében leállásra került.

Magyarországon az utóbbi évtizedben mindössze egy 10 MW-nál nagyobb hasznos teljesítményű, kifejezetten biomassza-tüzelésre alkalmas energiatermelő egység létesült. A 2009-ben átadott, zöldmezős beruházásként kivitelezett szakolyi biomassza-erőmű névleges teljesítménye 20 MWe, és üzemképes állapotban megközelítőleg 60 főt foglalkoztat. Azonban az erőmű rövid üzemelést követően 2011-ben finanszírozási problémák miatt leállt. A beruházás példaként szolgálhatott volna más beruházók és önkormányzatok, továbbá a közvélemény számára, azonban ez az esemény inkább az ellenkezőjét váltotta ki a köztudatban. Végül 2015 októberében a bécsi székhelyű, NRG Service GmbH vállalat jelentős tőkebefektetéssel az erőmű újraindításába és fejlesztésébe kezdett.



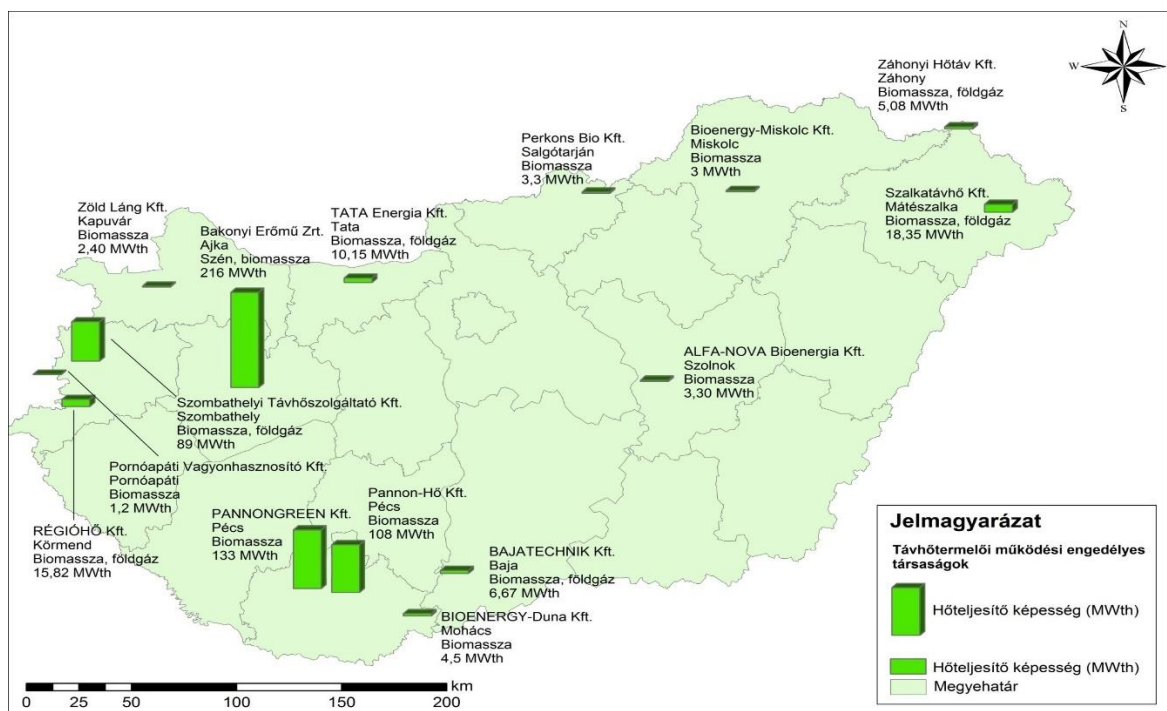
5. ábra. A négy, hazai biomasszát felhasználó nagyerőmű (50 MWe<). [1] alapján saját szerkesztés



6. ábra. Az öt, hazai biomasszát felhasználó kiserőmű (50 MWe >). [1] alapján saját szerkesztés

A korábban bemutatott nagy teljesítményű biomassza-tüzelésű energiatermelő egységekhez képest nagyobb számban találhatóak hazánkban kis, azaz 10 MW-nál kisebb teljesítménnyel rendelkező decentralizált energiatermelő egységek. Ezek közös jellemzője, hogy főleg az alapanyagbázisához közel helyezkednek el, ezért többségében a hegységi területeken koncentrálnak.

Ezek közül példaértékű törpe fűtőmű üzemel Pornóapáti településen. A létesítmény a megtermelt energiát a településfűtésre és használatimelegvíz-előállításra fordítja. Hazánk számos olyan társadalmi és gazdasági problémával küzd – különösen a hátrányos helyzetű térségekben – melyek mérsékelhetők lennének a megújuló energiák decentralizáltan történő alkalmazásával [5]. A fás szárú biomassza-alapú energiatermelés, illetve az üzemeltetéshez szükséges alapanyag előállítása és feldolgozása az EU-ban működő példákhoz hasonlóan hazánkban is segítheti a vidéki területek gazdasági és társadalmi helyzetének konzerválását, esetleg kismértékű felzárkóztatását. Fenntartható munkahelyeket biztosíthat, és mérsékelheti az energiaköltségeket is [6] [7].



7. ábra. A hazai biomasszát felhasználó, 10 MW-nál kisebb teljesítménnyel rendelkező decentralizált energiatermelő egységek. [1] alapján saját szerkesztés

3. ÖSSZEGZÉS

Összegzésképpen elmondható, hogy mind Magyarország, mind az EU-27 energiafüggősége nőtt az elmúlt évtizedben. Az EU megújuló energetikai részaránya kedvezően alakult a vizsgált időszakban, viszont Magyarországon az erőfeszítések ellenére ez az érték negatív irányba változott.

Hazánk természeti és mezőgazdasági adottságai kedveznek a megújuló energiák, azon belül pedig a biomassza-felhasználás tekintetében. Ahogyan tanulmányunkból is kiderült, jelentős számban és kapacitásban állnak rendelkezésre most is biomasszaüzemek az ország területén, viszont a meglévő potenciálnak csak kis hányadát hasznosítjuk. A jövőben kívánatos fejlesztési cél lenne a napenergián túl a biomassza-felhasználás hatékonyságának fejlesztése, szélesebb körben történő elterjedésének szorgalmazása. Kifejezetten kedvező lenne, ha a lakosság számára is rendelkezésre állnának biomassza-felhasználásra igénybevehető források annak céljából, hogy a rossz hatásfokú, sok esetben környezetszennyező technológia lecserélhető legyen fejlett, magas hatásfokú, környezetkímélő tüzelőberendezésekre. Ezzel nagymértékben hozzájárulhatna a lakosság az energiafüggőség csökkentéséhez, ami hosszú távon garantálná a hazai energiabiztonságot.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] MEKH 2021, „A megújuló energiafelhasználás részaránya elérte a célként kitűzött 13 százalékot,” 2022 [Online]. Available: <http://mekh.hu/a-megujulo-energiafelhasznalas-reszaranya-elerte-a-celkent-kituzott-13-szazalekot> (2022. 06. 12.)

- [2] Portfolio 2022, „Így érte el és bukta el egyszerre a megújuló energia célját Magyarország” 2022 [Online], Available: <https://www.portfolio.hu/gazdasag/20220120/igy-erte-el-es-bukta-el-egyszerre-a-megujulo-energia-celjat-magyarorszag-521829> (2022. 06. 12)
- [3] Eurostat 2022. (2022. 06. 12)
- [4] KSH 2020, [Online], Available: <https://www.ksh.hu/sdg/3-37-sdg-7.html> (2022. 06. 12)
- [5] TÓTH T.–BAROS Z. 2009: A megújuló energiaforrások társadalmi megítélésében bekövetkezett változások Encs és Forró példáján In: OROSZ Z.–SZABÓ V.–FAZEKAS I. (szerk.) Környezettudatos energiatermelés és -felhasználás: Környezet és Energia Konferencia, pp. 153–158.
- [6] TÓTH T.–SZEGEDI S. 2013: A dendromasszára alapozott hőenergia-termelés realitása Magyarországon In: KOZMA G. (szerk.) Emberközpontú társadalomföldrajz, pp. 198–207.
- [7] BAI A.–DURKÓ E.–TAR K.–TÓTH J. B.–LÁZÁR I.–KAPOCSKA L.–B. KIRCSI A.–BARTÓK B.–VASS R.–PÉNZES J.–TÓTH T. 2016: Social and economic possibilities for the energy utilization of fitomass in the valley of the river Hernád Renewable Energy, Volume 85, pp. 777–789.

GÉPÉSZETI SZEKCIÓ

Saint-Venant torsion of a pseudo elliptical cross section

Attila Baksa^{1,*} – *István Ecsedi*² – *Ákos József Lengyel*³ – *Dávid Gönczi*⁴

^{1,2,3,4} Institute of Applied Mechanics, University of Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, Hungary H-3515
e-mail: attila.baksa@uni-miskolc.hu

Abstract: *In this paper the Saint-Venant torsion of homogeneous, isotropic linearly elastic bar is considered. The cross section of the bar is a pseudo elliptical plane domain. This paper presents approximate solutions for the uniform torsion problem. The approximate solutions used are based on the two minimum theorems of linear elasticity. The paper gives the approximate expressions of the torsion function, Prandtl’s stress function, shearing stresses and torsional rigidity. A numerical example illustrates the applications of the derived formulae.*

Keywords: *Saint-Venant torsion, pseudo ellipse, potential energy, complementary energy*

1 INTRODUCTION

The Saint-Venant torsion problem of elastic bars has been addressed by engineers for the last 200 years. The uniform torsion was described by a rigorous theory of elasticity developed by Saint-Venant [1,3,4]. According to the Saint-Venant’s theory of uniform torsion only two shearing stresses appear nonzero, the axis of the bar remains straight and the cross-sectional warping does not depend on the position of the cross section. Fig. 1 shows the pseudo elliptical cross section whose equation in Cartesian coordinate x, y is

$$1 - \frac{x^4}{a^4} - \frac{y^4}{b^4} \leq 0 \quad (x, y) \in A \cup \partial A, \tag{1}$$

where A denotes the cross section and ∂A is the boundary curve of A . The boundary points of A is given by Eq. (1) when the sign of equality is valid in Eq. (1). The component of the unit normal vector to the boundary curve ∂A are n_x, n_y (Fig. 1). There are two different types of the formulation of the torsional boundary value problem.

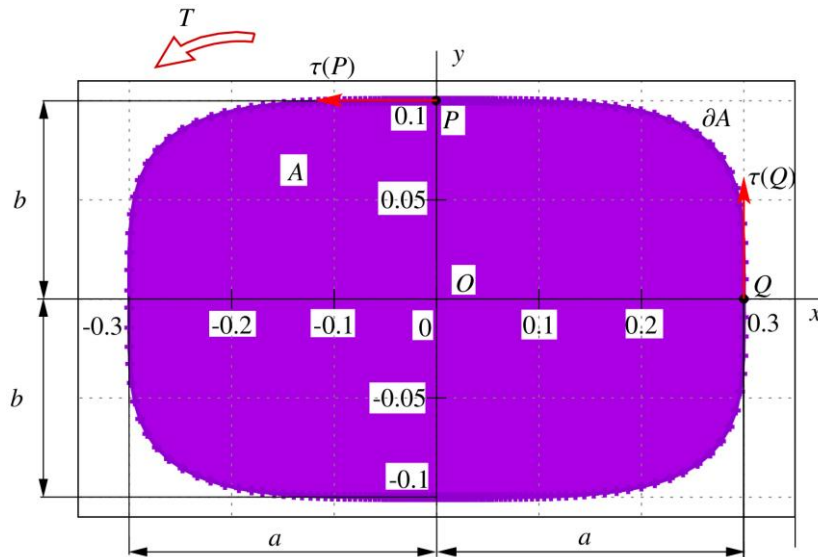


Fig.1. Pseudo elliptical cross section

The first one was developed by Saint-Venant and it uses the torsion function $\omega = \omega(x, y)$. The second type of the formulation was given by Prandtl which is used as a first order stress function $U = U(x, y)$. Saint-Venant’s formulation gives a Neumann type boundary-value problem for the torsion function $\omega = \omega(x, y)$ [1,3,4]

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = 0 \quad (x, y) \in A, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} n_x + \frac{\partial \omega}{\partial y} n_y - y n_x + x n_y = 0 \quad (x, y) \in \partial A. \quad (3)$$

Prandtl's formulation is given by the following Dirichet type boundary-value problem for the uniform torsion [2,3,4]

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + 2 = 0 \quad (x, y) \in A, \quad (4)$$

$$U(x, y) = 0 \quad (x, y) \in \partial A. \quad (5)$$

The shearing stresses τ_{xz} and τ_{yz} can be represented as [3,4]

$$\tau_{xz} = \mathcal{G}G \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} - y \right) = \mathcal{G} \frac{\partial U}{\partial y}, \quad (6)$$

$$\tau_{yz} = \mathcal{G}G \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} + x \right) = -\mathcal{G} \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (7)$$

In Eqs. (6) and (7) \mathcal{G} is the rate of twist, G is the shear modulus of the elastic bar. The connection between \mathcal{G} and the applied torque T is as follows [3,4]

$$\mathcal{G} = \frac{T}{GS}. \quad (8)$$

In Eq. (8) S is the Saint-Venant torsional constant (geometrical torsional rigidity). According to the minimum theory of potential energy we have [5,6]

$$\Pi_L(\tilde{\omega}(x, y)) \geq \Pi_L[\omega(x, y)], \quad (9)$$

where $\tilde{\omega} = \tilde{\omega}(x, y)$ is a kinematically admissible torsion function and

$$\Pi_L(\tilde{\omega}(x, y)) = \int_A \left[\left(\frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial x} - y \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial y} + x \right)^2 \right] dA. \quad (10)$$

In Eq. (10) $\tilde{\omega} = \tilde{\omega}(x, y)$ is an arbitrary function whose second order partial derivatives with respect to x and y are continuous functions in $\bar{A} = A \cup \partial A$. It must be noted that [5,6]

$$S = \Pi_L[\omega(x, y)]. \quad (11)$$

The equality relation (9) gives upper bound for S [5,6]. For the present problem of the linear elasticity, the minimum principle of the complementary energy leads to the following inequality

$$\Pi_c(U(x, y)) \geq \Pi_c[\tilde{U}(x, y)], \quad (12)$$

where $\tilde{U} = \tilde{U}(x, y)$ is a statically admissible stress function which satisfies the homogeneous boundary condition

$$\tilde{U}(x, y) = 0 \quad (x, y) \in \partial A, \quad (13)$$

and it has continuous second order partial derivatives with respect to x and y [5,6]. In inequality relation (12) $\Pi_c[\tilde{U}(x, y)]$ is defined as [5,6]

$$\Pi_c(\tilde{U}(x, y)) = 4 \int_A \tilde{U} \, dA - \int_A \left[\left(\frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{U}}{\partial y} \right)^2 \right] dA. \quad (14)$$

It is proven that [3,4]

$$S = \Pi_c[U(x, y)]. \quad (15)$$

It is evident that the inequality relation (12) gives lower bound for the Saint-Venant torsion constants.

2 BOUNDING FORMULAE

2.1 Lower bound.

The assumed form of the statically admissible stress function $\tilde{U} = \tilde{U}(x, y)$ is

$$\tilde{U} = C \left(1 - \frac{x^4}{a^4} - \frac{y^4}{b^4} \right) \quad (x, y) \in A \cup \partial A. \quad (16)$$

Here C is an arbitrary real constant. The value of the functional defined by formula (14) on the function given by Eq. (16) is

$$\Pi_c[\tilde{U}(x, y)] = \Pi_c(C) = k_1 C - k_2 C^2, \quad (17)$$

where

$$k_1 = \frac{8}{3} \frac{ab\pi^{3/2}}{\Gamma\left(\frac{3}{4}\right)^2}, \quad k_2 = \frac{201}{128} \sqrt{2\pi} \frac{a^2 + b^2}{ab} \quad (18)$$

where, $\Gamma(x)$ is the Euler' Gamma function.

It is very easy to show that from inequality relation (12) if $\Pi_c[\tilde{U}(x, y)]$ is given by Eq. (17) the sharpest lower bound can be reached for the following value of C

$$C = \frac{256}{603} \frac{\sqrt{2\pi}}{\Gamma\left(\frac{3}{4}\right)^2} \frac{a^2 b^2}{a^2 + b^2}. \quad (19)$$

Substitution Eq. (19) into Eq. (17) gives

$$S \geq S_L = \frac{512\sqrt{2}}{1809} \frac{\pi^2}{\Gamma\left(\frac{3}{4}\right)^2} \frac{a^3 b^3}{a^2 + b^2}. \quad (20)$$

2.2 Upper bound.

From the upper bound formula (9) with kinematically admissible function

$$\tilde{\omega}(x, y) = 0 \quad (x, y) \in A \cup \partial A \quad (21)$$

the following upper bound can be derived

$$S \leq S_{1U} = \frac{9\sqrt{2}\pi}{32} ab(a^2 + b^2). \quad (22)$$

By the use of the kinematically admissible function given by Eq. (23) as an approximation of the torsion function

$$\tilde{\omega}(x, y) = \frac{I_x - I_y}{I_x + I_y} xy \quad (x, y) \in A \cup \partial A \quad (23)$$

in bounding formula (9), where

$$I_x = \int_A y^2 dA, \quad I_y = \int_A x^2 dA. \quad (24)$$

gives

$$S \leq S_{2U} = \frac{8}{9} \sqrt{2}\pi \frac{a^3 b^3}{a^2 + b^2}. \quad (25)$$

Polya and Szegó proved that for arbitrary solid cross section the following upper bound is valid [7]

$$S \leq \frac{A^2}{2\pi}. \quad (26)$$

The upper bound formula (26) in the present case gives

$$S \leq S_{3U} = \frac{a^2 b^2 \pi^2}{2(\Gamma(0.75))^4}. \quad (27)$$

For given torque the approximate value of the maximum value of shearing stresses is as follows

$$\tau(P) = \frac{3\Gamma\left(\frac{3}{4}\right)^2}{\pi^{3/2}} \frac{T}{a^2 b} \quad \text{if } a > b, \quad (28)$$

$$\tau(Q) = \frac{3\Gamma\left(\frac{3}{4}\right)^2}{\pi^{3/2}} \frac{T}{ab^2} \quad \text{if } a < b. \quad (29)$$

For $a = b$ the obtained formulae gives an approximate solution a pseudo circular cross section. In Fig. 2 the upper and lower bounds are represented as a function of $\lambda = \frac{a}{b}$ for a given b .

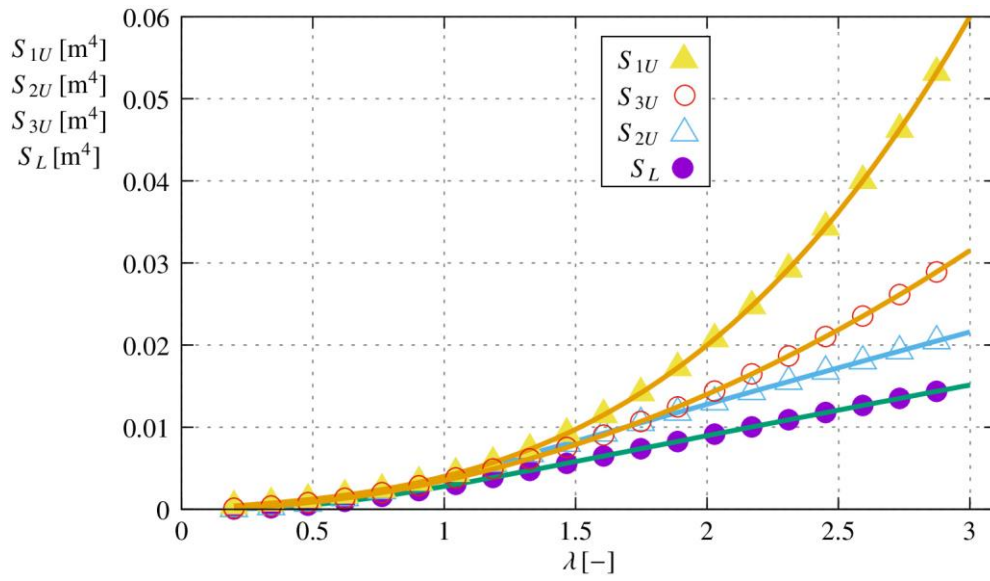


Fig.2. The plots of the bounds as a function of λ for $0.2 \leq \lambda \leq 3$.

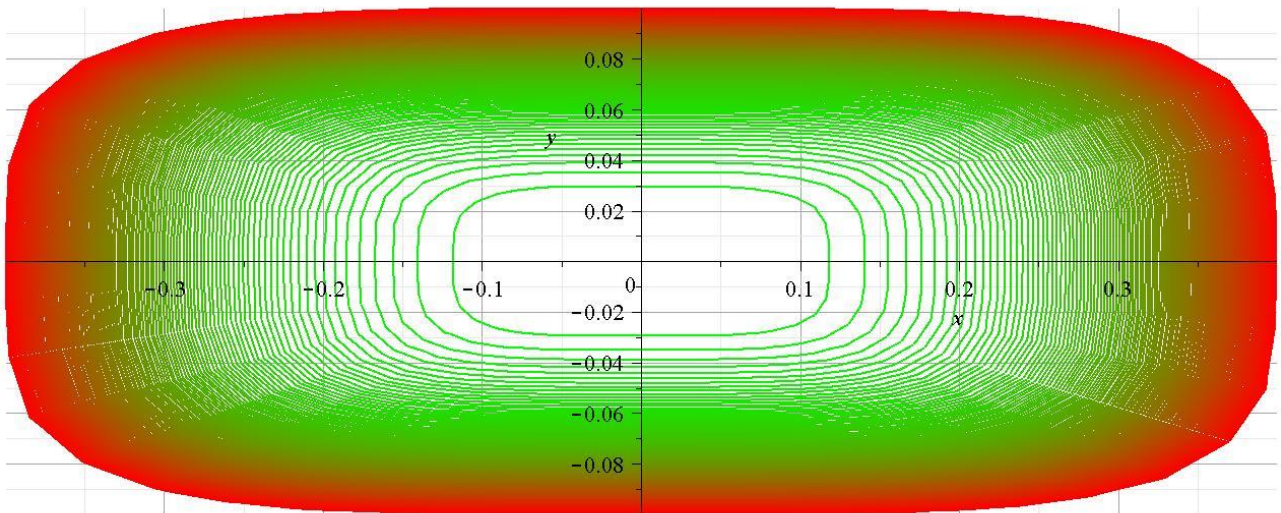


Fig.3. The contour lines of the Prandtl function.

Fig.3 shows the contour lines of the function $\tilde{U} = \tilde{U}(x, y)$ for $a = 0.4m, b = 0.1m$. The contour lines of the torsion function $\tilde{\omega} = \tilde{\omega}(x, y)$ for $a = 0.4m, b = 0.1m$ are presented in Fig. 4.

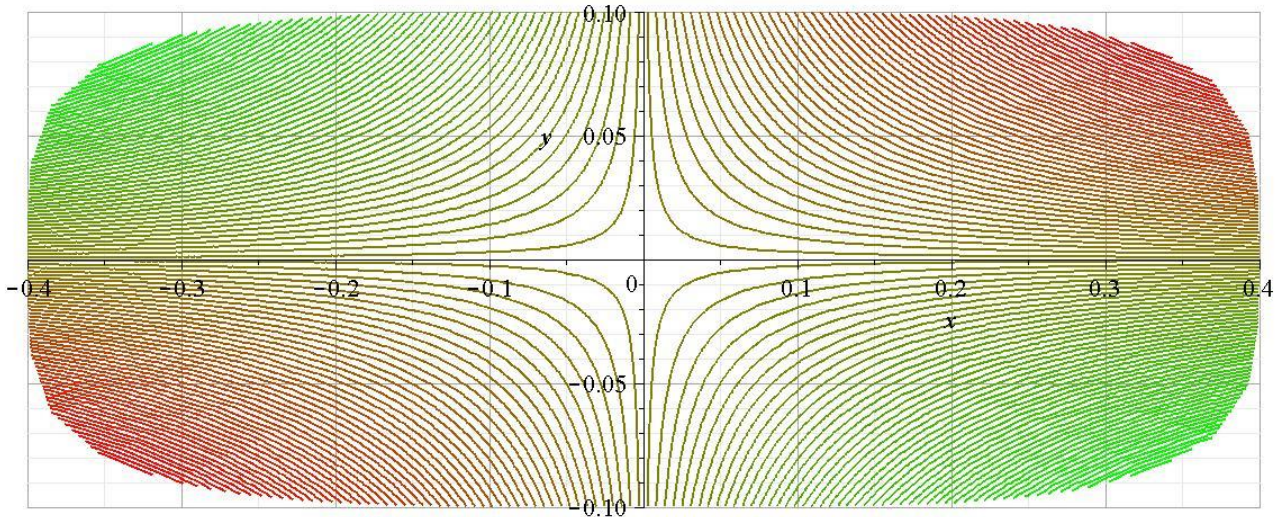


Fig.4. The contour lines of the torsion function.

It will be proven that, for given cross-sectional area the Saint-Venant torsional constant has maximum value for pseudo circle cross section when

$$a = b = \frac{\Gamma(0.75)}{\pi^{0.75}} \sqrt{A}. \quad (30)$$

The validity of this statement follows from the formula of the Saint-Venant torsional constant in terms of cross-sectional area A and a which is

$$S = \frac{1024}{1809} \frac{A^3 (\Gamma(0.75))^2 \sqrt{2}}{\left(a^2 + \frac{A^2 (\Gamma(0.75))^4}{a^2 \pi} \right) \pi^{2.5}}. \quad (31)$$

3 CONCLUSIONS

This paper presents upper and lower bounds for the torsional rigidity of a pseudo elliptical cross section. The derivation of bounding formulae are based on two minimum theorems of elasticity. An approximation formula is also given for the maximum value of shearing stresses.

REFERENCES

- [1] A. J. C. B de Saint-Venant, "Mémoire sur la torsion des prismes," Mémoires présentés par divers savants a L'Académie des Sciences, 14, pp. 233-560, 1855
- [2] L. Prandtl, "Zur Torsion von prismatischen Stäben," 4, pp. 758-759.
- [3] I.S. Sokolnikoff, Mathematical Theory of elasticity, New York: McGraw Hill, 1956.
- [4] H. M. Sadd, Elasticity. Theory and Applications and Numerics, London: Elsevier, 2005.
- [5] K. Washizu, Variational Methods in Elasticity and Plasticity, New York,: Pergamon Press, 1968.
- [6] C. L. Dym and I. H. Shames, Solid Mechanics: A variational approach, New York: McGraw-Hill, 1973.
- [7] G. Polya and G. Szegő, Isoperimetric Inequalities in Mathematical Physics, Princeton, Princeton University Press, 1951.

Analysis of plain and face milling technologies

Dr. Sándor Bodzás^{1,*} - Dr. Gyöngyi Szanyi

¹University of Debrecen, Faculty of Engineering, E-mail: bodzassandor@eng.unideb.hu

Summary: *the aim of the study is the mathematical and technological analysis of plain and face milling technologies. The mathematical analysis can help for the development of the computer aided manufacturing design and the CNC technique. Knowing of the parametric equation of the major cutting edge of the tool the roughness of the machined surface can be pre-calculated. Obviously, if we increase the number of cutting edges around the tool the surface roughness will be better but the tool manufacturing process will be more complicated as a consequence the tool price will be higher. Using of the calculated technological formulas the overall chip separation process could be designed. Those formulas were calculated in detail. The machining time that is needed for the execution of the technology can be estimated. After the determination of the technological formulas the conventional or the CNC technology can be designed.*

Keywords: *plain, face, force, speed, technology*

1 INTRODUCTION

Initially the milling technology was used for manufacturing of planar surfaces. Nowadays, it is widely applied for manufacturing different complex surfaces by CNC techniques. The general purpose is the improvement of shape-, size- and position accuracy [1-6].

The manufacturing process can be predesigned by the application of CAM software before the CNC manufacturing. The size accuracy is IT5 – IT8. The available surface roughness is $R_a=0.63 - 10 \mu\text{m}$ depending on the type of the milling technology. The tool shape is regular. It has more edges and defined edge geometry [1-6].

The depth of cut has to be determined in tool axis direction (axial) and perpendicular (radial) direction. Changing sectional chip having periodical cutting is carried out by defined cutting tool having more edges [1-6].

2 COORDINATE GEOMETRIC ANALYSIS

Based on the relative position of the tool in comparison with the workpiece two arrangements can be differentiated [1-6]:

- plain milling (Figure 1)
 - the rotation axis of the milling cutter is parallel with the milled surface,
 - major cutting edges are used on the lateral surface of the tool,
 - the machined surface is planar.
- face milling (Figure 2)
 - the rotation axis of the milling cutter is perpendicular for the milled surface,
 - major cutting edges on the plane and minor cutting edges on the face are worked,
 - the machined surface is planar.

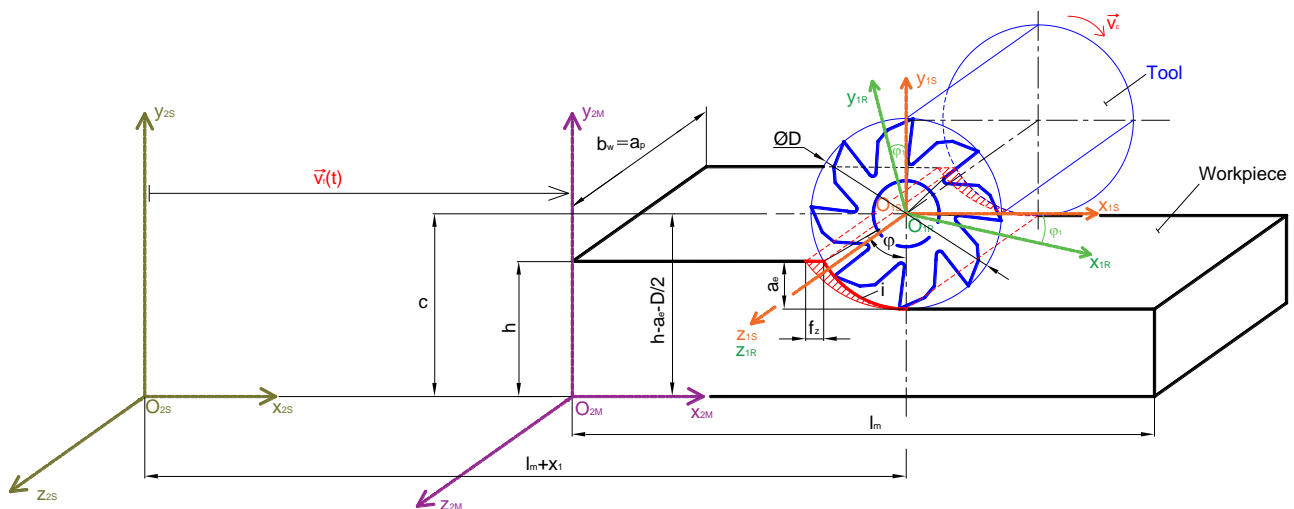


Figure 1. Plain milling technology

The workpieces are being moved under the tools in both cases by the $\vec{v}_f(t)$ feed speed in comparison with the C_{2S} stationary coordinate system that is totally fixed on the workplace of the working machine. The workpieces are defined on the C_{2M} workpiece moving coordinate systems. The tools are being done rotation motion accordingly the C_{1R} rotation coordinate systems. The C_{1S} are the standing coordinate systems on the tools. The c distance is the general distance between the x_{2M} axis and the tool center point. The distance between the C_{1S} and C_{2S} systems is $l_m + x_1$ where l_m is the workpiece length and x_1 is the overrunning (Figure 1 and 2).

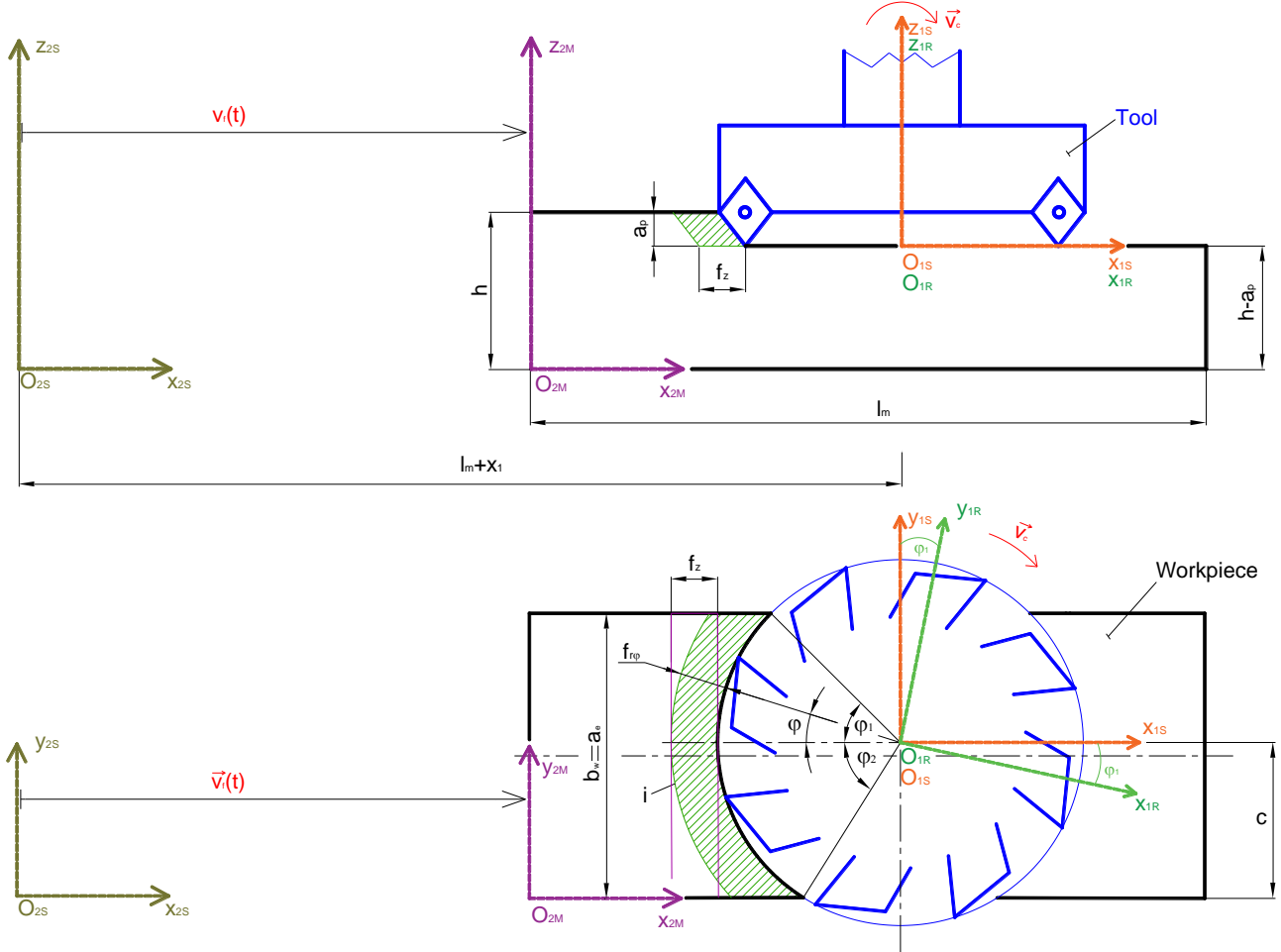


Figure 2. Face milling technology

Knowing of the parametric equation of the major cutting edge and the number of teeth on the tool in the C_{1R} coordinate system, the wrapping surface that is the final surface of the workpiece can be determined by mathematical way [8]:

$$\vec{r}_{1R} = \vec{r}_{1R}(\vartheta) \quad (1)$$

$$\vec{n}_{1R} \cdot \vec{v}_{1R}^{(1,2)} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{r}_{2R} = M_{2M,1R} \cdot \vec{r}_{1R} \quad (3)$$

The (1), (2) and (3) equations are necessary to pre-estimate the surface roughness on the workpiece and the CNC developments.

The correlation between the tool and the workpiece can be written by the following multiplication of transformation matrices (Figure 1 and 2):

$$M_{2M1R} = M_{2M2S} \cdot M_{2S1S} \cdot M_{1S1R} \quad (4)$$

3 TECHNOLOGICAL DESIGN OF PLAIN MILLING TECHNOLOGY

The technological process figure of the plain milling technology can be seen on Figure 3. During this method the separated chip volume has 'horn'-shape (Figure 4). The h chip thickness is continuously changing along the i arc of

contact that is why this parameter will be considered by average value which is called h_m medium chip thickness [1-7]. The V_h volume of the 'horn'-shape could be approximated by the V_1 and V_2 prism volumes [7]:

$$V_h = V_1 = V_2 \quad (5)$$

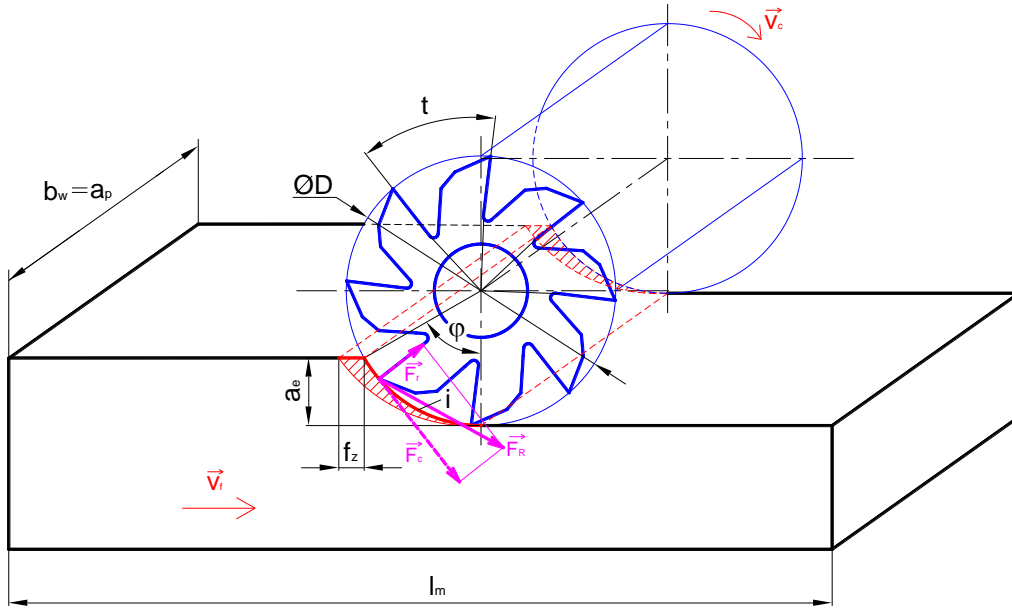


Figure 3. The universal technological figure of the plain milling technology [7]

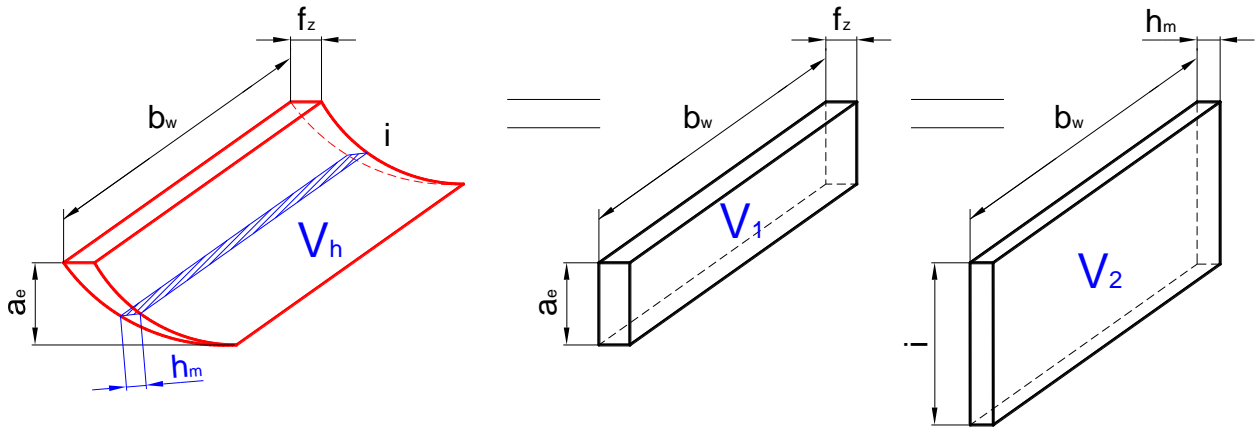


Figure 4. The approximation by volume constancy [7]

It means based on (5)

$$a_e \cdot b_w \cdot f_z = i \cdot b_w \cdot h_m \quad (6)$$

$$h_m = \frac{a_e \cdot f_z}{i} \quad (7)$$

Knowing of the a_e radial depth of cut and the D tool diameter, the m distance from the DBE triangle is (Figure 5) [7]

$$m = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - a_e\right)^2} = \sqrt{D \cdot a_e - a_e^2} \quad (8)$$

The φ angle of contact is based on the EBD triangle (Figure 5) [7]

$$\varphi^\circ = \text{atan}\left(\frac{m}{\frac{D}{2} - a_e}\right) \quad (9)$$

The i arc of contact is

$$i = \varphi^\circ \cdot \frac{D \cdot \pi}{360^\circ} \quad (10)$$

Substituting (10) into (7) the h_m medium chip thickness is

$$h_m = a_e \cdot f_z \cdot \frac{360^\circ}{\varphi^\circ \cdot D \cdot \pi} \quad (11)$$

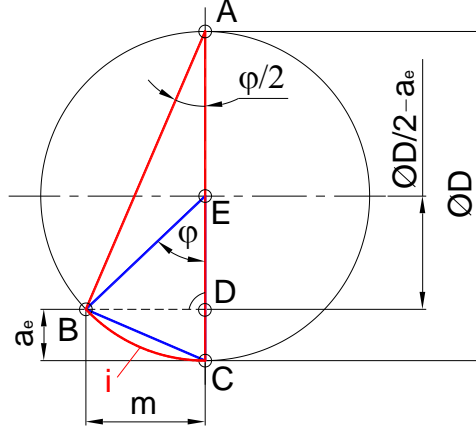


Figure 5. Determination of the i arc of contact [7]

The cutting force for one edge is

$$F_{c1} = k_c \cdot A_{c1} = k_c \cdot b_w \cdot h_m \quad (12)$$

The t tooth pitch means the peripheral distance between two neighbouring teeth (Figure 3):

$$t = \frac{D \cdot \pi}{z} \quad (13)$$

The Ψ switch number means the number of the working teeth along the i arc of contact (Figure 3) [7]:

$$\Psi = \frac{i}{t} = \frac{\varphi^\circ}{360} \cdot z \quad (14)$$

Considering the Ψ switch number the total cutting force along the i arc of contact is

$$F_c = \Psi \cdot F_{c1} \quad (15)$$

Substituting (11), (12) and (14) into (15)

$$F_c = k_c \cdot b_w \cdot a_e \cdot f_z \cdot \frac{z}{D \cdot \pi} \quad (16)$$

The rotational cutting speed is

$$v_c = D \cdot \pi \cdot n \quad (17)$$

The feed speed is

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (18)$$

Knowing of the cutting force (16) and the cutting speed (17) the cutting power is [7]

$$P_c = F_c \cdot v_c = k_c \cdot b_w \cdot a_e \cdot f_z \cdot z \cdot n \quad (19)$$

During the technology the workpiece is being moved below the tool. We always consider the actual position of the workpiece in comparison with the center point of the tool. Considering the x_1 , x_2 overruns and the m distance the general formula of the machining time is (Figure 6):

$$T_c = i_p \cdot \frac{L}{v_f} = i_p \cdot \frac{x_1 + m + m + x_2 + l_m}{v_f} \quad (20)$$

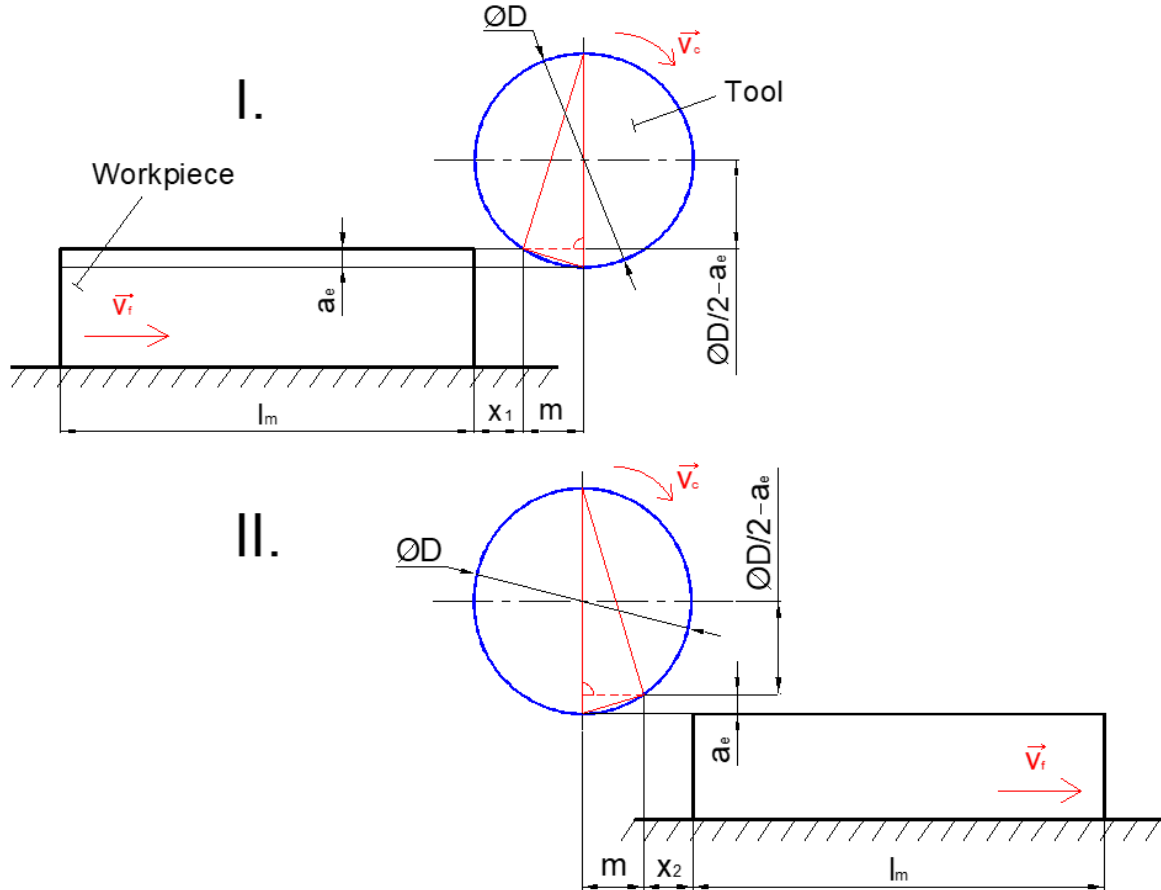


Figure 6. Determination of the machining time in case of plain milling technology

4 TECHNOLOGICAL DESIGN OF FACE MILLING TECHNOLOGY

The technological process figure of the face milling technology can be seen on Figure 3. Since the axis of rotation of the cutting tool is not situated on the symmetric line of the workpiece the f feed is continuously changing between the two arcs. The $f_{r\varphi}$ is a medium feed which is considered during the calculations (Figure 7) [1-7].

Approximating the area constancy of the I. and II. planar figures (Figure 7)

$$f_{r\varphi} \cdot i = f_z \cdot b_w \quad (21)$$

$$f_{r\varphi} = \frac{f_z \cdot b_w}{i} \quad (22)$$

The i arc of contact is (Figure 7)

$$i = \frac{D \cdot \pi \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)}{360^\circ} \quad (23)$$

Substituting (23) into (22)

$$f_{r\varphi} = \frac{f_z \cdot b_w \cdot 360^\circ}{D \cdot \pi \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)} \quad (24)$$

The medium chip thickness is (Figure 7)

$$h_m = f_{r\varphi} \cdot \sin \kappa_r \quad (25)$$

The cutting force for one edge is

$$F_{c1} = k_c \cdot A_{c1} = k_c \cdot a_p \cdot f_{r\varphi} = k_c \cdot h_m \cdot b \quad (26)$$

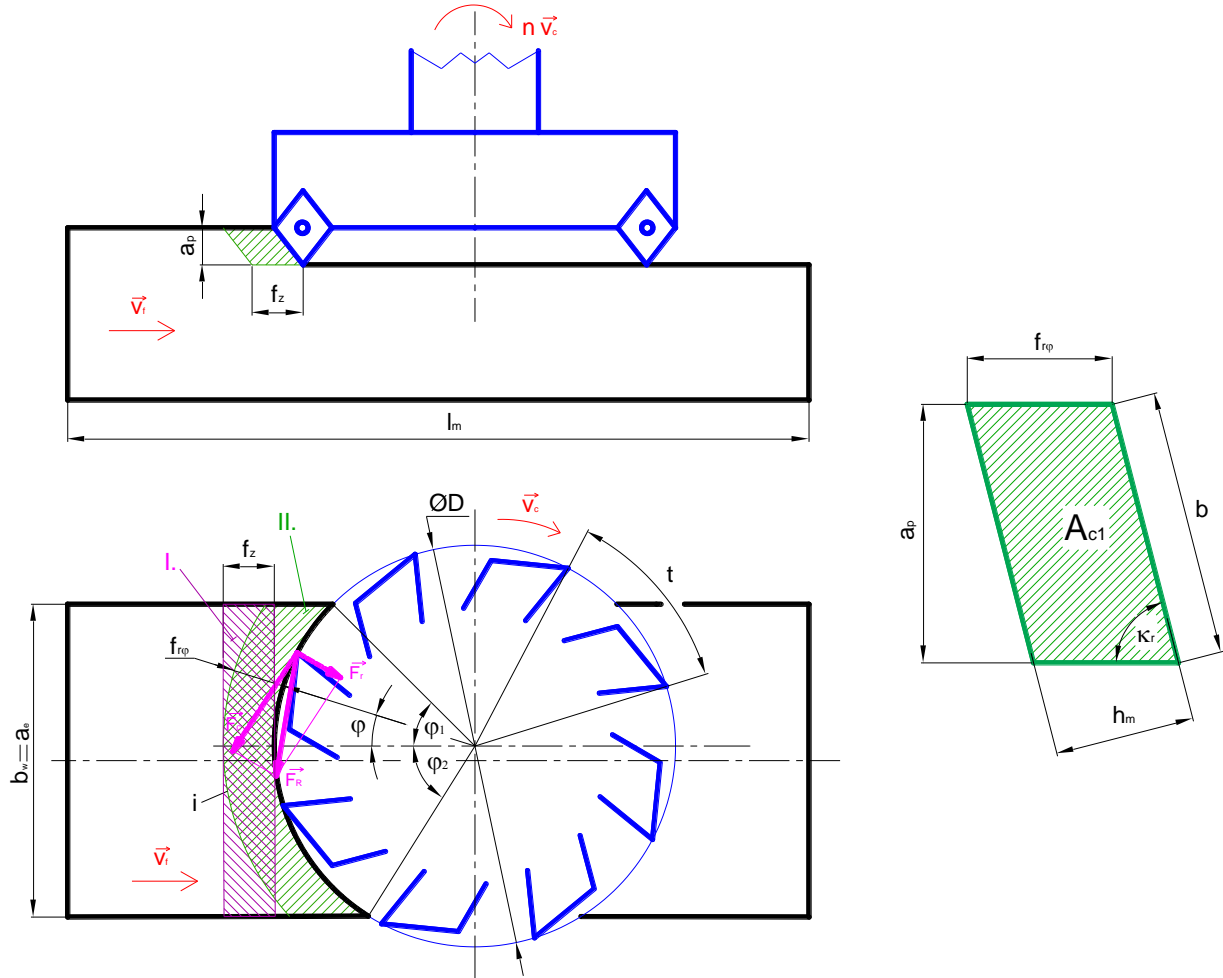


Figure 7. The universal technological figure of the face milling technology [7]

Considering the tooth pitch (13) the switch number is [7]

$$\psi = \frac{i}{t} = \frac{z \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)}{360^\circ} \quad (27)$$

Considering the ψ switch number the total cutting force along the i arc of contact can be calculated by the (15) formula. Substituting (24), (26) and (27) into (15) the total cutting force is

$$F_c = z \cdot k_c \cdot a_p \cdot \frac{f_z \cdot b_w}{D \cdot \pi} \quad (28)$$

The cutting speed and the feed speed can be calculated by the (17) and (18) formulas. Knowing of the total cutting force (28) and the cutting speed (17) the cutting power is [7]

$$P_c = F_c \cdot v_c = z \cdot k_c \cdot a_p \cdot f_z \cdot b_w \cdot n \quad (29)$$

During the technology the workpiece is being moved below the tool. We always consider the actual position of the workpiece in comparison with the center point of the tool. Considering the x_1 , x_2 overruns the general formula of the machining time is (Figure 8):

$$T_c = i_p \cdot \frac{L}{v_f} = i_p \cdot \frac{x_1 + D + x_2 + l_m}{v_f} \quad (30)$$

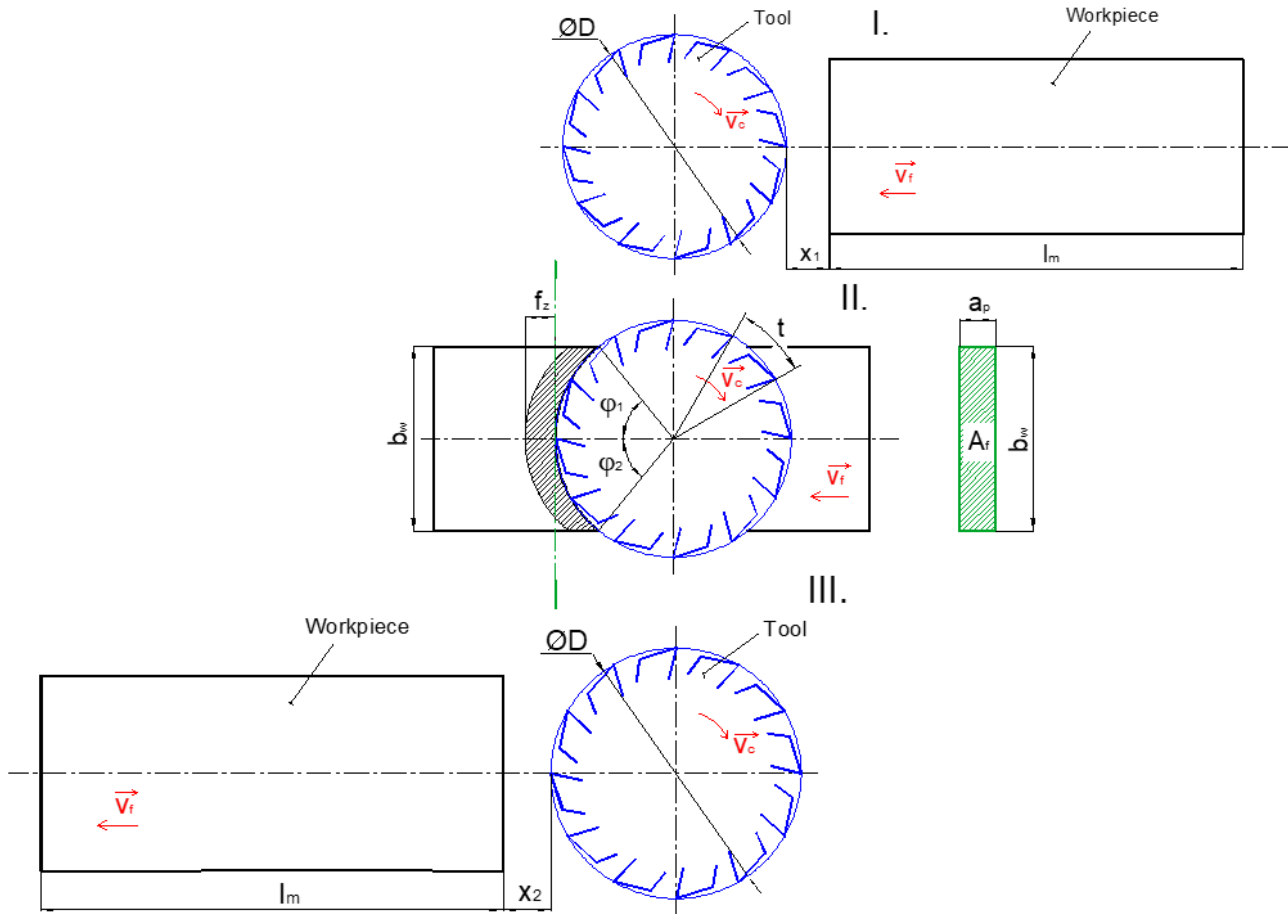


Figure 8. Determination of the machining time in case of face milling technology

ACKNOWLEDGEMENT

Project no. **TKP2020-NKA-04** has been implemented with the support provided from the National Research, Development and Innovation Fund of Hungary, financed under the 2020-4.1.1-TKP2020 funding scheme.

REFERENCES

- [1] Bralla, J. G.: *Handbook of Manufacturing Processes*, First Edition, Industrial Press Inc., New York, 2007, ISBN 0-831 1-3179-9
- [2] Dudás, I.: *Gépgyártástechnológia I. A gépgyártástechnológia alapjai*. Műszaki Könyvkiadó, 2011., p. 583
- [3] Groover, M. P.: *Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, Processes and Systems*, Third Edition, United States of Amerika, p. 520, ISBN 978-0-471-74485-6
- [4] Schey, J. A.: *Introduction to Manufacturing Processes*, McGraw – Hill Book Company, 1977., p. 392., ISBN 0-07-055274-6
- [5] Stephenson, D. A., Agapiou, J., S.: *Metal Cutting Theory and Practice*, Third edition, CRC Press, 2016, ISBN 978-1-4665-8754-0, p. 956
- [6] Shi, H.: *Metal Cutting Theory, New Perspectives and New Approaches*, Springer, 2018, p. 393, ISSN 1860-5168
- [7] Bodzás, S.: *Manufacturing Processes I.*, Debrecen University Press, Debrecen, 2021, p. 203, ISBN 9789633189078
- [8] Litvin, F. L., Fuentes, A. A.: *Gear Geometry and Applied Theory*, Cambridge University Press, 2004, ISBN 978 0

NOMENCLATURE

Parameter	Unit	Name
$\vec{v}_f(t), v_f = \vec{v}_f $	m/min	feed speed
D	mm	outside diameter of the tool
x, y, z		coordinates of the appropriate coordinate systems
O		origins of the appropriate coordinate systems
b_w	mm	workpiece width
a_p	mm	axial depth of cut
a_e	mm	radial depth of cut
f_z	mm/rev	feed for one major cutting edge
$\vec{v}_c, v_c = \vec{v}_c $	m/min	cutting speed
h	mm	workpiece height
l_m	mm	workpiece length
x₁, x₂	mm	overrunings
c	mm	general distance between the x_{2M} axis and the tool center point
φ	°	angle of contact
i	mm	arc of contact
f_{rφ}	mm/rev	medium feed along the i arc of contact
f	mm/rev	total feed
\vec{r}_{1R}		equation of the major cutting edge on the tool
$\vec{v}_{1R}^{(1,2)}$		relative velocity vector
M		transformation matrix between the appropriate coordinate systems
V	mm ³	body volume
h_m	mm	medium chip thickness
m	mm	distance between the corner point of the workpiece and the center point of the tool
t	mm	tooth pitch
k_c	N/mm ²	specific cutting force
$\vec{F}_{c1}, F_{c1} = \vec{F}_{c1} $	N	cutting force for one edge
$\vec{F}_c, F_c = \vec{F}_c $	N	total cutting force
$\vec{F}_r, F_r = \vec{F}_r $	N	radial directional force
$\vec{F}_R, F_R = \vec{F}_R $	N	resultant force
Ψ		switch number
n	1/min	number of revolution
P_c	W	cutting power
T_c	min	machining time
i_p		number of manufacturing passes
A_{c1}	mm ²	theoretical chip section
κ_r	°	major tool cutting edge angle
z		number of cutting edges on the tool

Design and finite element analysis of planetary gear drives by the number of planet gears

Dr. Sándor Bodzás^{1,*} - Dr. Zsolt Tiba² – Dr. József Menyhárt – Zsolt Békési – József Kertész

¹University of Debrecen, Faculty of Engineering, E-mail: bodzassandor@eng.unideb.hu

Summary: the aim of this study is the tooth contact analysis (TCA) of planetary gear drives in the function of the number of planet gears. We designed three types of planetary gear drives where the difference between the appliances are the number of planet gears. All of the other input geometric parameters were chosen for the same. The geometric design was done by the GearTeq software. After that the computer aided modelling (CAD) and the assembly could be done by SolidWorks software. Finite element analysis (FEM) was done on the tooth contact zone of the planet gear, the sun gear and the ring gear using of Ansys software. The normal stress and the normal deformation parameters were analyzed on the connection surfaces of the pinion (sun gear and planet gear) and the gear (planet gear and ring gear).

Keywords: planet gear, planetary gear drive, stress, deformation, CAD, FEM

1 INTRODUCTION

Planetary gear drives are primarily used for huge gear ratios where the small sizes are important. Such as the gear drives of elevators or cranes. It is also widely used for starting-engines as a torque boost gear system [1, 2, 4].

The gearbox of the famous Ford T model car consists of planetary gear drives which are joint after each other. It was designed by József Galamb who was a Hungarian mechanical engineer. The gear shifting was executed by the fixation of belt-brake [1, 4]. Beside the primer drive there is also a chance to use seconder drive in case of planetary gear drives. The most frequently used planetary gear drives are the differential of vehicles [1-4].

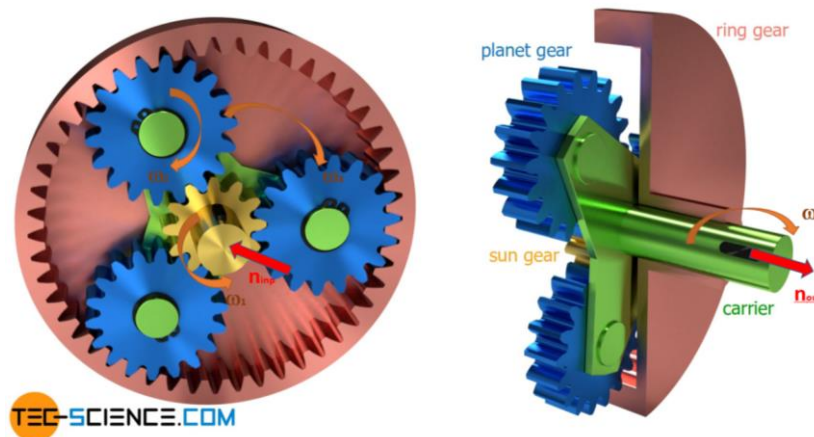


Figure 1. The geometric establishment of a planetary gear drive [2]

2 COORDINATE GEOMETRIC ANALYSIS

Firstly, we can analyze the connection between the sun gear and the planet gear. The relation between the sun gear and the planet gear can be written by the following multiplication of transformation matrices (Figure 2):

$$M_{1R,2R} = M_{1R,1S} \cdot M_{1S,2S} \cdot M_{2S,2R} \quad (1)$$

$$M_{2R1R} = M_{2R2S} \cdot M_{2S1S} \cdot M_{1S1R} \quad (2)$$

We can use the fact that the surfaces of the sun gear and the planet gear during their movements overlap each other, and the connection between them is the i_{21} gear ratio (Figure 2) [3]

$$\varphi_2 = i_{21} \cdot \varphi_1 \quad (3)$$

The angular velocities can be calculated between the connecting elements [3]

$$\omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt}, \quad \omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt} \quad (4)$$

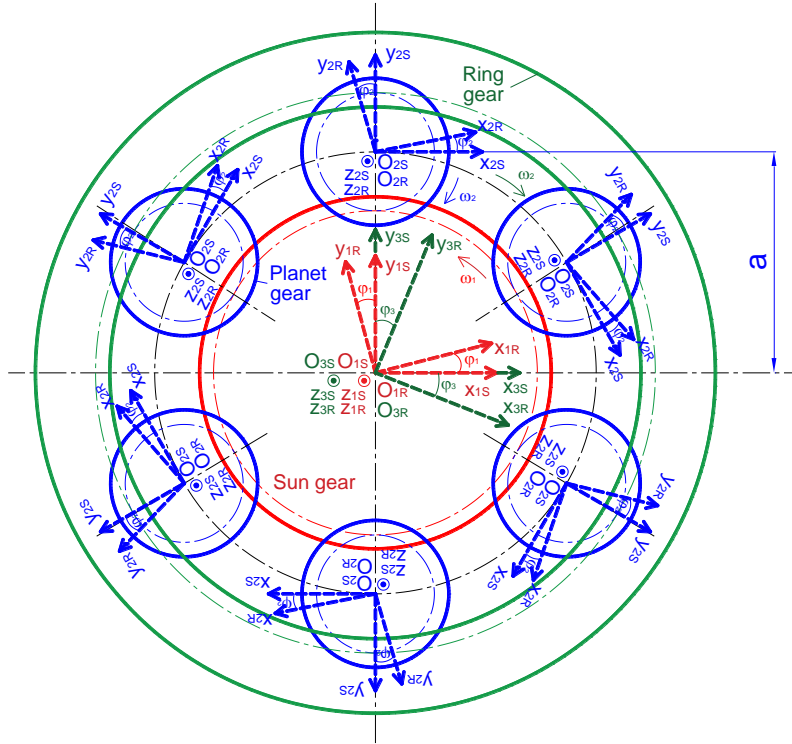


Figure 2. The correlation between the coordinate systems

The relative velocity vector in the C_{2R} rotation coordinate system of the planet gear can be calculated:

$$\overrightarrow{v_{2R}^{(1,2)}} = M_{2R1R} \cdot \overrightarrow{v_{1R}^{(1,2)}} \quad (5)$$

Secondly, we can analyze the connection between the planet gear and the ring gear. The relation between the sun gear and the planet gear can be written by the following multiplication of transformation matrices (Figure 2):

$$M_{3R1R} = M_{3R3S} \cdot M_{3S1S} \cdot M_{1S1R} \quad (6)$$

$$M_{1R3R} = M_{1R1S} \cdot M_{1S3S} \cdot M_{3S3R} \quad (7)$$

We can use the fact that the surfaces of the planet gear and the ring gear during their movements overlap each other, and the connection between them is the i_{31} gear ratio (Figure 2) [3]

$$\varphi_3 = i_{31} \cdot \varphi_1 \quad (8)$$

where the gear ratio is [1]

$$i_{31} = \frac{1}{1 + \frac{z_3}{z_2}} \quad (9)$$

The angular velocities can be calculated between the connecting elements [3]

$$\omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt}, \quad \omega_3 = \frac{d\varphi_3}{dt} \quad (10)$$

The relative velocity vector in the C_{3R} rotation coordinate system of the ring gear can be calculated:

$$\overrightarrow{v_{3R}^{(1,2)}} = M_{3R1R} \cdot \overrightarrow{v_{1R}^{(1,2)}} \quad (11)$$

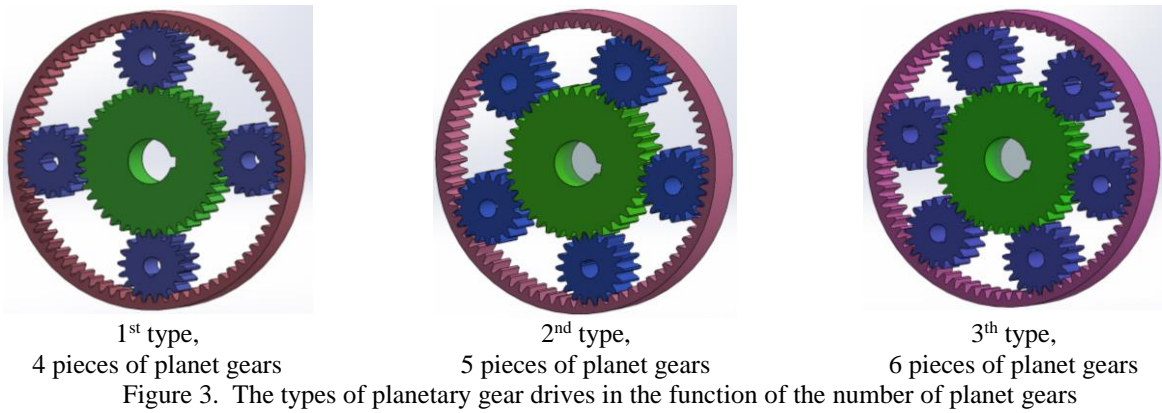
3 GEOMETRIC DESIGN OF THE PLANETARY GEAR DRIVES

Three types of planetary gear drives were designed where all of the input parameters are the same except the number of the planet gears. Knowing of the geometric design process and the manufacturing technology of the gear

elements the GearTeq software can calculate all of the output geometric parameters that are needed for the CAD modelling and the assembly of the planetary gear drive. This software can import the calculated results into the SolidWorks software where the CAD modelling and the assembly can be executed for the FEM analysis. The initial geometric parameters can be seen on Table 1. The types of the designed planetary gear drives can be seen on Figure 3.

Table 1. The initial geometric parameters of the gear elements

Parameter	Sun gear	Planet gear	Ring gear
Manufacturing technology	Pfauter method	Pfauter method	Fellows method
Addendum modification coefficient	$x_1=1$	$x_1=1$	$x_1=1$
Module	$m=4$ mm	$m=4$ mm	$m=4$ mm
Number of teeth	$z_1=20$	$z_2=18$	$z_3=76$
Basic profile angle	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=20^\circ$
Clearance factor	$c^* = 0.25$	$c^* = 0.25$	$c^* = 0.25$
Fillet radius	$r=1.2$ mm	$r=1.2$ mm	$r=1.2$ mm
Backlash	$j_s=0.4$ mm	$j_s=0.4$ mm	$j_s=0.4$ mm



4 FINITE ELEMENT ANALYSIS (SUN GEAR – PLANET GEAR)

Static structural analysis were done in this research. The material properties can be seen on Table 2.

Table 2. The applied material property

Material type	Steel
Linear elastic	Izotropic elasticity
Young's modulus (E)	$E= 210$ GPa
Poisson's ratio (ν)	$\nu=0.3$

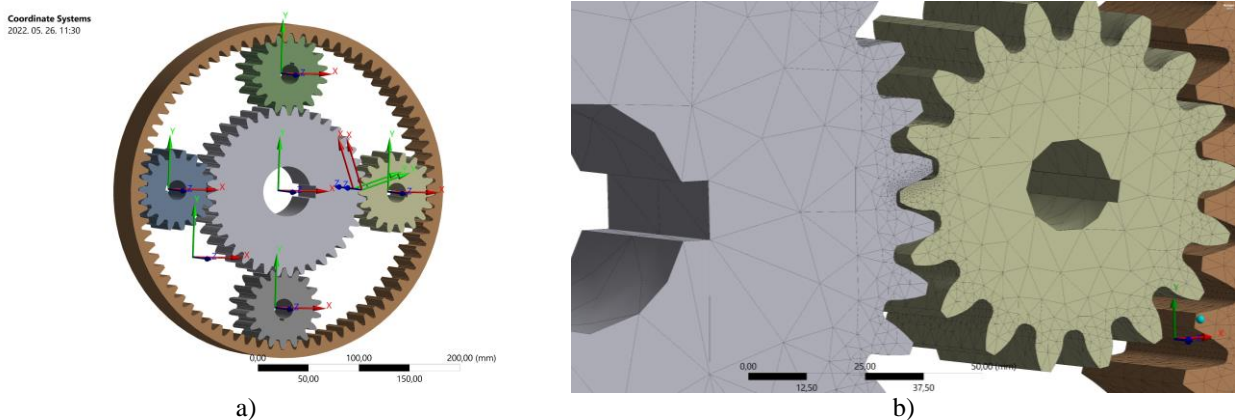


Figure 4. The adjustment of the coordinate systems (a) and the adoption of the FEM mesh (b)

The adjustment of the coordinate systems can be seen on Figure 4.a. The sun gear was loaded by 100 Nm torque. Contact surfaces were defined on the tooth connection zones. 0.5 mm mesh size was defined in the tooth connection

zone (Figure 4.b). Automatic meshing was defined outside the tooth connection zone. The type of meshing was tetrahedron.

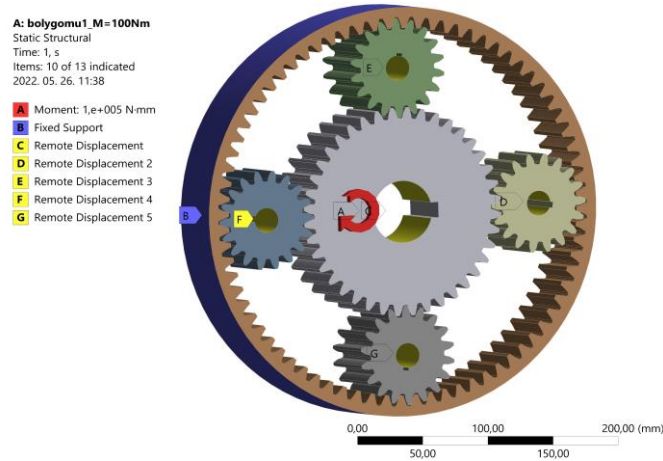


Figure 5. The adjustment of the load and boundary conditions

The rotation around the axles were enabled for the sun gear and the planet gears. All of the other freedom degrees were fixed for those elements. The ring gear was totally fixed (Figure 5).

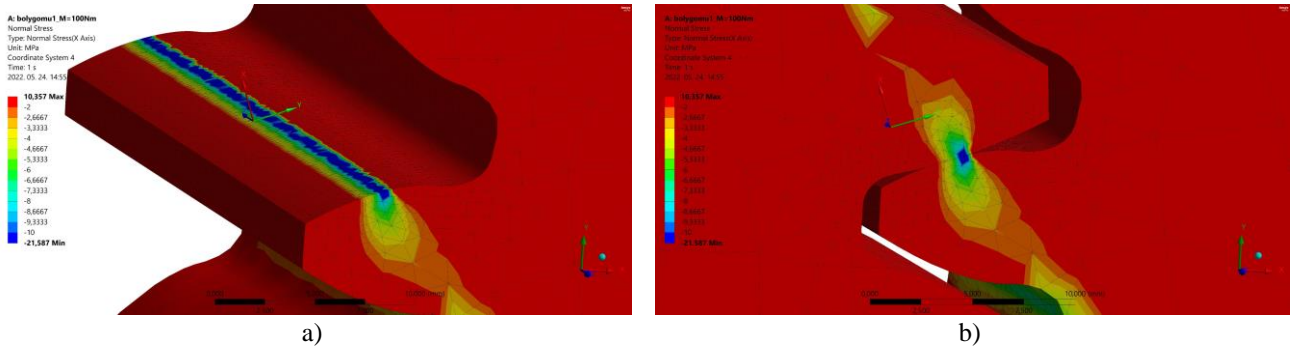


Figure 6. Normal stress distribution on the 1st type

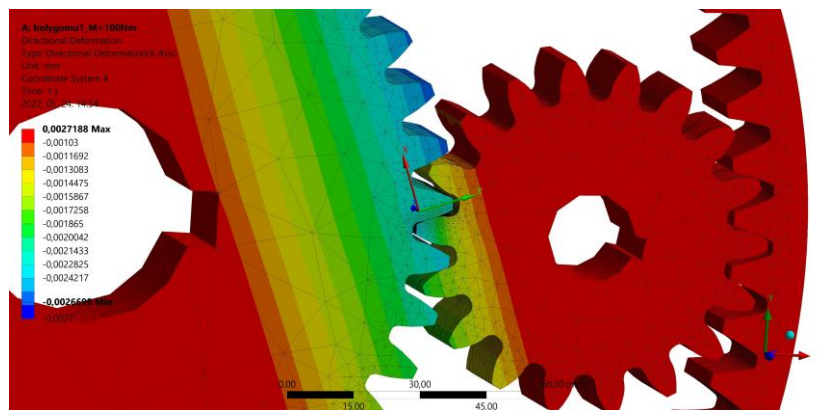
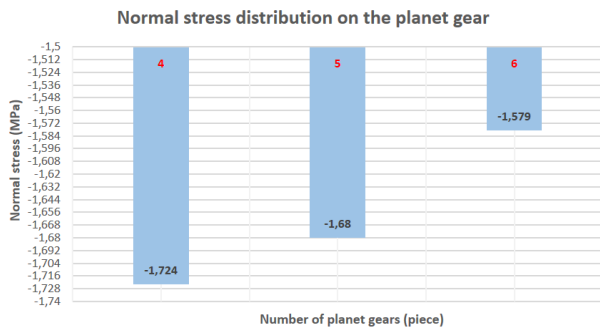


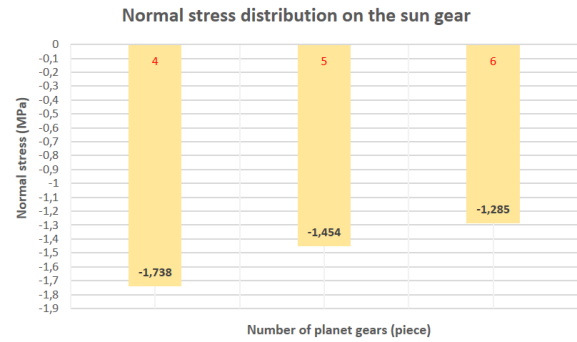
Figure 7. Normal stress distribution on the 1st type

The experiment was done for the three types of planetary gear drives. Medium normal stress and normal deformation results were considered for making the charts. Those results were determined on the surface of the sun gear and the planet gear.

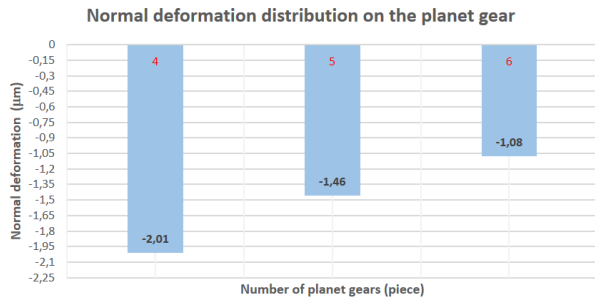
This analysis were done for each planetary gear drives (Figure 3). The results can be seen on Figure 6, 7 and 8. Based on the height of the rectangles it can be unequivocally seen that the deformation and the stress decrease if we increase the number of planet gears beside the constancy of the other input geometric parameters on the tooth connection zone of the sun gear and the planet gear.



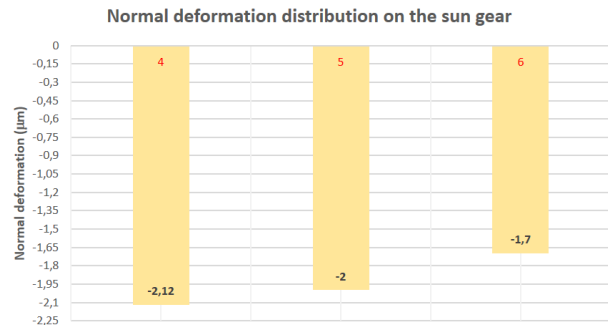
a)



b)



c)



d)

Figure 8. FEM results on the planet gear and the sun gear

5 FINITE ELEMENT ANALYSIS (PLANET GEAR – RING GEAR)

Static structural analysis were also done in this research. The material properties are the same as in the previous case (Table 2).

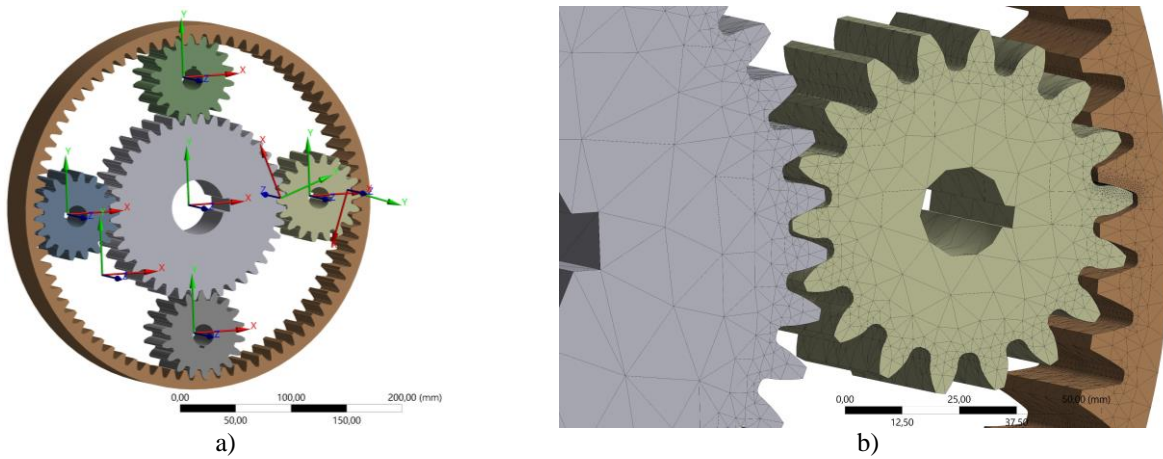
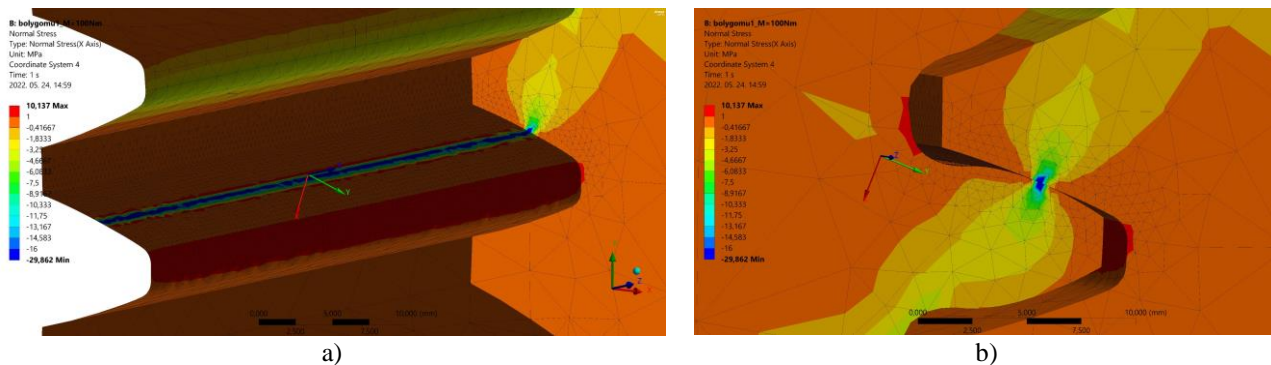


Figure 9. The adjustment of the coordinate systems (a) and the adoption of the FEM mesh (b)



a)

b)

Figure 10. Normal stress distribution on the 1st type

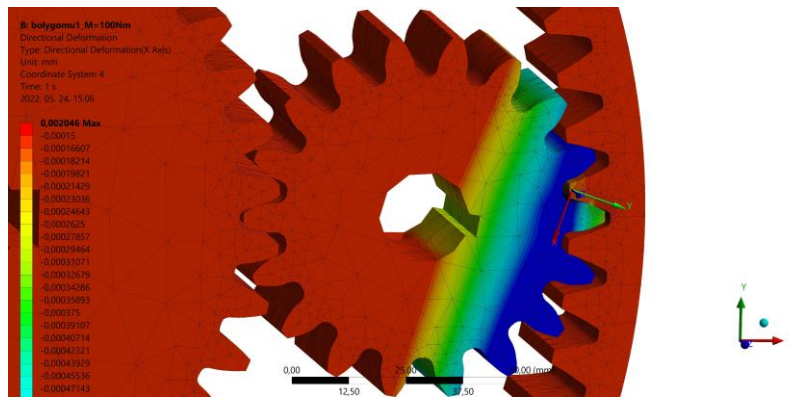


Figure 11. Normal stress distribution on the 1st type

The adjustment of the coordinate systems and the meshing between the planet gear and the ring gear can be seen on Figure 9. The contacts, the load and boundary conditions are the same as in the previous case (Figure 5).

This analysis were done for each planetary gear drives. The results can be seen on Figure 10, 11 and 12. Regarding the height of the rectangles we got similar results as in the previous case. It means that the deformation and the stress decrease if we increase the number of planet gears beside the constancy of the other input geometric parameters on the tooth connection zone of the planet gear and the ring gear.

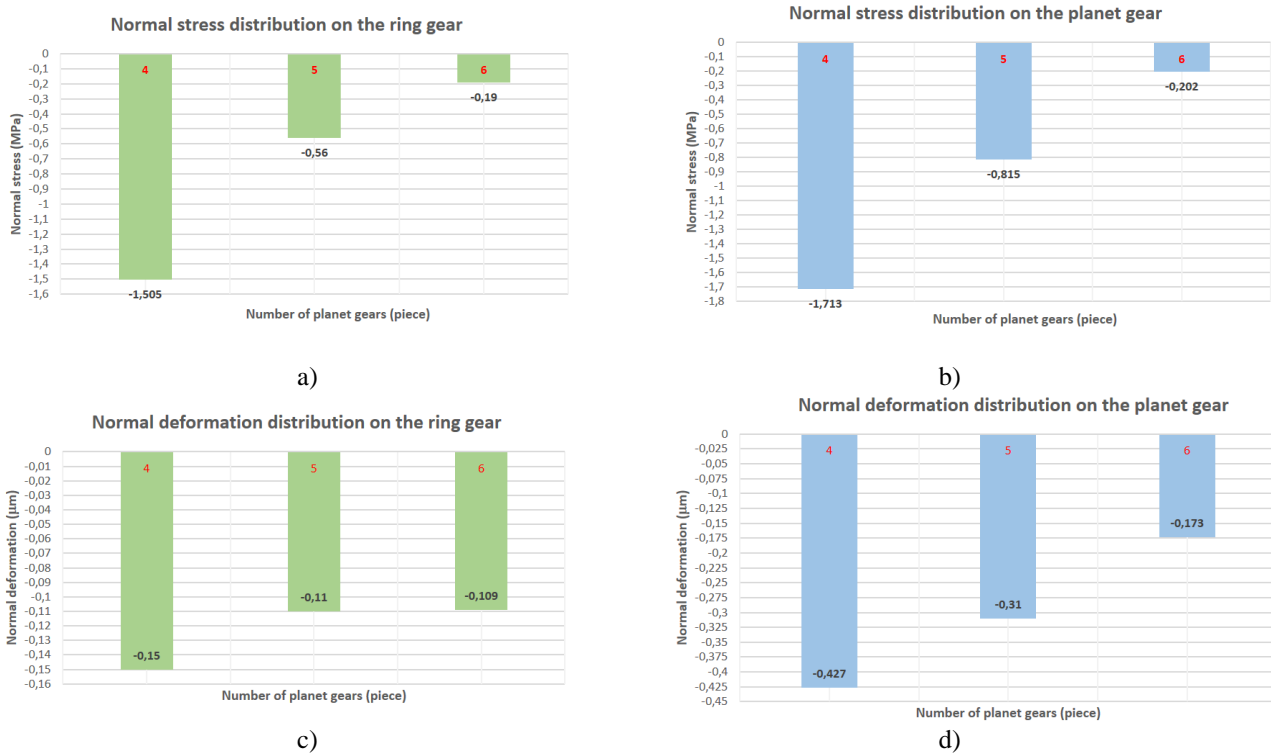


Figure 12. FEM results on the planet gear and the ring gear

ACKNOWLEDGEMENT

Project no. **TKP2020-NKA-04** has been implemented with the support provided from the National Research, Development and Innovation Fund of Hungary, financed under the 2020-4.1.1-TKP2020 funding scheme.

REFERENCES

- [1] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Bolyg%C3%B3m%C5%B1>
- [2] <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/epicyclic-planetary-gear/>
- [3] Litvin, F. L., Fuentes, A. A.: *Gear Geometry and Applied Theory*, Cambridge University Press, 2004, ISBN 978 0 521 81517 8
- [4] Terplán, Z., Apró, F., Antal, M., Döbröczöni, Á.: *Fogaskerék-bolygóművek*, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1979, p. 258

3D nyomtatással készített próbatetek szerkezetének és felületi tulajdonságainak vizsgálata

Investigation of surface morphology and structure of test specimens produced by 3D printing

Szigeti Ferenc¹ – Dezső Gergely² – Kósa Péter³ – Páy Gábor⁴

¹⁻⁴ Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézet 4400, Nyíregyháza Sóstói út 31/b
e-mail: szigeti.ferenc@nye.hu, dezso.gergely@nye.hu, kosa.peter@nye.hu, pay.gabor@nye.hu

Összefoglaló: A Ti6Al4V egy különleges ötvözet, melyet kémiai ellenálló-képessége, jó mechanikai tulajdonságai és biokompatibilitása miatt elterjedten használnak az ipar számos területén. Ez az ötvözet nehezen megmunkálható, ezért foglalkoznak az additív gyártásával. Additív gyártás esetén azonban a felületminőség, a felületi morfológia és a keménység eltér attól, amit hagyományos módszerrel gyártott alkatrészek esetén tapasztalhatunk. Szelektív lézeres olvasztással gyártott, Ti6Al4V alapanyagú próbatetek felületi keménységét tanulmányoztuk a gyártási paraméterek függvényében.

Kulcsszavak: felületi keménység, keménységmérés, additív gyártás, szelektív lézeres olvasztás, Ti6Al4V

Abstract: Ti6Al4V is a special alloy, which is used in several branches of industry because of its chemical endurance, good mechanical properties and biocompatibility. Machinability of this alloy is bad, that's why additive manufacturing of it is subject of intensive research. In case of additive manufacturing surface quality, morphology and hardness is different from what we can observe on parts manufactured by conventional methods. In this paper we present results of investigation of surface hardness of Ti6Al4V samples produced by selective laser melting.

Keywords: surface hardness, surface hardness test, additive manufacturing, selective laser melting, Ti6Al4V

1. BEVEZETÉS

A fémek additív gyártására leggyakrabban a szelektív lézeres olvasztást alkalmazzák [1] [2]. Egy különleges fémötvözet a Ti6Al4V, melynek előnye az alacsony tömegsűrűség, a nagy szilárdság, a kémiai állóképesség és a biokompatibilitás. Megmunkálhatósága függ az előállításának körülményeitől [3] [4] [5] [6]. Felhasználják például orvosi eszközök és implantátumok gyártása [7] [8]. Korábban próbatetek méretpontosságát és alakhelyességét vizsgáltuk [10] [11]. A 3D nyomtatással készített fémalkatrészek szerkezetének, felületi tulajdonságainak, felületi keménységének vizsgálata a későbbi gyakorlati alkalmazási lehetőségek mérlegelése, számba vétele miatt indokolt.

2. KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK, VIZSGÁLATI MÓDSZER

A vizsgálatokhoz az általunk készített testmodellek és kért gyártási paraméterek alapján a Debreceni Egyetem Biomechanikai Laboratóriumában 10 mm átmérőjű és 50 mm hosszú hengeres próbateteket készítettek. A szelektív lézeres olvasztási eljárással működő 3D nyomtató berendezés típusa: EOS-M290/400W.

A minták 2 különböző gyártási paraméter beállításával készültek, minden beállításból 8-8 darab. Két gyártási paramétert, a töltő lézer teljesítményét és a lézer sebességét változtattuk (1. táblázat). A töltő lézer teljesítménye és a lézer sebessége két fontos paraméter a szelektív lézeres olvasztásnál, melyek befolyásolják a gyártott alkatrészek szinte minden tulajdonságát. A 2. táblázat bemutatja azokat a legfontosabb paramétereket, amelyeket az egyes mintáknál állandó értéken tartottak. A nyomtatott próbatetek alsó, felső rétegeinek, kontúr- és élterületeinek paramétereit a gyártóberendezés alapértelmezett értékeire állították be, amelyek minden minta esetében azonosak voltak.

1. táblázat. A próbadarabok gyártási paramétereit

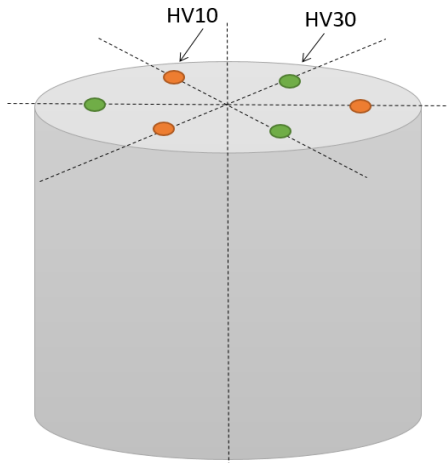
A paraméter beállítás kódja	A töltő lézer teljesítménye [W]	A töltő lézer sebessége [mm/s]	Teljesítménysűrűség [W/mm ³]
SLI	336	1440	55
SLII	233	1000	55
SLIII	280	1200	55

2. táblázat. További paraméterek, melyek mindegyik próbadarabnál változatlanok maradtak

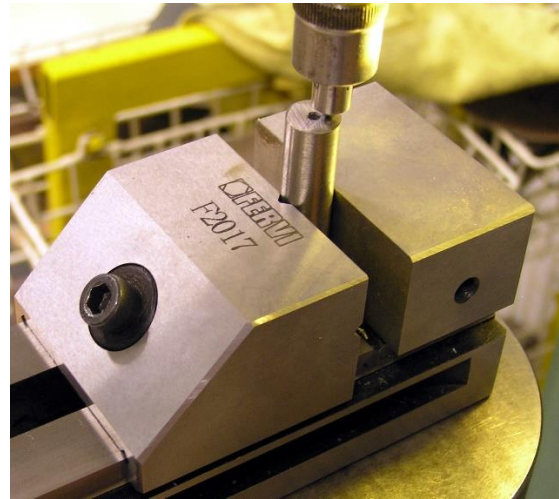
A gyártási paraméter neve	A gyártási paraméter értéke
réteg vastagság	0,03 mm
eltolási (hatch) távolság	0,14 mm

A próbadarab anyagként Ti6Al4V EOS Titanium Ti64ELI port alkalmaztunk. Anyagösszetétele 5,5-6,75 tömeg% Al, 3,5-4,5 tömeg% V, a maradék Ti és az O, N, C, H, Fe tartalom garantáltan egy előírt határérték alatt van [4]. A nyomtatott próbatetek felülete egyenetlen, keménységmérésre alkalmatlan volt, ezért előkészítésként 0,25 mm-es érintőfogással simító esztergálást végeztünk a próbatetek homlokfelületén (2. ábra). A felületi keménységmérést HPO-250 típusú keménységmérő berendezésen, 2 vizsgálati terheléssel, a próbatetek homlokfelületén (sík felületen) a 1. ábra szerint, 3 helyen, 120°-onként végeztük, majd meghatároztuk a mérések átlagát és szórását.

A próbatetek felületi keménységét HV10 és HV30 Vickers keménységméréssel mértük, az érvényes MSZ EN ISO 6507-1 szabvány [9] szerint akkreditált anyagvizsgáló laboratóriumban.



1. ábra. Mérési pontok a próbatest homlokfelületén



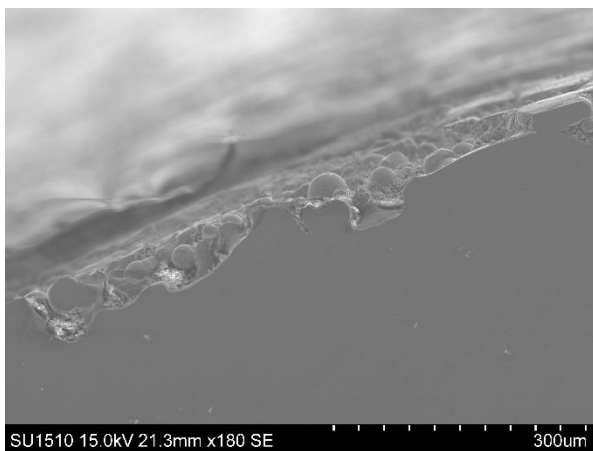
2. ábra. HV10 mérése prizmában palástfelületen

A HV10 és HV 30 keménységértékek meghatározása az MSZ EN ISO 6507-1 szabvány szerint [9] történt.

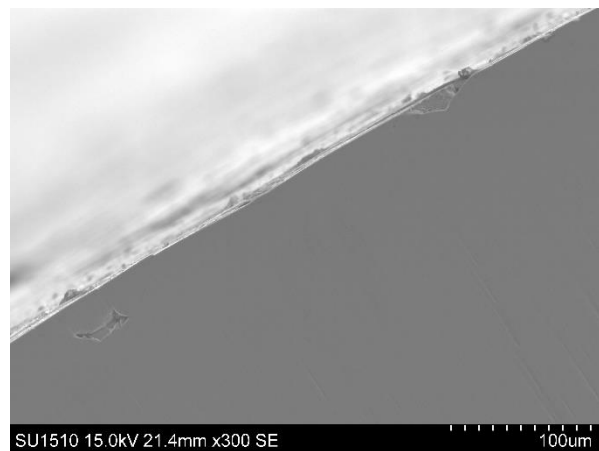
3. MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1. A próbatetek felületének és szerkezetének vizsgálata

A 3D nyomtatással készített próbatetek felületét és keresztmetszetét pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk. A 3. ábrán az SLIII-1 jelű minta felületét és keresztcsiszolatát mutatjuk be. A felületen részben megolvadt porszemcsék láthatók. A felületi egyenlőtlenségek 2-300 µm nagyságúak. Ebben a mintában a keresztcsiszolaton a felülettől 300 µm-nél nagyobb távolságra nem fedezhetők fel porushibák.



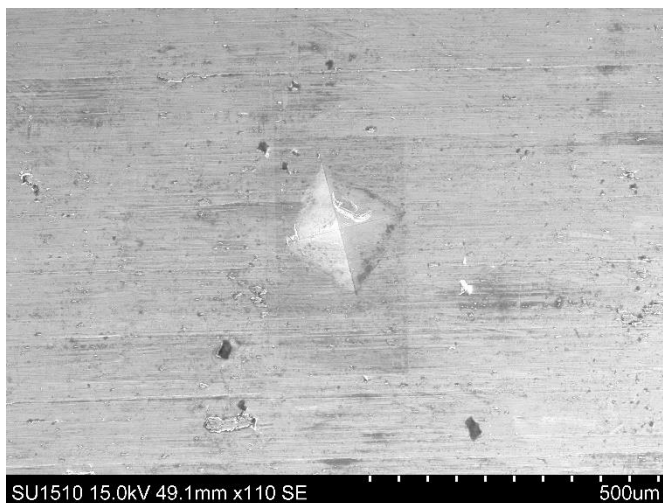
3. ábra. Az SLIII-1 jelű minta felületéről és keresztcsiszolatáról készült elektronmikroszkópos felvétel



4. ábra. Az SLIII-1 jelű minta megmunkálás utáni felületéről és keresztcsiszolatáról készült elektronmikroszkópos felvétel

A próbatestek eredeti, nyomtatott felületének 3. ábrán is látható egyenetlenségei, felületi porozitása miatt keménységmérésre alkalmatlan volt, ezért 0,25 mm-es érintőfogással a próbatestek homlokfelületét esztergagépen lemunkáltuk. A megmunkálás utáni keresztcsiszolatot, amelyen részben a felület is látható, a 4. ábrán mutatjuk be. Ezen jól látható, hogy az utómegmunkálás hatására a felületi porozitás jelentősen lecsökkent, azonban a felületi rétegben továbbra is maradtak pórusok. Ebben a mintában sem találtunk a keresztcsiszolaton a felülettől 300 µm-nél nagyobb távolságra pórushibákat.

Az 5. ábrán, az elektronmikroszkópos felvételen a keménységmérés lenyomata mellett jól láthatók, hogy a próbatest felületén a lemunkálás után is maradtak egyenlőtlenlégek, pórusok, amelyek növelték a keménységmérési eredmények szórását.



5. ábr.: A próbatest homlokfelületén végzett keménységmérés lenyomatáról készített elektronmikroszkópos felvétel

3.2. Homlokfelületen mért HV10 és HV30 felületi keménységértékek és összehasonlításuk

A próbatestek homlokfelületén mért HV10 és HV30 felületi keménységértékeket, valamint a mérési eredmények átlagát és szórását az SLI, SLII, SLIII jelű próbatestekre vonatkozóan a 3–5. táblázatok foglalják össze. A mért HV10 és HV30 értékek összehasonlítását a 6–8. ábrákon mutatjuk be.

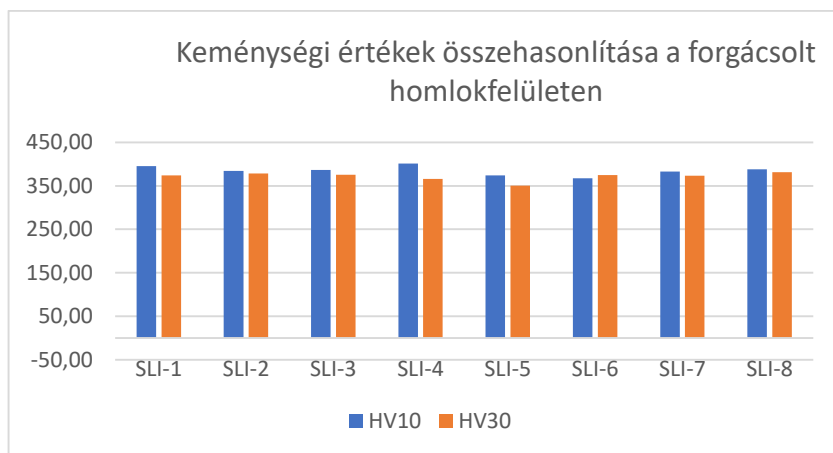
Az azonos gyártási paraméterekkel készült SLI-II-III próbatestek HV 10 és HV30 mérési eredményeinél megfigyelhető, hogy a mért keménységértékek szórása jelentős (3–5. táblázat), amely a nyomtatott rétegek inhomogenitásával, a nyomtatás, a lézeres olvasztás során keletkező pórusok egyenlőtlen eloszlásával magyarázható.

3. táblázat., „SLI” jelű próbatestek homlokfelületén mért HV10 és HV30 felületi keménységértékek

jelölés	Forgácsolt homlokfelületen							sorátlag
	HV10			sorátlag	HV30			
SLI-1	405	394	387	395,3	385	366	371	374,0
SLI-2	383	394	376	384,3	377	379	379	378,3
SLI-3	387	394	380	387,0	375	373	379	375,6
SLI-4	420	397	387	401,3	360	362	375	365,6
SLI-5	383	366	373	374,0	348	355	349	350,6
SLI-6	354	369	380	367,6	375	369	381	375,0
SLI-7	383	390	376	383,0	379	369	373	373,6
SLI-8	397	387	380	388,0	385	377	383	381,6
Átlag	385,1				371,8			
Szórás	13,2				10,2			

Az SLI-II-III sorozatok próbatestjein mért HV10 és HV30 keménységértékek összehasonlítása (3–5. táblázat) alapján megállapítható, hogy a mért HV30 értékek esetenként 5-9%-kal, átlagosan 2-4%-kal kisebbek, mint a mért HV10 értékek (mindez vizuálisan is jól látható a 6–8. ábrákon). Ennek lehetséges oka a HV30 mérésénél alkalmazott nagyobb

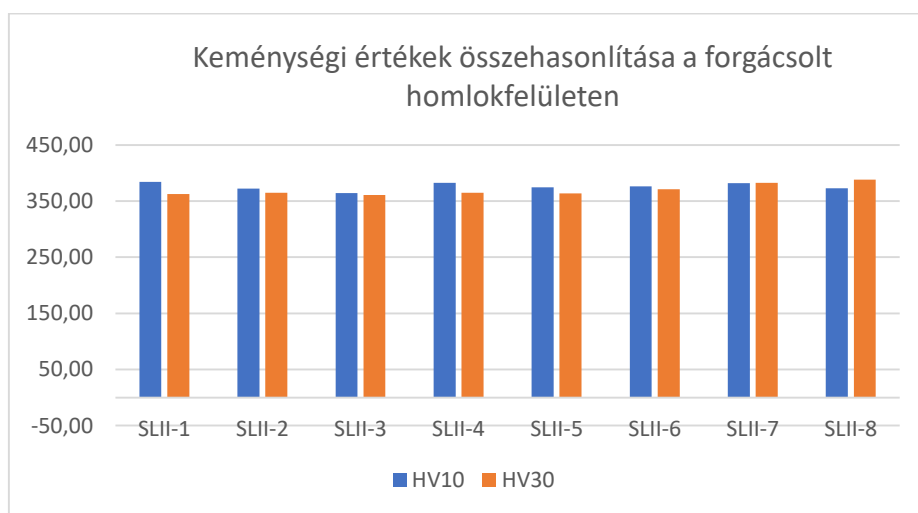
terhelés révén keletkező, nagyobb méretű és mélységű lenyomat, amely nagyobb felületen és rétegvastagságban teszi lehetővé a próbatestfelületek átlagos keménységének mérését, és amely így jobban figyelembe veszi a nyomtatott rétegek közötti pórusokat, inhomogenitást. Ez ad magyarázatot a HV30-as mért keménységértékek kisebb szórására a HV10 mért értékek szórásához képest mind az SLI jelű, mind az SLIII jelű próbatestek keménységmérési eredményeinél (3. és 5. táblázat).



6. ábra. „SLI”jelű próbatestek homlokfelületén mért HV10 és HV30 felületi keménységértékek összehasonlítása

4. táblázat. „SLII” jelű próbatestek homlokfelületén mért HV10 és HV30 felületi keménységértékek

jelölés	Forgácsolt homlokfelületen							sorátlag
	HV10			sorátlag	HV30			
SLII-1	394	383	376	384,3	364	369	355	362,7
SLII-2	357	363	397	372,3	379	368	348	365,0
SLII-3	373	363	357	364,3	366	362	355	361,0
SLII-4	380	387	380	382,3	360	373	362	365,0
SLII-5	390	376	357	374,3	381	344	366	363,7
SLII-6	390	376	363	376,3	366	369	379	371,3
SLII-7	369	383	394	382,0	393	369	385	382,3
SLII-8	369	383	366	372,7	383	398	383	388,0
Átlag	376,1				369,9			
Szórás	12,2				13,1			

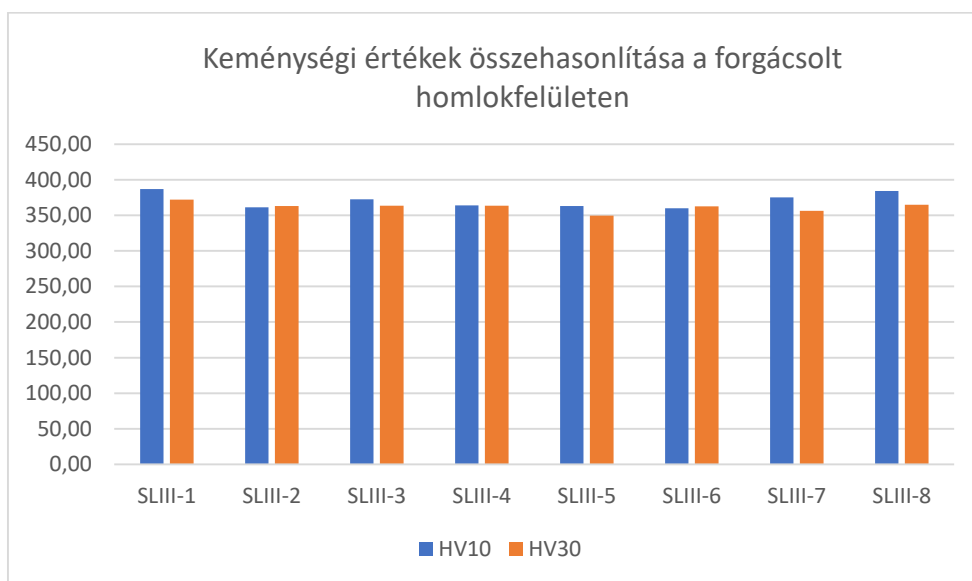


7. ábra. „SLII”jelű próbatestek homlokfelületén mért HV10 és HV30 felületi keménységértékek összehasonlítása

A 3–5. táblázatban feltüntetett és a 6–8. ábrákon bemutatott mérési eredmények alapján megállapítható, hogy az 1. táblázatban megadott 3D gyártási paraméterek értékei szignifikánsan befolyásolják a nyomtatott próbatestek felületi keménységét (mind a HV10, mind a HV30 keménységet). A vizsgált paraméterbeállításoknál mind a töltő lézer teljesítményének növelése (pl. 280W-ról 336W-ra), mind a töltő lézer sebességének a növelése (1200 mm/s-ról 1440 mm/s-ra) – ugyanolyan teljesítménysűrűség mellett – elősegíti a próbatestek HV10 és HV30 felületi keménységének a növelését (6. táblázat). Ezáltal ugyanis jobb lesz a rétegek összeolvasztása, kevesebb pórus marad vissza, homogénebb lesz a szerkezet, jobban egymáshoz kötődnek a lézerrel megolvasztott porrészekcskék.

5. táblázat. „SLIII” jelű próbatestek homloklfelületén mért HV10 és HV30 felületi keménységértékek

jelölés	Forgácsolt homloklfelületen							
	HV10			sorátlag	HV30			sorátlag
SLIII-1	390	387	383	386,7	371	379	366	372,0
SLIII-2	357	354	373	361,3	346	356	387	363,0
SLIII-3	383	366	369	372,7	353	364	373	363,3
SLIII-4	387	366	339	364,0	358	362	371	363,7
SLIII-5	360	369	360	363,0	362	344	342	349,3
SLIII-6	369	347	363	359,7	355	367	366	362,7
SLIII-7	363	380	383	375,3	349	362	358	356,3
SLIII-8	390	380	383	384,3	366	364	364	364,7
Átlag	370,9				361,9			
Szórás	13,8				10,5			



8. ábra. „SLIII” jelű próbatestek homloklfelületén mért HV10 és HV30 felületi keménységértékek összehasonlítása

6. táblázat. Homloklfelületen mért HV10 és HV30 keménységértékek összehasonlítása

Paraméter-beállítás kódja	Töltő lézer teljesítménye [W]	Töltő lézer sebessége [mm/s]	Teljesítménysűrűség [W/mm ³]	HV10		HV30	
				átlag	szórás	átlag	szórás
SLI	336	1440	55	385	13,2	371,8	10,2
SLII	233	1000	55	376,1	12,2	369,9	13,1
SLIII	280	1200	55	370,9	13,7	361,9	10,5

4. ÖSSZEGZÉS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Additív gyártással készített hengeres alkatrészek szerkezetének és felületi keménységének vizsgálatát végeztük el. A próbatetek felületi keménységét a próbatetek homlokfelületén HV10 és HV30 Vickers keménységméréssel mértük, az MSZ EN ISO 6507-1:2018 szabvány alapján. A próbateteket szelektív lézeres olvasztással (SLM) készítettük Ti6Al4V alapanyagból, eltérő gyártási paraméterekkel. Három különböző gyártási paraméter kombinációt választottunk ki a kísérletekhez, mindegyik esetben 8 darab próbatetet készítettünk és vizsgáltunk. A mérési eredmények elemzése alapján az alábbi főbb megállapítások fogalmazhatók meg:

– Az azonos gyártási paraméterekkel készült próbatetek HV10 és HV30 mérési eredményeinél egyaránt megfigyelhető, hogy a mért keménységértékek szórása jelentős, amely a nyomtatott rétegek inhomogenitásával magyarázható.

– A homlokfelületeken mért HV10 és HV30 keménységértékek összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a HV30 értékek átlagosan 5-9%-kal kisebbek, mint a HV10 értékek. A HV30 nagyobb felületen és rétegvastagságban méri a felület átlagos keménységét, jobban figyelembe veszi a nyomtatott rétegek közötti pórusokat, inhomogenitást. A mért HV30-as keménységértékek szórása általában kisebb, mint a HV10 értéké.

– Mind a töltő lézer teljesítményének, mind a töltő lézer sebességének a növelése – ugyanolyan teljesítmény sűrűség mellett – elősegíti a próbatetek HV10 és HV30 felületi keménységének a növelését (jobb lesz a rétegek összeolvasztása, homogénebb lesz a szerkezet).

– A próbatetek felületéről és keresztcsiszolatáról készített elektronmikroszkópos felvételek azt mutatták, hogy a 3D nyomtatással készített felület egyenetlen, pórusokkal teli. Vizsgálataink kimutatták, hogy utómegmunkálással a felületi porozitás jelentősen lecsökkenthető. A vizsgált mintákban a felülettől 300 µm-nél nagyobb távolságban nem találtunk pórushibát.

Köszönetnyilvánítás

„Az NKFI-125117 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a K_17 pályázati program finanszírozásában valósult meg.” A kutatás támogatást kapott az „Implantátumok osteoszintézisének kutatása és trabekuláris szerkezet kifejlesztése Additive Manufacturing alkalmazásával” című, GINOP-2.2.1-15-2017-00055 azonosító számú projektből. A próbatetek a Debreceni Egyetem Biomechanikai Laboratóriumában készültek a projekt keretében. A keménységméréseket a Nyíregyházi Egyetem Anyagvizsgáló Laboratóriumában végeztük.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Esmaeilian, B.; Behdad, S.; Wang, B.: The evolution and future of manufacturing: A review, *Journal of Manufacturing Systems* 39 (2016) 79–100.
- [2] Thompson, M. K. et al: Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 65 (2016) 737–760.
- [3] Arrazola, P.-J.; Garay, A.; Iriarte, L. M.; Armendia, M.; Marya, S.; et al: Machinability of Titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, 2009, 209 (5), pp. 2223-2230. 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.020. hal-01002827
- [4] Material data sheet of EOS Titanium Ti64ELI: <https://www.sculpteo.com/media/imagecontent/EOS-Titanium-Ti64ELI.pdf>
- [5] Maximov, J.T., Anchev, A.P., Duncheva, G.V., Ganev, N, Selimov, K.F.: Influence of the process parameters on the surface roughness, micro-hardness, and residual stresses in slide burnishing of high-strength aluminium alloys, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 39(8) (2017) pp. 3067–3078.
- [6] Revankar, G.D., Shetty, R., Rao, S.S., Gaitonde, V.N.: Wear resistance enhancement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) by ball burnishing process, *Journal of Materials Research and Technology* 6 (1) (2017) pp. 13–32.
- [7] Dudás, I.; Cser, I.; Varga, Gy.: Modelling by rapid prototyping at the department of production engineering of UM, In: Lehoczky, László; Kalmár, László (szerk.) *microCAD 2003*, M szekció: International Scientific Conference, Miskolc, Magyarország: Miskolci Egyetem, (2003) pp. 47-52., 6 p. ISBN 963 661 646 9 o. ISBN 963 661 559 4
- [8] Dudás, I ; Varga, Gy ; Felhő, Cs.: A Rapid-prototyping eljárások orvosi alkalmazási lehetőségei In: Bitay, Enikő (szerk.) *X. FMTÜ Nemzetközi Tudományos Konferencia, Kolozsvár, Románia: Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME)*, (2005) pp. 279–282, 4 p.
- [9] MSZ EN ISO 6507-1: 2018: Fémek. Vickers-keménységmérés. 1. rész: Mérési eljárás
- [10] G. Dezső and P. Kósa, ‘Dimensional and shape accuracy of cylindrical and paralelepiped-like parts made by selective laser melting technology’, *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, vol. XVIII, no. 1, pp. 39–45, 2020.
- [11] G. Dezső and P. Kósa, ‘Effect of manufacturing parameters on circular runout of selective laser melted metallic parts’, *Int. J. Eng.*, vol. 19, no. 3, pp. 59–63, 2021.

Cellás szerkezetű, poliszacharid-mátrixú kapszula fejlesztése gyógyászati felhasználásra

Development of a polysaccharide-matrix capsule with a cellular structure for pharmaceutical use

Szoboszlai András¹ – Budai István²

¹ Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Műszaki Menedzsment Tanszék, Debrecen Ótemető utca 2–4. 4225, andras.szoboszlai@neopac.com

² Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Műszaki Menedzsment Tanszék, Debrecen Ótemető utca 2–4. 4225, budai.istvan@eng.unideb.hu

Összefoglaló: Napjainkban egyre több cég igyekszik visszaszorítani a mesterséges és állati eredetű alapanyagok felhasználását termelési folyamataik során, és egyre inkább elterjedtté válnak a növényi forrásból származó termékek. Ez alól nem kivétel a gyógyszeripar sem. A szájon át történő adagolási formák közül a legelterjedtebbek a kemény és lágy zselatinkapszulák. A zselatint állati eredetű kollagénből vonják ki, amelynek fogyasztása bizonyos életmódirányzatok, illetve vallások gyakorlói körében nem preferált, valamint az ilyen kapszulák előállításához adalékanyagokat alkalmaznak, amelyek számos esetben allergiás reakciót váltanak ki a páciensekben. Célunk egy olyan cellás szerkezetű gyógyszerforma kifejlesztése, amely alkalmas a mai gyógyszeriparban használatos zselatinkapszulák kiváltására. A cellás szerkezet elősegíti a hatóanyag minél jobb hasznosulását, továbbá ezáltal csökkenthető a hordozó mátrix mennyisége is. Célunk az volt, hogy stabil lebegő formulát állítsunk elő habosítással. A mátrixkomponensek közül a pektin bizonyult megfelelőnek. Ezt a mátrixot 60 °C-ra melegítettük a hatóanyag-diszperzió előállítása érdekében, majd ultrahangos homogenizátorral légköri nyomáson levegővel habosítottuk. A formázott, szilárd hab szerkezetét mikroCT segítségével vizsgáltuk. Kísérleteink szerint gyors homogenizálással stabil habot lehetett előállítani felületaktív anyag és egyéb adalékok nélkül. Az előállított szilárd habkapszulák tartósságát és gyomorkörnyezetben való szétesését, valamint a hatóanyag kioldódását vizsgáltuk.

Kulcsszavak: poliszacharid, gyógyszerkészítmény, cellás szerkezet, szilárd habkapszula

Abstract: Nowadays, more and more companies are trying to reduce the use of artificial and animal-based ingredients in their production processes, and plant-based products are becoming more common. The pharmaceutical industry is not an exception. The most common oral dosage forms are hard and soft gelatine capsules. Gelatine is extracted from collagen of animal origin, which makes its use unpopular with certain lifestyles and religions. Our aim is to develop a pharmaceutical formulation with a cellular structure that is suitable to replace the gelatin capsules used in the current pharmaceutical industry. The cellular structure will facilitate better utilisation of the active ingredient and reduce the amount of carrier matrix. Our aim was to produce a stable floating formulation by foaming. Among the matrix components, pectin proved to be suitable. This matrix was heated to 60°C to produce a dispersion of the active ingredient and then foamed with air at atmospheric pressure using an ultrasonic homogenizer. The structure of the formulated solid foam was investigated by microCT. Our experiments showed that a stable foam could be obtained by rapid homogenization without surfactant or any other additives. The durability and disintegration in the gastric environment of the solid foam capsules were investigated, as well as the release of the active ingredient.

Keywords: polysaccharide, pharmaceutical dosage form, cellular structure, solid foam capsule

1. BEVEZETÉS

A habok olyan üreges szerkezetű anyagok, amelyeknek pórustartalma legalább az anyag egészének 50%-át teszi ki. Az anyagban ezek az üregek buborékok, úgynevezett cellák formájában vannak jelen, amiket folyékony vagy szilárd fal választ el egymástól [1]. A habszerkezetet alapvetően a természet ihlette, a mesterségesen előállított habok kifejlesztése során a természetben is előforduló üreges anyagok tulajdonságait vették alapul, ilyen például a csont, a fa, a bambusz és a tengeri szivacs, melyeket az emberiség ősidők óta ismer és használ. A mesterségesen előállított cellás szerkezetek a számos kedvező tulajdonságuknak köszönhetően nagyon elterjedtek. [2] A gyógyászatban a növényi eredetű habok orális úton történő alkalmazása több szempontból is előnyös lehet. Szerkezetének köszönhetően egyenletesebb és hatékonyabb hatóanyag-felszívódást biztosít, valamint nem okoz irritációt. Előállításuk viszonylag egyszerű folyamat, nem időigényes, kevés alapanyag-felhasználást igényel [3].

A különböző gyógyszerészeti termékek célbajuttatásának számos módja ismert. Ezek közül azonban a legszélesebb körben alkalmazott gyógyszerbeviteli forma a szájon át történő adagolás. Ez többféle módon történhet, léteznek orálisan adagolható tabletták, porok, oldatok, illetve szuszpenziók is [4]. A szájon át történő adagolásnak számos előnye van, mint például a kényelem, az egyszerű használat és a biztonság. Ezek a gyógyszerek fájdalommentesen juttathatók be a szervezetbe, és az ilyen terápiával kezelt betegek gyógyszeradagolás szempontjából kevesebb felügyeletre szorulnak. Mindezek mellett a szájon át történő alkalmazhatóság igen költséghatékonyá teszi ezeket a szereket [5]. Az orális adagolásnak a számos előny mellett van néhány jelentős hátránya is. Ez leginkább abból adódik, hogy több ismert és használt gyógyszermolekula is kisebb permeabilitást, illetve alacsony lebomlási sebességet és oldhatóságot mutat [6]. A gasztrointesztinális traktus sajátosságai nagyban befolyásolják bizonyos gyógyszerek felszívódását. Ilyen például a tápcsatorna egyes részei között tapasztalható pH-különbség vagy a nyálkahártyahatárok alacsony gyógyszeráteresztő képessége. Ezeken felül kihívást jelent az esetleges kedvezőtlen gyógyszerstabilitás és a rossz gyógyszeroldhatóság [7]. Mindezen tényezők befolyása miatt a formulák tervezésekor figyelembe kell venni, hogy a készítmény mennyi ideig tartózkodik a gasztrointesztinális traktus egyes szakaszaiban, illetve hogy a hatóanyag leadása meghatározott helyen történjen, a megfelelő emésztőrendszeri környezet (pH) hatására. Fontos tényező továbbá a hatóanyag stabilitása, oldhatósága, a lebontás formája (mikrobiális vagy enzimátikus), valamint a bélnedv mennyisége. [8].

A szájon át történő gyógyszeradagolás legbiztonságosabb és legtolerálhatóbb formája a kapszula, különösen, ha a gyógyszer rossz ízű vagy szagú, fényérzékeny. A kapszula alakja megkönnyíti a lenyelést, bevonata pedig nyugtató és hidratáló hatású. A kapszulák elősegítik a tartós, célzott felszabadulást az emésztőrendszeren keresztül. A zselatinkapszulákat két formában állítják elő: lágy zselatinkapszulák folyékony vagy félszilárd töltetű készítményekkel [9] [10], kemény zselatinkapszulák szilárd töltetű készítményekkel [11]. A zselatint az állati kötőszövetben megtalálható kollagén hidrolízisével állítják elő. A túlzott kollagénbevitel a bélrendszer károsodásához, hiperkalcémia kialakulásához és vesekőképződéshez vezethet, valamint egyénenként eltérő allergiás reakciót válthat ki. A kapszulák kialakítása során polietilén-glikolt (PEG) alkalmaznak adalékanyagként, ami biztonságos anyagként van számontartva. Kutatások kimutatták, hogy a PEG-ellenes antitestek mennyisége egyénenként meglehetősen változó, így a PEG használata hiperérzékenységhöz vezethet. [12]

A növényi eredetű poliszacharidokat kedvező tulajdonságaik miatt széles körben használják gyógyszeripari segédanyagként, és egyre elterjedtebb a gyógyszerhordozóként történő alkalmazásuk:

- nagy mennyiségben előfordulnak a természetben, kivonási módjuk ismert és dokumentált,
- a szintetikus polimerekkel szemben biológiailag lebomlóak, biokompatibilisek, és az immunológiai reakció kockázata elhanyagolható. Ezen tulajdonságaik alapján ideálisak célzott hatóanyag-leadó rendszerek kifejlesztésére, amelyek meghatározott helyen és időben képesek a hatóanyagot felszabadítani [13] [14] [15] [16].

A fentiekben leírtak alapján célunk egy cellás szerkezetű, növényi poliszacharid gyógyszerforma előállítás.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. Anyagok

A gyógyszerforma előállításához kiválasztott növényi eredetű poliszacharidok: alginát, karragén, pektin; hatóanyag: metronidazol (MNZ, Molar Chemicals Kft., Halásztelek). A poliszacharidok mellett alkalmaztunk szacharózt és desztillált vizet.

2.2. A habosító berendezés felépítése

A berendezés három fő részre osztható: egy 50 mL térfogatú, hőmérséklet-szabályozott tartály, Bandelin Sonopuls HD4200 ultrahangos homogenizáló TS103 szonotróda szondával (BANDELIN Electronic GmbH & Co. KG, Berlin, Németország) és egy gázbefecskendező készülék, amely a gázt atmoszférikus nyomásra alakítja át [17].

2.3. Szilárd habkapszulák előállítása

A különböző anyagokat a következő módszerrel habosítottuk. A poliszacharidot és cukrot tartalmazó oldat egész tömegét lemértük, majd az egész oldat tömegéhez viszonyítva határoztuk meg a plusz 30 tömeg%-nyi (24 g) metronidazol hatóanyag mennyiségét. A desztillált vízből 40 mL-t mértünk egy főzőpohárba, majd abban 35 g szacharózt oldottunk fel, az így kapott oldatot melegítettünk. Az oldat 60 °C-ra történő melegítése után hozzáadtuk a poliszacharidot (5 g) és a szemcsés halmazú hatóanyagot. Ezután folyamatos hűtés mellett kezdtük meg az atmoszférikus nyomású levegő diszpergálását az ultrahangos keverés segítségével. A habosítási folyamatot addig folytattuk, míg a kompozit el nem kezdett dermedni-megszilárdulni, így a habosítás ideje az egyes kompozitok esetében eltérő volt. A habosított, még folyékony rendszert hideg acélformába öntöttük, és mértük a teljes megszilárdulás idejét. Ezután a szilárd habkapszulák lebegését vizsgáltuk.

2.4. Kioldódás-vizsgálat

Az oldódási vizsgálathoz gyomorfoládékat utánzó 900 mL, pH=1,2-es sósav- és nátrium-klorid-oldatot alkalmaztunk [18]. A forgólapátos módszert 75 fordulat/perc fordulatszámmal és 37 °C-on állítottuk be egy oldódásteresztelő készülékben (Erweka DT 800), ezzel imitálva a gyomor mozgását. A szilárd mintákból való hatóanyag-kioldódás meghatározásához 4 mL mennyiségű folyadék mintákat 0, 5, 15 és 60 perc, valamint 2 és 2,5 óra elteltével vettük le. A mintákat tisztított vízzel hígítottuk és 0,22 µm-es PES membrános fecskendőszűrőn keresztül szűrtük. A felszabadult MNZ mennyiségét UV/VIS spektrofotométerrel (Shimadzu UV 1601, Shimadzu Corp. Kyoto, Japán) határoztuk meg 278 nm-en. Minden összetételből három véletlenszerű mintát választottunk ki a vizsgálatokhoz. A lebegést a vizsgálat elején, közben és végén is ellenőriztük.

2.5. A nedvességtartalom-csökkenés vizsgálata

Az alginát-, karragén-, pektinmátrixú minták nedvességtartalom-csökkenésének vizsgálatát a szobahőmérsékleten való száradás felgyorsítása érdekében szárítószekrényben végeztük. A szárítási hőmérsékletet 37 °C-on határoztuk meg, hogy elkerüljük az esetleges roncsolódást, valamint a cukor karamellizálódását. A kísérlet során a szárítás előtt lemértük a minták tömegét, és félóránként vizsgáltuk a víz mennyiségének csökkenését.

2.6. Mikrotomográfia

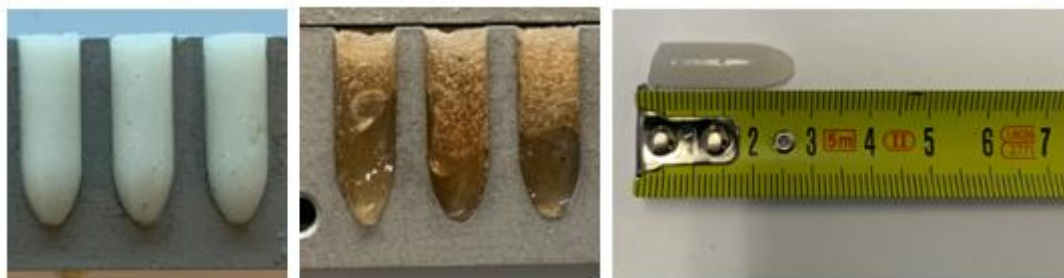
A megszilárdult habosított minták belső mikroszerkezetének jellemzésére mikrotomográfias módszert használtunk. A méréshez egy SkyScan 1272 kompakt asztali mikroCT-rendszert használtunk. A szkennelési paraméterek a következők voltak: képpixelméret, 5 µm; mátrixméret, 1344×2016 (sorok × oszlopok); forrásfeszültség = 50 kV; forrásáram = 200 µA; sík térkorrekció és geometriai korrekciót alkalmaztunk. A szkennelést követően a SkyScan NRecon csomagot használtuk a keresztmetszeti képek rekonstrukálásához a tomográfias vetületi képekből. Utóigazítást, sugárkeményedés-korrekciót, gyűrűs artefaktum-korrekciót és simítást végeztünk.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Szilárd habkapszulák előállítás

Az alginátkompozit nehezen hűlt le a habosítás során, így a gázbuborékok csapdázását 10 perces hűtési folyamat előzte meg, ezután további 5 perc alatt sikerült a teljes mennyiséget habosítani. A karragénkompozit kismértékű, 3-4 °C-os hőmérséklet-csökkenés hatására szilárdulni kezdett, így a habosítást és a formába öntést rövid idő alatt kellett elvégezni, a habosítás 4 percet vett igénybe. A pektinkompozit a hőmérséklet-csökkenés hatására a karragénrendszerrel is gyorsabb dermedési sebességgel rendelkezik, így ez esetben elhagytuk a rendszer hűtésének lépését, a meleg kompozitot hatékonyan lehetett habosítani (2 perc). A habosítási folyamatokból azt lehetett megállapítani, hogy a hatóanyag szemcséinek jelenléte – jelen esetben a metronidazol – a gázmolekulák csapdázódását elősegíti.

A kapszulaforma kialakításának eredményei az 1. ábrán láthatóak. Az alginátkompozit nagyon viszkózus volt, és nehezen dermedt meg, több mint 24 óra elteltével is voltak a kapszulában meg nem szilárdult részek. A fém öntőforma használata nem bizonyult megfelelőnek a forma kialakítására, az alginátrendszer ugyanis a formát összeragasztotta, így annak kinyitásakor az anyag roncsolódott, ebből arra következtethetünk, hogy az általunk használt formázási módszerrel nem biztos, hogy az alginátrendszer habkapszulaként történő alkalmazása megoldható. A habosított karragénkompozit könnyen önthető volt, viszonylag hamar megszilárdult (5 perc). A pektinkompozit a karragénhoz hasonló öntési tulajdonságokkal rendelkezett, az öntőforma kúpos részébe is könnyen bevihető, dermedése szinte azonnal megtörténik, amint az hideg fémfelülettel érintkezik. A szilárdulás után a 25 mm hosszúságú, 8 mm átmérőjű kapszula pár másodperc után, felületaktív anyagtapadás-csökkentő alkalmazása nélkül is könnyen kivehető az öntőformából, miközben a kapszula anyaga nem roncsolódik.



1. ábra. Habosított karragén- és pektinolvadék formázásának eredménye a megszilárdulás után

A karragén és a pektin habkapszulák lebegési vizsgálatát a 2. ábrán mutatjuk be, amelyen az látható, hogy a cellás szerkezetek képesek folyadékban (szobahőmérsékletű vízben) lebegni.

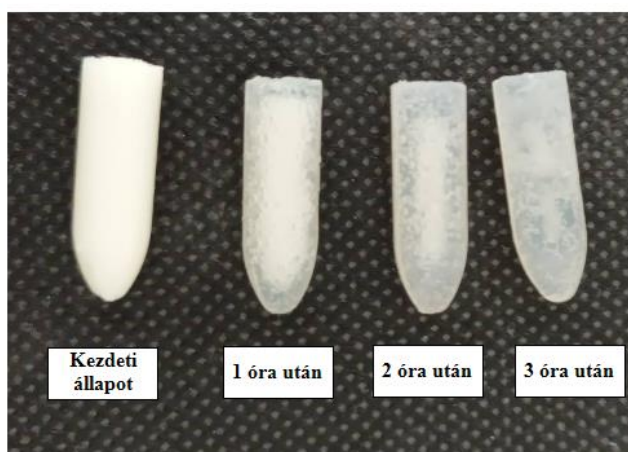


2. ábra. Karragén és pektin habkapszula lebegési próbájának eredménye

3.2. Kioldódási vizsgálat

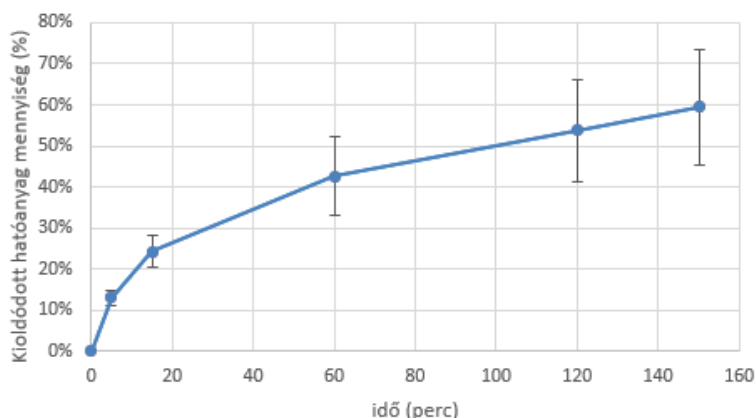
Az előállítás során megfigyelték alapján kioldódási vizsgálatot a karragén- és pektinkapszulákon végeztünk. A karragénkapszula kb. 20 perc eltelte után volt képes lebegni a gyomorfolyadék felszínén, azelőtt a folyadék belsejében úszott. Ezen idő eltelte alatt már láthatóak voltak a kapszulán a szétesés-erózió kezdetének jelei. A kapszulák egy óra alatt teljesen szétestek, így szabályozott hatóanyag-leadó rendszerként történő alkalmazásuk nem lehetséges, mivel túl hamar feloldódtak. Ezek alapján a hatóanyag-kioldódás vizsgálata elvesztette jelentőségét.

A pektinkapszula a folyadékba helyezés idejétől a vizsgálat végéig képes volt a gyomorfolyadék felszínén lebegni, és egy óra után sem esett szét, ezért folytattuk a mintavételezést egészen 150 percig. A kapszula a vizsgálat teljes időtartama alatt (150 perc) sem roncsolódott, csupán a hatóanyag egy része oldódott ki a pórusain keresztül, így a kapszula fokozatosan átlátszóvá vált (3. ábra).



3. ábra. A pektinkapszulában végbemenő változások a gyomorkísérlet alatt

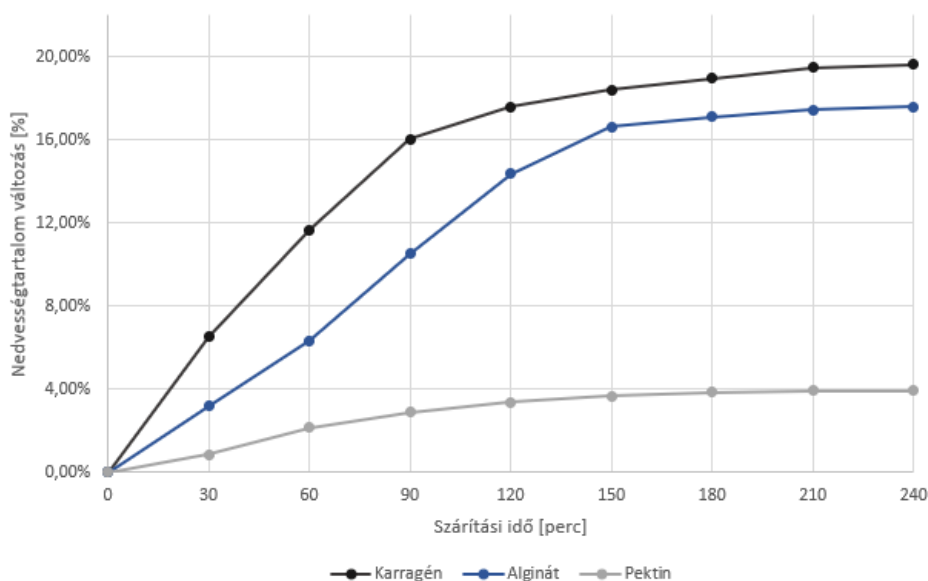
A hatóanyag kioldódási folyamatából leolvasható, hogy a kapszulából fokozatosan oldódott ki a hatóanyag. 150 perc alatt a hatóanyag 60%-át volt képes leadni. Habár a vizsgálat során nem vártuk meg a kapszula teljes szétesését, tapasztalat alapján elmondható, hogy kb. 4-5 óra elteltével fogja leadni a hatóanyag egészét. Ezek alapján elmondhatjuk, hogy a pektin habkapszula kiváló hordozóanyag a szabályozott hatóanyag-felszabadulású, lebegő gyógyszerformulaként történő alkalmazásra, mivel a hatóanyagot folyamatosan adja le, a folyadék felszínén lebeg, megfelelő keménységű, és hosszabb idő (5 óra) után esik szét.



5. ábra. A pektinkapszulában lévő hatóanyag kioldódása az idő elteltével százalékban kifejezve

3.3. A nedvességtartalom-csökkenés vizsgálata

A kapszulák megszilárdult állapotban vizet tartalmaznak, ez a sűrűségüket növeli, így habkapszulaként történő alkalmazásuk kérdéses, illetve a víztartalom hatással van a tárolásra és az eltarthatóságra is. Fennáll a veszélye annak is, hogy ha a kapszulának nagy a víztartalma, akkor a benne lévő folyadékot a csomagolásába fogja engedni, ezáltal a hatóanyag egy részét is. Ebből kifolyólag vizsgáltuk a nedvességcsökkentés folyamatát.



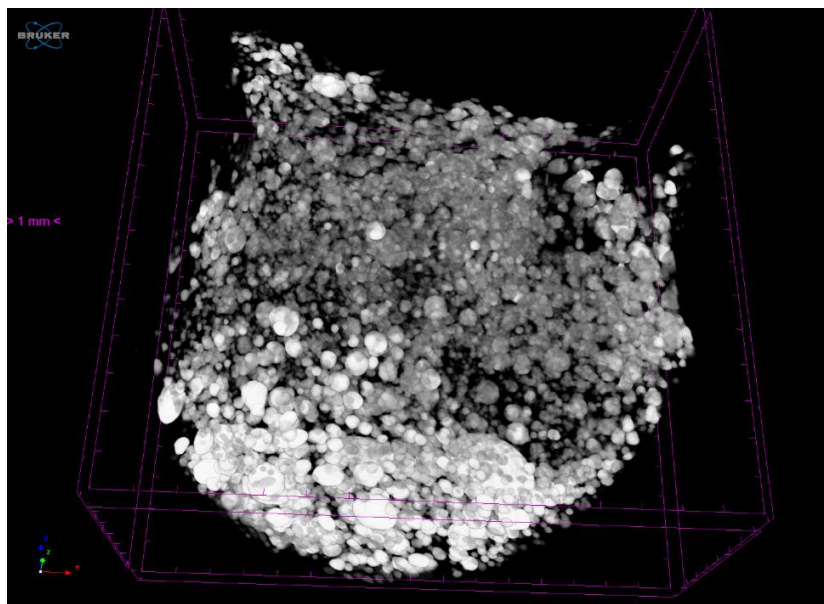
6. ábra. Az előállított anyagok nedvességtartalmának változása a szárítási kísérlet során

A karragén és az alginát görbéje nagy fokú hasonlóságot mutat. A függvényen látható, hogy számottevő vízmennyiség-vesztés 0 és 150 perc között következett be, ezután a függvény értékei állandósultak, 180 perc után már nincs szignifikáns változás.

3.4. Szerkezetvizsgálat

A habosítási folyamat lépése egy porózus szerkezetet hoz létre, ahol a szilárd mátrixot gömb- vagy gömbszerű buborékok töltik meg, a buborékok vagy üregek eloszlása véletlenszerű. A habszerkezet modellje zárt cellás szerkezetet

mutat, amelyben elkülönült alakos buborékok vannak jelen. Ezek alapján a mátrix egy összefüggő cellarendszert alkot. A rendszerre jellemző buborékok átlagos átmérője 0,072- 0,108 mm, amelyek az össz-buboréktérfogat 60%-át adják.



7. ábra. Pektinkapszulában csapdázott buborékokról készült mikroCT-felvétel

4. ÖSSZEGRZÉS

A kifejlesztteni kívánt cellás szerkezetű, növényi poliszacharid-mátrixú kapszula célja a gyógyászati felhasználás, ennek előállításával és alkalmazásával megpróbáljuk kiváltani az elterjedten használt szintetikus mátrixú hordozókat, amelyek egyes esetekben allergiás reakciót váltanak ki a pácienseknél.

A kifejlesztteni kívánt kompozittal csökkenthető a gyártás ökológiai lábnyoma. A betegségekben szenvedőkre kedvező hatása lehet a kompozitnak, mivel csökkenthetők a gyógyszerek hordozóanyagaitól kiváltott mellékhatások.

A habosítási módszert kidolgoztuk karragén, pektin és hatóanyagrendszerek habosítására. Ultrahangos homogenizáló alkalmazásával mikroheterogén gázdizperziót hoztunk létre folyadék állapotban, majd lehűlés után előállítottuk a szilárd, cellás szerkezetű, növényi eredetű poliszacharid kapszulákat, melyek lebegésre képesek.

Több vizsgálatot alkalmaztunk a kompozitrendszer tulajdonságainak jellemzésére. A kioldódási vizsgálatok igazolják, hogy a pektinmátrixú kapszula alkalmas a hatóanyag folyamatos leadására kisebb erózió mellett. A szárítási vizsgálat alapján a pektinmátrix víztartalom-csökkenése volt a legkisebb arányú. A mikroCT-vizsgálatok megerősítették, hogy a légbuborékok gömb alakú, zárt cellás szerkezetet alkotnak, ahol egymáshoz kapcsolódó üregek klaszterei találhatóak.

Köszönetnyilvánítás

„Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-5 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”, A „Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült”, azonosító szám: BO/00517/20/6. A szerzők köszönetet mondanak dr. Haimhoffer Ádámnak, a Debreceni Egyetem Gyógyszertechnológiai Tanszék munkatársának és dr. Béresova Monikának, a Debreceni Egyetem Orvosi Képző Intézet munkatársának a mikroCT-felvételek elkészítésében.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] D. Weaire, S. Hutzler, The Physics of Foams, Oxford, Oxford University Press, 2001, ISBN: 978-0198510970
- [2] Y. Bienvenu, "Application and future of solid foams," Comptes Rendus Physique, 2014, pp. 719-730, doi: 10.1016/j.crhy.2014.09.006 [3] F. Surname1 és F. Surname2, "Title of the paper," Journal name, %1. kötet1, %1. szám5, pp. 10-20, 2022.
- [3] Singh, A. Bhaduria, P. Kumar, H. Bera, S. Saha, "2 - Bioactive and drug-delivery potentials of polysaccharides and their derivatives," In: Maiti S, Jana S, Polysaccharide carriers for drug delivery, 2019, pp: 19-48, doi: 10.1016/B978-0-08-102553-6.00002-7. doi: 10.1016/j.nano.2015.02.018.

- [4] G. Kaur, M. Arora, R. Kumar, "Oral drug delivery technologies-A decade of developments," *J Pharmacol Exp Ther.*, 2019, pp: 529–543, doi: 10.1124/jpet.118.255828.
- [5] M. Martinez, G. Amidon, "A mechanistic approach to understanding the factors affecting drug absorption: A review of fundamentals," *J Clin Pharmacol.*, 2002, pp. 620–643. doi: 10.1177/009700020420060058
- [6] K. Manoj, K. Deepak, "An overview on various approaches and recent patents on gastroretentive drug delivery systems," *Recent Patents on Drug Delivery & Formulation*, 2018, doi: 10.2174/1872211312666180308150218
- [7] J.F. Reinus, S. Douglas, *Gastrointestinal anatomy and physiology: The essentials*, 2014, ISBN: 9780470674840
- [8] B. Hodayun, X. Lin, H. Choi, "Challenges and recent progress in oral drug delivery systems for biopharmaceuticals," *Pharmaceutics*, 2019, doi: 10.3390/pharmaceutics11030129
- [9] "Pharmaceutical third party manufacturing for zeaxanthin astaxanthin L glutathione softgel capsule," <https://www.indiamart.com/proddetail/pharmaceutical-third-party-manufacturing-for-zeaxanthin-astaxanthin-l-glutathione-softgel-capsule-14349076373.html> (Letöltés időpontja: 2022. 06. 01. 11:30)
- [10] R. Awasthi, G. Kulkarni, "Decades of research in drug targeting to the upper gastrointestinal tract using gastroretention technologies: Where do we stand?," *Drug Deliv.*, 2016, pp. 378–394, doi: 10.3109/10717544.2014.936535
- [11] "Hard capsules everything you need to know | gelita", <https://www.gelita.com/en/Hard-Capsules> (Letöltés időpontja: 2022. 06. 01. 13:23)
- [12] P. Sellaturay, S. Nasser, P. Ewan, "Polyethylene Glycol–Induced systemic allergic reactions (anaphylaxis)," *The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice*, 2021, pp: 670–675, doi: 10.1016/j.jaip.2020.09.029
- [13] H. Yadav, C. Karthikeyan, "1 – Natural polysaccharides: Structural features and properties," *Polysaccharide Carriers for Drug Delivery*, 2019, pp: 1–17, doi: 10.1016/B978-0-08-102553-6.00001-5.
- [14] S. Kumbar, C. Laurencin, M. Deng, "Natural and synthetic biomedical polymers," *Newnes*, 2014, ISBN: 9780123969835
- [15] Z. Shariatnia, "Chapter 2 - pharmaceutical applications of natural polysaccharides," *Natural Polysaccharides in Drug Delivery and Biomedical Applications*, 2019, pp: 15–57, doi: 10.1016/B978-0-12-817055-7.00002-9
- [16] A. Guedes, H. Amaro, I. Sousa-Pinto, F. Malcata, "Chapter 16 – algal spent biomass–A pool of applications," In: Pandey A, Chang J, Soccol CR, Lee D, Chisti Y, eds. *Biofuels from algae (second edition)*, 2019, pp: 397–433, doi: 10.1016/B978-0-444-64192-2.00016-0
- [17] Haimhoffer, Á.; Fenyvesi, F.; Lekli, I.; Béresová, M.; Bak, I.; Czágány, M.; Vasvári, G.; Bácskay, I.; Tóth, J.; Budai, I. Preparation of Acyclovir-Containing Solid Foam by Ultrasonic Batch Technology. *Pharmaceutics* 2021, 13, 1571. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13101571>
- [18] Yin LF, Qin C, Chen KS, Zhu CL, Cao H, Zhou JP, et al. Gastro-floating tablets of cephalexin: preparation and in vitro/in vivo evaluation. *Int J Pharm.* 2013;452(1–2):241–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2013.05.011>

KÖRNYEZETTUDOMÁNYI SZEKCIÓ I.

Multiple steel capillary model: A new method of pressure drop modelling in porous rocks

Roland Dócs¹, Mátyás Krisztián Baracza²

¹ University of Miskolc-Institute of Petroleum and Natural Gas, 3515. Miskolc-Egyetemváros, afkdocs@uni-miskolc.hu

² University of Miskolc-Research Institute of Applied Earth Sciences, 3515. Miskolc-Egyetemváros, gfkrix@uni-miskolc.hu

Abstract: Production capacity of any hydrocarbon reservoir is the most important question that needs to be answered. This depends on both the obtainable drawdown between the well and reservoir and the petrophysical properties (pore size distribution, wettability properties, saturations etc.) of the porous rock material. Permeability, introduced by Darcy is the parameter describing restrictions present during fluid flow in porous media. Although this method is the one currently accepted and implemented in the industry it has a major flaw because it considers flow in the geometric (total) rather than the effective volume, where it truly develops. During this study a new approach of flow restriction modelling was found where flow restrictions measured from sandstone plug samples were compared with the theoretic flow volumes which are equal to the total pore volumes composed of steel capillaries of equal diameter.

Keywords: Darcy, pore system, petrophysics, theoretical model

1 INTRODUCTION

During fluid flow in porous media, the equation of single-phase filtration determined by Darcy, describes the effects present during the transport of fluids. This solution was the first that described this complex problem, to do so some simplifications were made by Darcy. As a result, only forces of compression (F_p), gravity (F_g) and friction (F_μ), were taken into consideration. Other forces such as capillary and inertia were disregarded for its equation.

In addition of neglecting the forces mentioned above, some important statements must be made [1] before the differential form of Darcy's equation could be used.

1. A certain volumetric element with known dimensions is considered, in space with fix boundaries (cylindrical volume), in a way that random effects may be statically eliminated.
2. Streamlines develop parallel to the mantle of the cylindrical control volume.
3. Forces acting on the fluid volume inside the control volume are equal.
4. Considering Newton's Law of motion, a fluid body will accelerate until the resultant acceleration is zero but will keep its velocity (u).
5. We seek a value for u with which the resultant acceleration equals the null vector.
6. The cylindrical control volume was chosen in order of achieving simplicity without losing generality, also this volume matches the geometry of the measured samples.

Taking into consideration the above mentioned, the equation of single-phase filtration in a porous material covered by Darcy and Weisbach can be given in the following forms (Equation 1-3).

$$F_p + F_g + F_\mu = 0 \quad (1)$$

$$-\Phi\delta A\nabla p\delta l - \rho g\Phi\delta A i_3\delta l - B\mu\delta A u\delta l = 0 \quad (2)$$

$$-\left(\nabla p + \mu\frac{B}{\Phi}u + i_3\rho g\right)\Phi\delta A\delta l = 0 \quad (3)$$

Two parameters must be introduced in Equation 3 regarding the porous media, these are porosity (Φ) and the coefficient of the given system (B). As a result, $\Phi\delta A$ describes the effective cross-sectional area (A , stands for the geometric cross-sectional area of the sample), in which fluid flow can happen inside the total volume of the materials. The ratio of B and Φ can be given as another key petrophysical parameter known as permeability (k) which describes resistance met by the fluid (with a dynamic viscosity of μ and density of ρ) during its flow from one point to another in the porous network (with a distance of δl), at a constant differential pressure (∇p). These petrophysical parameters can only be determined by special laboratory measurements. With these parameters, a simpler form of Darcy's Law can be applied (Equation 4).

$$u = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + i_3 \rho g) \quad (4)$$

It can be clearly seen that the task of modelling flow in these complex systems is a truly difficult one. Also, it has to be taken into consideration that the above mentioned petrophysical parameters are the function of many individual properties, such as geology, sedimentation, compaction, fluid-rock behaviors (wettability and interfacial tension values).

Even to start the development of any model which would be able to present such effects, data is required. This data can be obtained from petrophysical measurements such as He porosimetry and permeability measurement (using gas and water). All of which can be performed in the Research Institute of Applied Earth Sciences, University of Miskolc.

2 FOUNDATION OF THE MODEL

By definition, models present a part of a system in a simpler form, determined by a group of hypotheses described by the operator. Its duty is not to fully describe what happens in that particular system, but to get the same result by using the defined hypotheses [2]. If satisfactory result is reached, the model is capable of presenting the problem.

It could be clearly seen that from a petrophysical point of view these systems are more complex than a simpler model could handle. The main source of the problem derives from the fact that petrophysical parameters are interdependent of one and other.

For example, permeability does not depend on the value of porosity directly. It is affected by the pore size distribution. Since there is an equality between the two systems of porosity, the one composed of a smaller number of large pores will have higher permeability than that composed of a higher number but smaller pores. These principles can be made irrelevant if only the effect of porosity is taken into consideration. Not to mention capillary forces, which alter as a function of wettability properties, present between the rock and fluids at imbibition and drainage phases of displacement as well as the average pore diameter.

Knowing the above effects the following question was asked: is there another form of approach that could be implemented to develop the model? A possible solution was found where a flow volume equal in size to the pore volume would be considered. In this case, flow restrictions would meet those present in the pore volume of the samples, measured during permeability measurements. In this solution the effective flow volume of the system would be constructed based on a given number of capillaries, equal in diameter.

Calculating pressure drops in smooth pipes is a rather simple procedure (Equation 5), in which most of the required parameters are already at hand (pipe geometry e.g. diameter (d , m), fluid properties at given pressures and temperatures). And only the velocity of flow (v , m/s) and the frictional factor (f) must be determined as the general energy equation describes.

$$\frac{dp}{dl} = \frac{g}{g_c} \rho \sin \alpha + \frac{\rho v dv}{g_c dl} + f \frac{\rho v^2}{2g_c d} \quad (5)$$

In this equation g_c is a conversion factor of 32.2 (required for non Field Unit case), and dl is the distance of the flow with an inclination of α . Since liquids could be treated almost incompressible, the velocity of flow can be taken constant regarding a pipe of constant diameter. Therefore, the effect of potential and kinetic energy changes can be neglected, and Equation 6 can be written up (using Field Units).

$$\Delta p = \frac{1}{144} \rho l \sin \alpha + 1.294 \times 10^{-3} f \frac{1}{d} \delta v^2 \quad (6)$$

If the direction of flow is horizontal, at an inclination angle of zero $\sin \alpha$ equals zero, resulting in pressure drop caused only by frictional losses (Equation 14).

3 DATA GATHERING

In order to describe the effective pore volume in which flow can develop, porosity, the ratio of pore volume (V_p , cm^3) to total bulk volume (V_b , samples geometric volume, cm^3) has to be determined (Equation 7). Pore volume can be measured either with direct or indirect methods based on the measurement procedure.

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} = \frac{V_b - V_s}{V_b} \quad (7)$$

One of the most commonly used indirect method is Helium pycnometry, which implements Boyle's law of ideal gases. The law states that, at constant temperature, if the pressure of a certain quantity of gas is known at a given volume, pressure can be calculated for the same quantity occupying another volume. In short, after expansion the volume of gas filling the pores can be calculated. Of all non-reactive gases, Helium has the finest particles which benefits solid volume (V_s , cm^3) determination of samples due to the fact that it can fill the finest of pores.

The apparatus consists of two chambers (sample and reference) with known volumes, where pressures reached by existing Helium quantity are measured at isothermal conditions (T_a , $^{\circ}C$). If both chambers are empty, the previously adjusted pressure (p_1 , reference pressure, bar) at reference volume (V_R , cm^3) after expansion between both reference and sample chambers will drop to a certain (p_2 , bar) pressure (Equation 7).

$$V_s = V_c - V_R \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right) - 1 \right] \quad (8)$$

The volume where gas expansion happens is decreased by the solid volume of the sample inside the chamber, which will result in a higher p_2 pressure (for equal p_1) than in the case of an empty chamber. In the process reference and expansion pressures are recorded three times resulting in three calculated solid volumes for each sample. Finally, the standard deviation of solid density (calculated from dry weight and the determined volumes) is determined. If this value exceeds 0.003 g/cm^3 the measurement is repeated until satisfactory results. At lower standard deviation values, the average of calculated volume determines the solid volume of the sample with sufficient accuracy. In possession of both total and solid volumes of the given sample, porosity can be determined using Equation 7.

To be able to determine flow restrictions of water inside the pore volume, a standard absolute permeability measurement is applied. In the course of this measurement pressure difference between the two sides of the cylindrical sample with a cross sectional area of A and length of l in horizontal position is measured at a given q flowrate. It has to be noted, however, that both Darcy's law and pressure calculation for smooth pipes require laminar flow to be present.

By applying constant q (cm^3/s) flowrate and monitoring the pressure difference between the inlet (p_1 , atm) and outlet sides (p_2 , atmospheric pressure, atm), the time required for a given volume of fluid to pass through the sample of known cross section (cm^2) and length (cm) is measured. Thus, both the flowrate and permeability can be calculated at the outflow in knowledge of the dynamic viscosity (μ , cP) of the fluid.

Constant flow rate is applied by a cylindrical pump, while the expelled volume is recorded by a digital balance. The time is also recorded by the computer thus the flowrate at the end of the sample can be calculated. Because of constant flow rate throughout the entire measurement, time periods for equal amount of fluid volume accumulation should be constant as well. As a result, permeability (in D) of the sample regarding that fluid will be calculated as the average of each measured section (Equation 9).

$$k = \frac{q_w \mu_w l}{A \Delta p} \quad (9)$$

In the possession of the porosity of the samples and the value of pressure difference average recorded during steady state flow, all necessary data are at hand for the model to calculate that number (c_i) of capillaries with equal diameter (d_{ci}) where pressure drops present will be equal of those measured.

4 CALCULATION PROCESS OF THE MODEL

The pressure drop calculation in pipes presented by G. Takács [3] (Equations 11-14) was applied and modified during the capillary model. The calculations were made using Field Units (Equations 10-15) and re calculated for SI.

During the first step, assumption of the starting initial capillary number (c_i) is made, which will be altered through the iteration process in order to find the correct c and dc values.

Based on c_i the first value of d_{ci} (in) is calculated:

$$d_b^2 \pi \phi = c_i d_{ci}^2 \pi \quad (10)$$

After both sides are divided by π (as shown in Figure 1) the left side of the equation describes the true (effective) flow cross sectional area of the sample (where d_b is the geometric diameter of the cylindrical plug sample in inch), which must be equal to the theoretical flow cross sectional area of the model. In the following equations the effective cross section will be presented with the constant OP (cm^2), as shown in Figure 1.

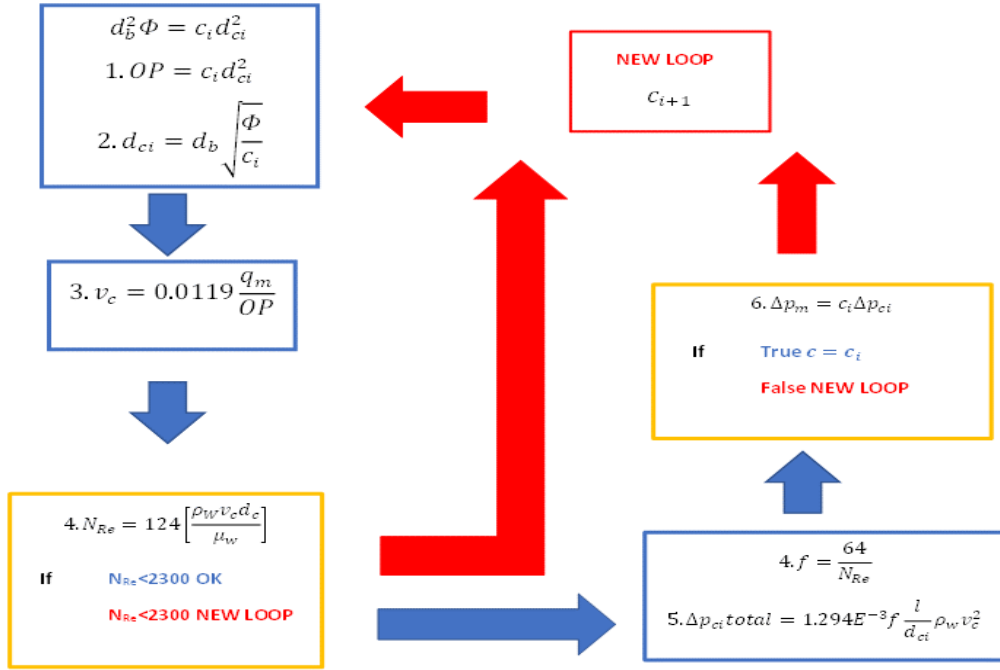


Figure 1 Schematic flow chart of the calculation process

In the equation of flow velocity, parameter B_w is the so-called Formation Volume Factor of water, which describes the ratio of water volume at standard and at given pressure and temperature conditions. This equals 1 in our case because of standard conditions and can be taken out of the calculation. The velocity in a single capillary (v_c , ft/s) can be calculated by Equation 11 (using the following units, STB/d for q_w , inch for d_{ci}^2 and bbl/STB for B_w).

$$v_c = 0.0119 \frac{\left(\frac{q_w}{c_i}\right)}{B_w d_{ci}^2} = 0.0119 \frac{q_w}{1 \times d_{ci}^2 c_i} = 0.0119 \frac{q_w}{OP} \quad (11)$$

In the process of finding the values of c and d_c an iteration condition must be met, where the region of flow has to be laminar ($N_{Re} < 2300$) according to Moody's diagram. Reynolds number is calculated using Equation 12 (cP for viscosity, and lb/ft^3 for density of water). If the calculated values met both the criteria of laminar flow and total pressure drop the iteration cycle is completed.

$$N_{Re} = 124 \frac{\rho_w v_c d_{ci}}{\mu_w} \quad (12)$$

Friction factor regarding laminar flow conditions can be easily calculated based on Equation 13. After which, pressure drop (Δp_c , psi) in a single capillary can be determined using Equation 14, where length and diameter of the capillaries are in ft and in, density of water is in lb/ft^3 and the velocity of flow is ft/s. Assuming the uniform fluid flow distribution in all capillaries the pressure difference in a single capillary multiplied by the number of the capillaries, equals the pressure drop generated throughout the entire system (Δp_{c_total} , psi). This calculated pressure difference should match the one measured during the stable region of the permeability test.

$$f = \frac{64}{N_{Re}} \quad (13)$$

$$\Delta p_c = 1.294E^{-3} f \frac{l}{d_{ci}} \rho_w v_c^2 \quad (14)$$

$$\Delta p_{c_total} = \Delta p_c c_i \quad (15)$$

5 RESULTS

At start, a total of three samples from a given sandstone reservoir were chosen for testing the limitations of the model. To do so the chosen samples had permeabilities belonging to highly different regions.

The similar origin of the samples was an important factor. By choosing samples from the same reservoir the effects of the geological and petrophysical factors could not influence the measurements significantly.

Based on the results regarding both porosity and differential pressure average at steady state flow ($(\Delta p_{steady})_{avg}$) at a given flow rate (q_{steady}), the calculation of capillary numbers and diameters could be started. The measured differential pressure values and corresponding permeability values (k_w) for the studied samples are presented in Figures 2-4.

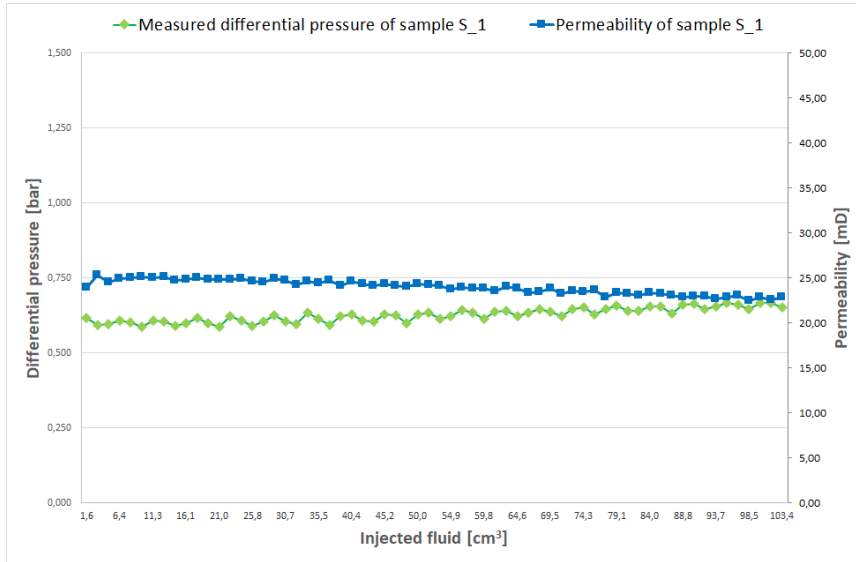


Figure 2 The measured differential pressure and permeability of sample S-1

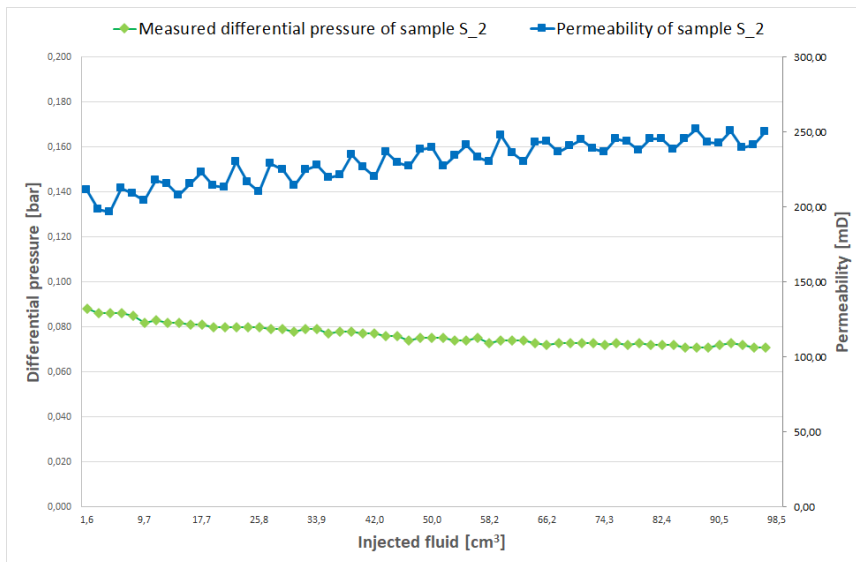


Figure 3 The measured differential pressure and permeability of sample S-2

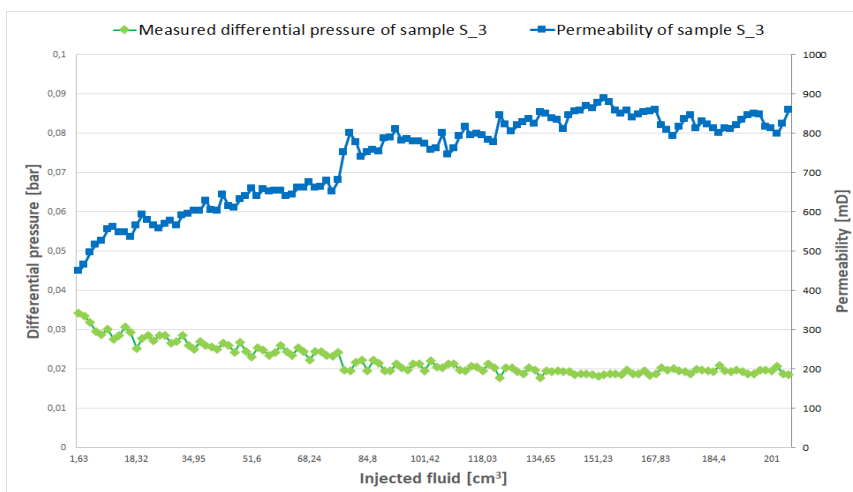


Figure 4 The measured differential pressure and permeability of sample S-3

In all cases the model could simulate the pressure differences measured during the permeability tests with satisfactory conditions, despite the high differences in sample permeability. The geometric data and petrophysical parameters of the tested samples are included in Table 1, alongside the results generated by the model.

Table 1. Parameters and results regarding the observed samples

ID	Φ , [%]	d_m , [in]	l , [ft]	k_w , [mD]	q_{steady} , [stb/d]	$(\Delta p_{steady})_{avg.}$, [psi]	Δp_{c_total} , [psi]	N_{Re}	c	d_c , [in]
S_1	17.62	1.4905512	0.2026	22.87	0.01455	9.559292	9.558999	25.29	7907	0.06937
S_2	31.65	1.4862204	0.2286	229.88	0.01500	1.042821	1.042820	26.39	4325	0.12459
S_3	27.72	1.4921259	0.2016	830.34	0.01493	0.281422	0.281421	39.97	2117	0.10913

6 CONCLUSION

Throughout the work the validation of the new capillary model for pressure drop calculation in porous material was made using laboratory measurements performed on selected cylindrical plug samples. In all three investigated cases, the capillary model made satisfactory results. Even though the permeability of the chosen samples belonged to highly different ranges, the divergence between calculated and measured pressure differences regarding all three sandstone samples was infinitesimal: proving the capability of the model.

Results proved that the model could present the effects of incompressible single-phase fluid flow in a porous media with a given porosity, using multiple capillaries with equal cross-sectional area. Using an approach other than petrophysical, all necessary elements of a working model during the defined conditions were achieved.

Acknowledgement The research was carried out in the framework of the GINOP-2.3.2-15-2016-00010 "Development of enhanced engineering methods with the aim at utilization of subterranean energy resources" project in the framework of the Széchenyi 2020 Plan, funded by the European Union, co-financed by the European Structural and Investment Funds.

- [1] Z. E. Heinemann, Fluid Flow in Porous Media, DI Barbara Schatz, Leoben: Montanuniversitat Leoben, 2005.
- [2] R. Dócs, A. Jobbik, „Additional problem overview of fluid flow in porous media”, 2016.
- [3] G. Takács, Production Engineering Fundamentals Vol. 1, Miskolc: Petroleum Engineering Department University of Miskolc, 2022.

Északkelet-magyarországi esettanulmány az aktuális fosszilis energiahasználati módok geotermikus energiával történő kiváltásáról

A case study on the replacement of current fossil energy uses with geothermal energy in North-East Hungary

Kárpi Marcell^{1*} – Szilágyiné Sebők Szilvia² – Zákányiné Mészáros Renáta³

^{1,2,3} Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros, *afkkarpm@uni-miskolc.hu

Összefoglaló: Hazánk geotermikus adottságai mind európai, mind nemzetközi viszonylatban kiemelkedőek, köszönhetően a kedvező geotermikus gradiens viszonyoknak és a vastag üledékrétegeknek, melyek több területen is megfelelő körülményeket teremtenek nemcsak a nagy, de a kis és közepes entalpiájú kutak, geotermikus rendszerek létesítéséhez is. A tanulmányban három északkelet-magyarországi település került kiválasztásra a már meglévő kúthálózat kútjai, az infrastruktúra közelsége, valamint a kútból kinyerhető hőmérséklet- és hozam adatok alapján. A kutatás során az egyes klímaparaméterek múltbeli és jövőbeli prognózisát összehasonlítási alapként véve modellünkben becslést adunk a jelenlegi, fosszilis energiahasználati módok geotermikus energiával történő kiváltását feltételezve a CO₂-kibocsátás adott területen előrelátható változásáról. Vizsgálatainkkal alátámasztottuk a kis entalpiájú meddő kutak újraindításának és geotermikus hasznosításának alkalmasságát.

Kulcsszavak: geotermikus, klímaváltozás, CO₂-kibocsátás, energia, fosszilis, megújuló

Abstract: The geothermal potential of Hungary is outstanding both in Europe and internationally, thanks to the favourable geothermal gradient conditions and the thick sediment layers, which create suitable conditions for the establishment of not only large, but also small and medium enthalpy wells and geothermal systems in several areas. In this study, three municipalities in northeastern Hungary were selected on the basis of the wells in the existing well network, the proximity of the infrastructure, and the temperature and yield data of the wells. Using past and future projections of each climate parameter as a basis for comparison, our model estimates the predictable change in CO₂ emissions in the area, assuming the substitution of geothermal energy for current fossil energy use. Our studies have demonstrated the suitability of reopening low enthalpy barren wells and geothermal exploitation.

Keywords: geothermal, climate change, CO₂ emissions, energy, fossil, renewable

1. BEVEZETÉS

Az átlagos földi hőáram Magyarországon 90-100 mW/m², ami meghaladja a kontinentális átlagot annak ellenére, hogy az ország nem aktív vulkáni területen található. Míg a geotermikus gradiens földi értéke 30-33 °C/km, Magyarországon átlagosan 42-45 °C/km. Elmondható, hogy Magyarország geotermikus adottságai európai és világviszonylatban is kedvezőek. Így 500 m mélységben az átlaghőmérséklet már 35-40 °C, 1000 m-en 55-60 °C, 2000 m mélységben pedig 100-110 °C, a nagyobb geotermikus gradiensű területeken akár 120-130 °C lehet. A felszín alatt több km mélységig megtalálható törmelékes üledékekből (homok, homokkő) vagy repedezett mészkőből, dolomitből az ország területének több mint 70%-án minimum 30 °C-os termálvíz tárható fel. Magyarországon a geotermikus potenciál alulról közelítő becslések szerint is legalább ~60 PJ/év [1].

A geotermikus gradiens és a vastag üledékréteg több területen is megfelelő körülményeket teremt kis entalpiájú (30-100 °C) kutak létesítéséhez. Ezek közül is kiemelkedik a Dél-Alföld, ahol gyakorlatilag majdnem minden település esetében lehetne alkalmazni kis entalpiájú rendszereket, továbbá bizonyos helyeken még az áramfejlesztéshez is elegendő hő nyerhető ki a rétegekből. Összességében elmondható, hogy a hévizek energiatartalmának hasznosítása mezőgazdasági és épületfűtési célokra a legjelentősebb, ezek után következnek a sekély mélységű, víztermelés nélküli hőszivattyúk. A balneológiai célú felhasználás rendelkezik papíron a legnagyobb kitermelt energiamennyiséggel (352 MWt beépített kapacitás mellett), viszont a felhasználás jellegében különbözik a többitől, így külön említjük. Az épületek fűtése és a távfűtés összesen 188 MWt, az üvegházak fűtése 271 MWt és a termények szárítása 25 MWt beépített kapacitással.

A kutak többsége felső-pannóniai rétegekből termel többnyire felszálló módban, és csak kisebb százalékuk ütött meg mély karsztos tárolókat. Kútkataszteri kiadványok, valamint a Magyarország hévízkútjai VII. kiegészítése javításokkal alapján a hévízkutak száma az országban 1622. Ezen túlmenően potenciális hévízkútnak számít a Magyar Bányavagyon Hasznosító által minősített 170 darab szénhidrogén meddő kút is [2].

2. A MINTATERÜLET KIVÁLASZTÁSA ÉS A TELEPÜLÉSEK ENERGETIKAI SZEMPONTÚ ÉRTÉKELÉSE

Magyarországon a szénhidrogén-kutatásra és -termelésre mélyített kutak megközelítőleg 30%-a belterületi és 70%-a külterületi fekvésű. A további hasznosítás szempontjai miatt érdemesnek tartottuk azon kutakat vizsgálni, amelyeknek elhelyezkedése olyan létesítményekkel esik egybe, ahol lehetőség van a hőkapacitás lekötésére, illetve az igen magas beruházási költségek finanszírozására és a kapcsolódó pályázatok elnyerésére.

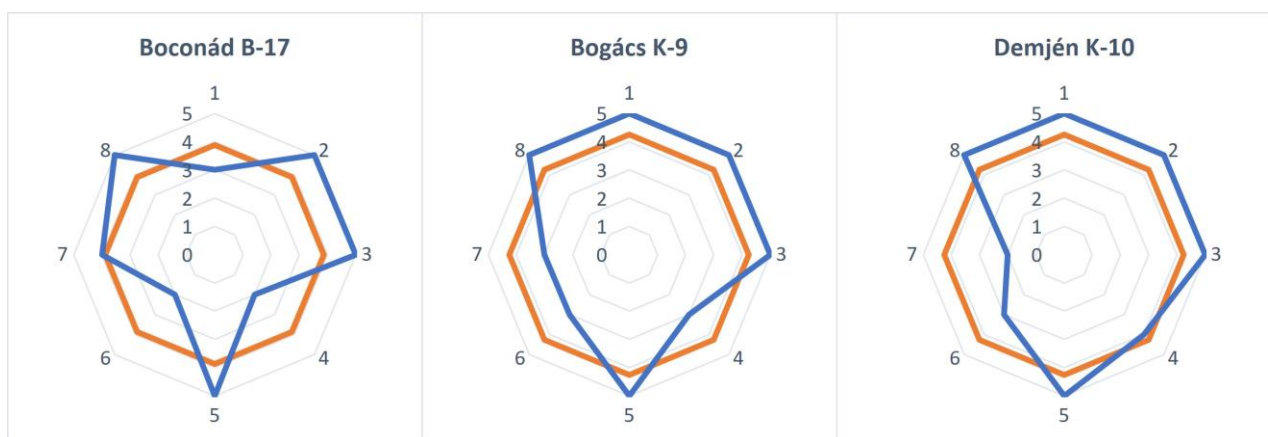
A három újranyitásra alkalmas kút kiválasztási szempontjait az 1. táblázat ismerteti. Átlagolva a kutak a maximum 5 pontból a következő pontokat érték el: Demjén K-10: 4,25; Bogács K-9: 4,25; Boconád B-17: 3,87. A minősítési módszer alapján mindhárom kút alkalmas az újranyitásra geotermikus hőhasznosítás céljából.

1. táblázat. A kutak részletes geotermikus energetikai minősítése során vizsgált paramétere

1.	Fúrás éve (skála: <1970 – 1; 1971–1980 – 2; 1981–1990 – 3; 1991–2000 – 4; 2001 < – 5)
2.	Kütfunkció (skála: műszakilag felszámolt, rekultivált – 1; műszakilag felszámolt – 2; cementdugóval biztonságba helyezett – 3; olajtermelésre kialakított – 4; víztermelő, vízvisszasajtoló, gáztermelő – 5)
3.	A fluidum mennyisége (m³/nap) [Mért-Becsült] (skála: 1-20 – 1; 21-40 – 2; 41-100 – 3; 101-500 – 4; 501 < – 5)
4.	A fluidum kifolyó hőmérséklete (°C) [Mért – Becsült] (skála: 4-20 – 1; 21-40 – 2; 41-60 – 3; 61-85 – 4; 86 < – 5)
5.	A fluidumból kinyerhető geotermikus energia (MJ/nap) (skála: 0-500 – 1; 501-1e – 2; 1e-5e – 3; 5e-10e – 4; 10e < – 5)
6.	A kút 1m-es környezetéből maximálisan kinyerhető fajlagos (átlagos) geotermikus energia (MJ) (skála: 0-100 – 1; 101-200 – 2; 201-400 – 3; 401-800 – 4; 801 < – 5)
7.	A szűrőzött szakasz összes hossza (m) (skála: 1-5 – 1; 6-10 – 2; 11-20 – 3; 21-40 – 4; 41 < – 5)
8.	Az infrastruktúra összesített távolsága (km) (skála: 0-5 – 5; 5-10 – 4; 10-20 – 3; 20-30 – 2; 30 < – 1)

Az első újranyitásra kiválasztott kút a Boconád településen található B-17-es kút. Minősítése átlagosan 3,87 pontot ért el a maximális 5-ből. A leggyengébb értékelést a fúrás éve, a fluidum kifolyó hőmérséklete, és a kút 1 m-es környezetéből kinyerhető fajlagos energia kapta.

A B-17-es kút funkciója víztermelő kút, napi hozama minimum 1152, maximum 2678 köbméter. A naponta kinyerhető geotermikus energia majd 190 000 MJ. A szűrőzött szakasz összes hossza 29 méter, illetve nagyon közel, 1,33 km-re található az infrastruktúra, így a szállítás nem jelent gondot, a megtérülési számításokban a szállítóvezeték hossza nem lesz jelentős tényező. A boconádi B-17-es jelű kút esetében láthatóan gyengébben teljesítő kútról van szó (1. ábra).



1. ábra. A kutak geotermikus energetikai minősítésének grafikus megjelenítése

A Bogács K-9 kút a második kiválasztott, újranyitásra alkalmas kút, elért minősítési pontszáma 4,25. Három pont alatti értékelést egyik paramétere sem kapott, a leggyengébb pontszámot a fluidum kifolyó hőmérséklete, a kút 1 m-es környezetéből maximálisan kinyerhető fajlagos energia, és a szűrőzött szakasz összes hossza kapta. Ez a második legnagyobb hozamú kút a kiválasztottak közül. A kút talpmélysége 786,4 m. Az infrastruktúra összesített távolsága 1 km, ez a legkedvezőbb az összes kút helyzete közül. A hőmérséklete a második legkedvezőbb a kiválasztott kutak közül,

viszont a legnagyobb települést kell ellátnia. A naponta kinyerhető 246 505 MJ energia a település fűtési energiaigényét bőven képes azt ellátni.

A harmadik kiválasztott kút a Demjén K-10, amely a legmagasabb kifolyó hőmérséklettel rendelkezik, a település nagysága pedig a második, összesen 331 db lakás. A kút által elért pontszámok csakúgy, mint a Bogácsi esetében 4,25. Kiemelkedő paraméterei a fűrés éve (ez a legfiatalabb kút a három közül), a víz hőmérséklete és a kitermelhető hőenergia. Három pontot vagy az alatti értéket csak a kút környezetéből kitermelhető energia és a szűrőzött szakasz hossza kapott. Bár ez a legmagasabb hőmérsékletű kút, az újrainyítás gazdaságosságánál felmerülő kérdés lehet az infrastruktúra távolsága, amely ezen kút esetében a legnagyobb, majdnem 5 km.

Miután a kutak újrainyithatóságáról az előzetes vizsgálatok során meggyőződünk, áttértünk az energetikai elemzésre. Ez azért fontos, mert az üzembe helyezett új kutakról tudnunk kell, képesek lesznek-e ellátni az adott települést fűtési energiával, illetve a tiszta technológia bevezetése hány tonna szén-dioxid-kibocsátástól menti fel a területet.

A Központi Statisztikai Hivatal [3] adatbázisának adatai alapján Demjénben a felhasználás főként lakossági, kommunális és mezőgazdasági célú, kisebb részt ipari. Az áramfogyasztással kapcsolatos szén-dioxid-kibocsátás Demjén településen összesen évi 605 tonna, amely majdnem eléri a földgázfogyasztás lábnyomának nagyságát, mely éves szinten 808 tonna. A földgázfogyasztás is főként lakossági, illetve nagyobb részét ipari, a mezőgazdaság itt nem lényeges szereplő, elenyésző mértékben kommunális fogyasztás is van. A hagyományos tüzelőanyagok közül a szén és a tűzifa hatása a legkisebb, de nem elhanyagolható, éves szinten 101 tonna szén-dioxidot jelent. Az önkormányzat nem használ Demjénben ilyen tüzelőt, csak a lakosság, melynek éves tűzifafogyasztása 2371 MWh, éves szénfogyasztása 215,45 MWh energiát termel, ami összesen 331 db lakásra van vonatkoztatva.

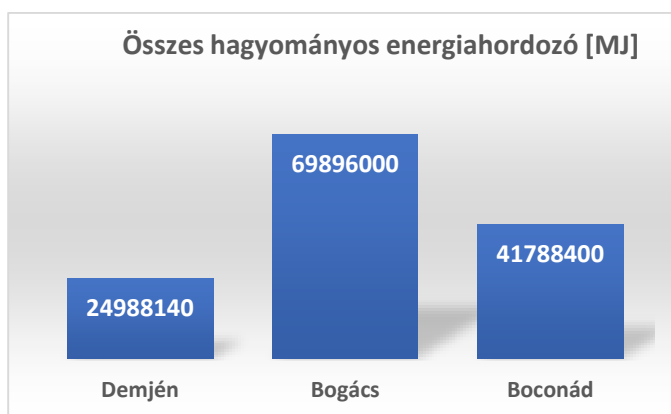
Bogács a vizsgált települések közül a legnagyobb, így áramfogyasztása is többszöröse a demjéninek. A 2019. évi összes fogyasztás majdnem 4700 MWh, amely főként lakossági és ipari, valamint kommunális, kevésbé mezőgazdasági. Az áramfogyasztás kapcsán kibocsájtott szén-dioxid éves szinten 1675 tonna. A település szén-dioxid-mérlegét vizsgálva megállapítható, hogy a földgázfogyasztás kibocsájtása itt jóval meghaladja az áramfogyasztás kibocsájtását. A településen túlnyomórészt a háztartási és az egyéb kategóriába eső földgázfogyasztás dominál. Az összes kibocsájtás 2161 tonna éves szinten.

Az önkormányzati és lakossági tűzifa- és szénfogyasztást elemezve megállapítottuk, hogy a bogácsi önkormányzat nem használ ilyen tüzelőanyagot. Összesen 968 db lakás található a településen, amelyből a tűzifa-felhasználás 1569 tonna vagy 8034 MWh évente. A szénfelhasználás 98 tonna vagy 681 MWh évente. Az ezekből származó szén-dioxid-kibocsátás 322 tonna évente, amely sokkal kisebb mint az áramból és a földgázfelhasználásból származó kibocsátás.

Áttérve Boconád adataira, az áramfogyasztás okozta szén-dioxid-terhelés szinte megegyezik a földgázéval, valamennyivel kisebb, 1136 tonna. Az összes áramfelhasználás 3155 MWh, amelyből a lakossági a domináns, egyéb célokra 931 MWh használódik fel, az ipar a harmadik, 260 MWh-val. Boconád földgázfogyasztását vizsgálva megállapítható, hogy jelentősen alacsonyabbak az értékek, mivel kisebb a település is, nagyipari tevékenység nincs. A 2019. évi közvetlen háztartási fogyasztás 597 MWh volt, ipari és mezőgazdasági nincs. Az ehhez kapcsolódó szén-dioxid-kibocsátás 1205 tonna évente.

A Boconád településen található 639 db lakás tűzifafogyasztása 1009 tonna, szénfogyasztása 68 tonna évente. Energiában kifejezve a tűzifa 5166 MWh, a szén 473 MWh. Az ehhez kapcsolódó szén-dioxid-kibocsátás 221 tonna évente, amely a többi településhez viszonyítva korrelál a település méretével, a második legnagyobb. Az önkormányzat itt sem használ ilyen tüzelőket.

A 2. ábra az összesített hagyományos energiahordozó-használatot szemlélteti, melyből kitűnik, hogy Bogács település a többi településhez viszonyított mérete miatt is kimagaslik a hagyományos energiahordozó használatban. Itt található a második legmagasabb hőmérsékletű kút. A települések közül Demjén és Boconád hasonló nagyságú lakossággal bír, ami meglátszik a hagyományos energiahordozó használatában is.



2. ábra. A három település összesített hagyományos energiahordozó-fogyasztása éves szinten

3. A TELEPÜLÉSEK ENERGIAIGÉNYÉNEK FEDEZÉSE GEOTERMIKUS KUTAK SEGÍTSÉGÉVEL

A becslés során figyelembe vettük az önkormányzati és lakossági tüzipfa-, szén- és földgázfogyasztással kapcsolatos szén-dioxid-kibocsátás adatait, mértéküket. A 2. táblázatban látható, hogy a legkedvezőbb hőmérsékletű kút a demjéni, innen termelhető ki a legtöbb hő, a számolt kapacitás alapján kevesebb mint fél év alatt kitermeli a település fűtési igényét. Azonban ez egy fiktív szám, mivel a hő előre nem tárolható el, így valójában ez a szám azt jelenti, hogy egy időben kétszer ekkora települést tudna ellátni a kút. A második legmelegebb a bogácsi, azonban az éves fűtési energiaigény kitermeléséhez szükséges napok száma a legtöbb a három eset közül. Összességében megállapíthatjuk, hogy mindhárom kút képes jóval egy éven belül kitermelni az éves fűtési energiaigényének megfelelő hőmennyiséget. Az, hogy ez a feltétel teljesül elméleti szinten, óvatosan kezelendő, mivel a gyakorlatban a fűtési energetikai igény az év során nem állandó, illetve magasabb hőmérsékletekre is lehet szükség, mint amely állandóan biztosított. A magasabb hőmérsékleti igény 10 °C plusz felfűtéssel biztosítható, amely környezetbarátabb megoldás, mint kizárólag hagyományos tüzelőkkel elérni 60 °C hőmérsékletet.

Ugyan a szénhasználat egyik településen sem jelentős, mégis a tiszta technológiára való átállás miatt ezt is fontos tárgyalni. A legnagyobb változást a szén esetében is a bogácsi átállás hozná, a használat felét ezen település fogyasztása teszi ki.

2. táblázat. A települések energiaigényének függvényében számolt geotermikusenergia-ellátottság

	kút- hőmérséklet [°C]	gáz- energia [MJ]	fa- energia [MJ]	szénenergia [MJ]	Összes hagyományos [MJ]	Éves energiaigényt fedező termelési napok száma
Demjén	66,7	14 382 000	9 830 520	775 620	24 988 140	157
Bogács	54,5	38 522 000	28 922 400	2 451 600	69 896 000	284
Boconád	39,6	21 488 000	18 597 600	1 702 800	41 788 400	222

A 3. táblázatban a kutak kihasználtsága látható, a demjéni kevesebb mint fele kapacitással működne az újraindítás esetén. Ez elméletben azt jelentené, hogy a területen még bőven létesíthetőek akár ipari épületek vagy bármilyen célú intézmények, a kút bírná fogja az igényeket, természetesen a magasabb hőmérsékleti igény esetén felfűtéssel korrigálva. A legnagyobb kihasználtsággal a bogácsi működne, de ez is csak háromnegyed kapacitást jelent. Az éves fűtési energiaigény magasan Bogácson a legnagyobb, mivel ez a legnagyobb település, Demjén pedig a legkisebb. Ennél fogva Demjénben a legkisebb a kihasználtság, ahogy az a 4. táblázatban is látható.

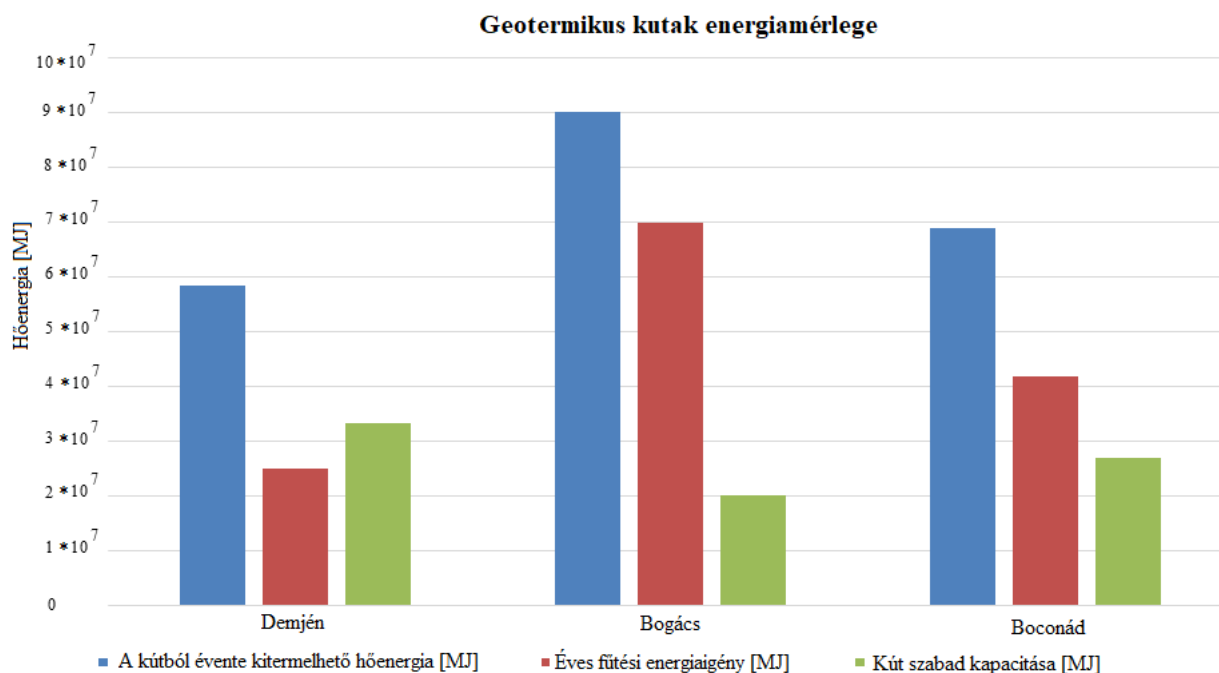
3. táblázat.: Kihasználtság a kapacitás és a települési energiaigény függvényében

	AZ éves energiaigényt fedező termelési napok száma	A kút kihasználtsága (%)
Demjén	157	43,01
Bogács	284	77,81
Boconád	222	60,82

4. táblázat. A kutak éves energiamérlege

	Éves fűtési energiaigény [MJ]	Éves kútból kivehető energia [MJ]	Kút szabad kapacitása [MJ]
Demjén	24 988 140	58 242 685	33 254 545
Bogács	69 896 000	89 974 325	20 078 325
Boconád	41 788 400	68 808 705	27 020 305

A pufferenergia és a fűtési energiaigény kerül szemléltetésre a 3. ábrán. A kút szabad kapacitása számolt érték, az éves fűtési energiaigényt az adatgyűjtés során kapott hagyományos energiahordozó használatból kaptuk.



3. ábra. A kutak termelőképessége és a számolt szabad kapacitás

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmányban a vizsgált északkelet-magyarországi területen a három kiválasztott település fűtési igényeit megvizsgálva megállapítottuk, hogy a hagyományos tüzelőanyagok felhasználása alapján számított fűtési energiaigény a már meglévő és felhagyott három geotermikus kút újraindításával teljes egészében lefedhető lenne. Mi több, jelentős pufferkapacitás mellett működne a rendszer, így a településeken a jövőben esetleg létesülő épületek fűtési energiaszükségletét is biztosíthatná.

A feltételezett CO₂-megtakarítás tekintetében a rendszer bevezetése és alkalmazása a fűtési eredetű CO₂-mennyiség csökkentésére kifejezetten alkalmas. Azonban meg kell jegyeznünk, hogy a vizsgált területen a közlekedés által termelt CO₂-mennyiséggel összevetve a megtakarított mennyiség elenyésző, így a klímamodellek által prognosztizált előrejelzésekre jelentős hatást feltehetően a rendszer nem gyakorol. Mindezen túl kiemelendő, hogy energiagazdálkodási szempontból egy ilyen vagy hasonló típusú geotermikus rendszer bevezetése és alkalmazása mindenképp célravezető lehet.

Az ilyen, olajipar számára érdektelen, meddő, de hasznosítható hőmennyiséggel rendelkező kutak újraindítása nemcsak környezettudatos megoldást jelentene, hanem a körforgásos gazdasági modell elveinek is megfelel.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének részeként – a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával valósul meg.

Acknowledgements

The research was carried out in the framework of the GINOP-2.3.2-15-2016- 00010 “Development of enhanced engineering methods with the aim at utilization of subterranean energy resources” project of the Research Institute of Applied Earth Sciences of the University of Miskolc in the framework of the Széchenyi 2020 Plan, funded by the European Union, co-financed by the European Structural and Investment Funds.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Szita, G. – Kovács, Á.: Geotermikus energia Izlandon 2015. [Online]
<http://mgte.hu/geotermalis.php?cikkek=1566>
- [2] Tóth, A.; Magyarország Geotermális Atlasza, Budapest : Magyar Energetikai És Közmű-Szabályozási Hivatal, pp. 8–38., 2016.
- [3] Központi Statisztikai Hivatal Online adatbázisa <https://statinfo.ksh.hu/Statinfo/>

A Bayes-háló alkalmazhatósága a felhagyott kutak újrainyitásából származó geotermikus hőhasználat klímaváltozásra kifejtett hatásának vizsgálatára

The applicability of Bayesian networks to investigate the climate change impact of geothermal heat from the reopening of abandoned wells

Kárpi Marcell* – Szilágyiné Sebők Szilvia² – Zákányiné Mészáros Renáta³

^{1,2,3} Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros, *afkcarpm@uni-miskolc.hu

Összefoglaló: Kutatások előrejelzése alapján 2050-re a geotermikus alapú elektromosáram-termeléssel az emberiség energiaszükségletének egyre nagyobb hányadát fogják fedezni, mellyel csökkenthető a szén-dioxid-kibocsátás, és fedezhető a fűtési célokat szolgáló hőmennyiség egy része is. A tanulmányban a geotermia mint energiaforrás alkalmazásának lehetőségét modelleztük egy létező mintaterületen és létező, meddőnek minősített kúthálózaton keresztül. Számszerűsítettük a mintaterület geotermiára történő feltételezett lakossági, ipari és mezőgazdasági átállásának szén-dioxid-kibocsátásra gyakorolt hatását. A geotermikus beruházási folyamat döntéshozó szakaszának támogatásához Bayes-hálóval modelleztük a sikeres projekt feltételeit, és az átállás mértékének függvényében a megtakarított CO₂-kibocsátást. Ez a módszer döntéstámogató eszközként szolgálhat a hasonló környezeti problémák megoldásában.

Kulcsszavak: Bayes-háló, geotermikus, klímaváltozás, CO₂-kibocsátás

Abstract: Researches predict that by 2050, geothermal electricity generation will meet an increasing share of humanity's energy needs, reducing carbon dioxide emissions and providing some of the heat for heating. In this study, the potential of geothermal energy as an energy source is modelled on an existing sample site and an existing network of wells classified as barren. The impact on carbon dioxide emissions of a hypothetical residential, industrial and agricultural switch to geothermal energy in the sample area was quantified. To support the decision-making phase of the geothermal investment process, a Bayesian network was used to model the conditions for a successful project and the CO₂ emissions saved as a function of the degree of conversion. This method can be used as a decision support tool to solve similar environmental problems.

Keywords: Bayesian network, geothermal, climate change, CO₂ emission

1. BEVEZETÉS

A Bayes-hálók, rövidítve BN-ek (belief network vagy causal network) mint fogalom először 1988-ban Judea Pearl által kerültek említésre. Lényegében a teljes valószínűségi és a Bayes-tétel alapján alakul ki a grafikus megjelenítése. Az 1970-es években A. Philip Dawid brit statisztikus által kidolgozott, a valószínűségi függetlenség ábrázolására és a valószínűségi függetlenséggel való gondolkodásra vonatkozó alapvető munkán alapuló Bayes-hálózatok intuitív és hatékony módját kínálják a nagy méretű modellek ábrázolásának, ami a komplex rendszerek modellezését praktikussá teszi [1]. A Bayes-hálózatok könnyen kezelhető és koherens módot biztosítanak a bizonytalanság ábrázolására, és egyre gyakrabban használják őket a bizonytalan vagy hiányos információ ábrázolására. Nem túlzás azt állítani, hogy a Bayes-hálózatok bevezetése megváltoztatta a valószínűségekről való gondolkodásunkat.

2. A GEOTERMIKUS HŐHASZNÁLAT KLÍMAVÁLTOZÁSRA KIFEJTETT HATÁSVIZSGÁLATI PARAMÉTEREI

A projekciós vizsgálatok során az ALADIN és a RegCM klímamodellek eredményeit elemeztük, melyhez a NATÉR (Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer) által előállított kimeneti adatok adták a kezdeti peremfeltételeket az 1961–2100 időszakra vonatkozólag. Az adatok a CARPATCLIM-HU adatbázisból származnak. A döntési folyamatban a következő paramétereket vettük figyelembe:

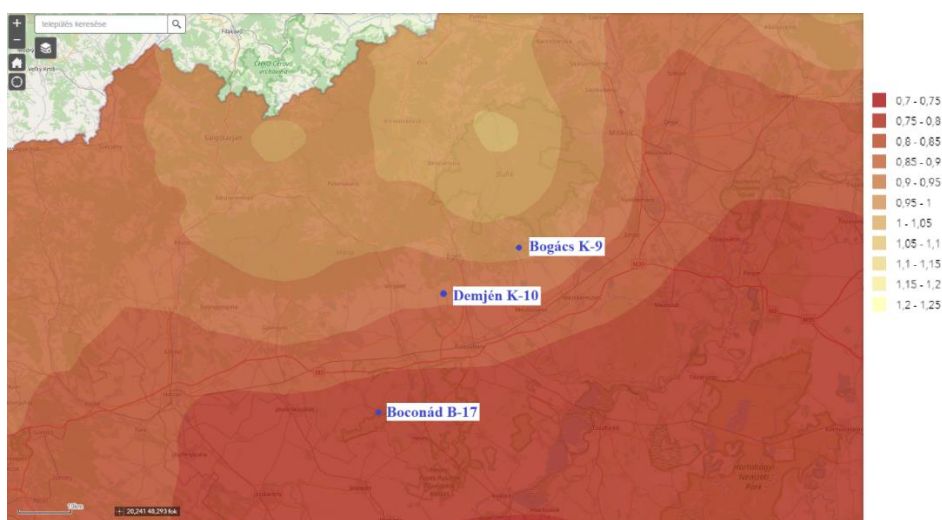
A csapadéktérkép a vizsgált terület átlagos évi csapadékmennyiségének területi eloszlását ábrázolja. A megjelenített értékek az adatbázis alapján származtatott éves összegek átlagolásával álltak elő. A csapadékindexek közül azon napok átlagos évi számát vizsgáltuk, amikor 0 °C-nál magasabb átlaghőmérséklet mellett a napi csapadékösszeg meghaladta a 30 mm-t.

A hőmérséklettérképek a vizsgált terület átlaghőmérsékletének területi eloszlását ábrázolják. Az értékek a napi középhőmérsékleti adatok átlagolásával álltak elő. A paraméterek évszakonkénti elemzésére, az átlaghőmérséklet eloszlásának és az átlaghőmérséklet várható változásának elemzésére is sor került. A hőmérsékleti index térképei a forró napok átlagos évi számát ábrázolják a vizsgált területen. A forró napokon a napi maximum hőmérséklet legalább 35 °C.

A potenciális evapotranspiráció térképei az évi teljes potenciális evapotranspiráció átlagos értékeit ábrázolják a vizsgált területen, mely értékek Thornthwaite módszere alapján kerültek meghatározásra. A megjelenített adatok a potenciális evapotranspiráció éves összegeinek a teljes vizsgált időszakra vett átlagai. A potenciális evapotranspiráció várható változása is elemzésre került az ALADIN és a RegCM klímamodellek alapján.

Az aszályindexek exportált térképei az ariditási index átlagos értékeit ábrázolják a vizsgált területre (1. ábra). Az ariditási index az évi csapadékösszeg és az évi potenciális evapotranspiráció hányadosa. A klimatikus vízmérleg térképei az éves klimatikus vízmérleg átlagos értékeit ábrázolják a vizsgált területen. A klimatikus vízmérleg az évi csapadékösszeg és az évi potenciális evapotranspiráció különbségeként állt elő, ahol a potenciális evapotranspiráció Thornthwaite módszere alapján került meghatározásra, az éves klimatikus vízmérlegértékeket a teljes vizsgált időszakra átlagoltuk.

Az elkészült klímaterképek kutatásunkban állapotfelmérést szolgálnak, a csökkenthető CO₂-kibocsátás mértékétől függően a térképek változhatnak. Ennek a változásnak a jelentőségét prognosztizáljuk az eredmények értékelésével. Térképeink a geotermikus átállás hatását figyelembe vevő új térképek összehasonlítás alapját képezhetik. Ezt követően az egyes klímamodellekkel vizsgáltuk a területre vonatkozó projekciókat a közeli és távoli jövőt nézve, valamint a napok száma helyett a napok számának várható változását. Vizsgáltuk a forró napok számának és a hőségriadós napok, majd a fagyos napok számának alakulását, illetve a napok számának várható változását, a NATÉR ennek elemzésére is lehetőséget ad.



1. ábra. Egy aszályindextérkép a vizsgált területről

3. AZ ÚJRANYÍTÁSRA ALKALMAS KUTAK KIVÁLASZTÁSA

A világon a felhagyott kutak állapota igen változó lehet, kezdve az olyan esetektől, ahol a helyreállítás költsége megközelítené akár egy teljesen új kút létesítését, az olyanokig, ahol a felhagyást követően is folyamatos karbantartás alatt tartották a kutat. Az újrahatszósítással nemcsak a költségek csökkennek, de megoldódik az a szennyeződési probléma is, amit ezek a kutak potenciálisan magukban hordoznak [2]. Ezen tényezőket figyelembe véve világszerte egyre több kutatási téma célpontjává válik a felhagyott kutak geotermális céllal történő újrahatszósíthatóságának vizsgálata [3].

Magyarországon a kutak időleges lezárását vagy végleges felhagyását a hatályos bányatörvény és egyéb környezetvédelmi törvények szabályozzák. Egy kút végleges felhagyása esetén a legszigorúbbak az elvárt intézkedések, ilyenkor a nem cementezett béléscsőszakatok visszamentése mellett a terület teljes rekultivációja kötelező. Ezen munkáknak komoly anyagi vonzatai lehetnek, így egy kimerült szénhidrogénkút esetében az üzemeltető érdeke is lehet, hogy megoldást találjon annak további hasznosíthatóságára. A műszakilag felszámolt, rekultivált kutak esetében viszont kizárt bármilyen célú újrafelhasználás, mert amíg a cementdugóval biztonságba helyezett kutak esetében a cementdugó újbóli átfúrása esetén megnyitható a kút, itt sok esetben talpig teljesen el van tömődve vagy felszínig van cementezve.

A három, újrrányításra alkalmas kút többféle szempont alapján került kiválasztásra. Osztályozási szempontok a fúrás éve, a kút eredeti funkciója (víztermelő), a napi hozam, a kifolyó hőmérséklet, a naponta termelhető geotermikus energia, a szűrőzött szakasz hossza és az infrastruktúra távolsága. Átlagolva a kutak a maximum 5 pontból a következő pontokat érték el: Demjén K-10: 4,25; Bogács K-9: 4,25; Boconád B-17: 3,87. A minősítési módszer alapján mindhárom kút alkalmas az újrrányításra geotermikus hőhasznosítás céljából.

Miután a kutak újrrányíthatóságáról az előzetes vizsgálatok során meggyőződünk, és megtörtént a körülbelül 60 km-es környezetükben a klímaviszonyok állapotának felmérése, áttértünk az energetikai elemzésre. Ez azért fontos, mert az üzembe helyezett új kutakról tudnunk kell, képesek lesznek-e ellátni az adott települést fűtési energiával, illetve a tiszta technológia bevezetése hány tonna szén-dioxid-kibocsátástól menti fel a területet. A becslés során feldolgoztuk a Központi Statisztikai Hivatal online adatbázisában elérhető, önkormányzati és lakossági tüzfifa-, szén- és

földgázfogyasztással kapcsolatos adatait a választott településekre vonatkozóan. Minden település esetében az adatokat a 2. és 3. ábra szerinti rendszerezésben gyűjtöttük ki. Az adatokat beépítettük a hálómódelbe, a végeredmények ez alapján kerültek számításra.

1.2. FÖLDGÁZFogyasztás kibocsátása										ÖSSZESEN	
SZÉN-DIOXID		Önkormányzat	Lakosság	Ipar	Szolgáltatás	Mezőgazdaság				t CO ₂	t CO ₂
32.24			631.47		134.50	9.54	0.00				807.75
Az adatok a KSH-tól kérelmezhetők vagy az alábbi linken megállíthatók (gázellátás), a települési lekérdezés után változtatás nélkül az alábbi táblába bemásolhatók. http://statinfo.ksh.hu/Statinfo/themeSelector.jsp?page=2&szst=ZRK											
Év	Értékesített gáz (1000 m ³)								Földgáz energiatartalma:		
	Közvetlen háztartási	Lakóépületek központi kazánjai	Távfűtést ellátó vállalkozások	Kommunális	Ipari	Mezőgazdasági	Egyéb kategória	Osszesen	34 MJ/m ³		
2019	331	0	0	17	71	0	5	423	Forrás: Földgáz 2016		

2. ábra. Demjén települési földgázfogyasztása és a hozzá kapcsolódó CO₂-kibocsátás

1.4. ÖNKORMÁNYZATI ÉS LAKOSSÁGI TŰZIFA- ÉS SZÉNFOGYASZTÁS KIBOCSÁTÁSA										ÖSSZESEN	
SZÉN-DIOXID		Önkormányzat	Lakosság							t CO ₂	t CO ₂
0.00			100.73								100.73
Önkormányzat tüzfűzfogyasztása:										lakossági tüzfifa- és szénfogyasztás (adatok a megyei 2.3.3.2. KSH táblából):	
tonna/év		mutató:		cella:		érték:		mértékegység:			
0		összes megyei lakás:		K50		136 022		db lakás			
0		összes települési lakás:		(területi adat)		331		db lakás			
0		konvektoros/kályhás fűtés fával:		K23		12 371		db lakás			
0		szénnel:		K24		196		db lakás			
0		gázzal és fával:		K30		9 789		db lakás			
0		szénnel és fával:		K31		3 167		db lakás			
0		cirrós/kazános fűtés fával:		K37		6 193		db lakás			
0		szénnel:		K38		411		db lakás			
0		gázzal és fával:		K44		14 604		db lakás			
0		szénnel és fával:		K45		3 687		db lakás			
0		Lakosság tüzfűzfogyasztása (automatikusan jobboldali)		becsült települési lakossági tüzfűzfelhasználás:		463		tonna/év			
0		2569.7563		2370.7		215.45		tonna/év			
0		Lakosság szénfűzfogyasztása (automatikusan jobboldali számítás)		becsült települési lakossági szénfelhasználás:		31		tonna/év			
0		169.31031		215.45		5.58		tonna/év			
0		Átlagos lakás évi tüzfűzfogyasztása:		5.58		3.194		tonna/év			
0		Átlagos lakás évi szénfűzfogyasztása:		3.194		5.5556		MWh/t			
0		Tonnánkénti fa energiatartalma:		5.5556		5.4		MWh/t			
0		Tonnánkénti szén átlagos energiatartalma:		5.4				MWh/t			

3. ábra. Demjén települési tüzfifa- és szénfűzfogyasztása és a hozzá kapcsolódó CO₂-kibocsátás

4. A BAYES-HÁLÓ ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK ELMÉLETI HÁTTERE

Az a tisztán elméleti nézet, miszerint a Bayes-hálózatok függetlenséget ábrázolnak, és hogy bármely két változó, X és Y közötti kapcsolathány a köztük lévő (esetleg feltételes) függetlenséget jelenti, a gyakorlatban nem intuitív és nem kezelhető könnyen [4]. A Bayes-hálózatok olyan oksági gráfok az általánosan elfogadott nézetek szerint, amelyekben minden kapcsolat (arc) közvetlen oksági hatást jelent az általa összekötött változók között. Egy X-től Y-ba mutató irányított kapcsolat azt az információt ábrázolja, hogy X ok-okozati tényezője Y-nak. Bár ez a nézet informális, és könnyű matematikailag ellenpéldákat konstruálni, mégis könnyen kezelhető, és szinte mindenki, aki Bayes-hálózatokat alkalmaz a gyakorlatban széles körben használja. Jól bevált feltételezés, hogy az oksági gráfok automatikusan helyes függetlenségi mintázatokhoz vezetnek. A változó párok közötti kapcsolatok hiánya egyszerű tényeket fejez ki a változók közötti oksági hatások hiányáról. A változó párok közötti függetlenségek a grafikon szerkezetéből következnek, amely a háló kvalitatív komponense. Így lehetséges a Bayes-hálózatokat pusztán a modellünkben szereplő változók közötti oksági kapcsolatokról alkotott elképzeléseink alapján felépíteni.

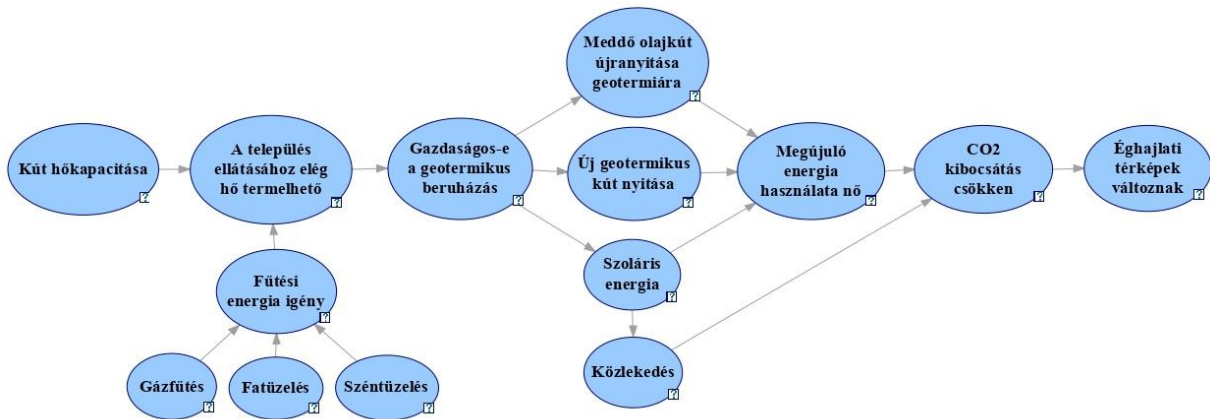
A Bayes-hálózatok szerkezeti tulajdonságai, valamint a csomópontjaikhoz kapcsolódó feltételes valószínűségi táblázatok lehetővé teszik a valószínűségi következtetéseket a modellen belül [1]. A BN-en belüli valószínűségi érvelést a bizonyítékok megfigyelése indukálja. A megfigyelt csomópontot evidencia-csomópontnak nevezzük. A megfigyelt csomópontok instanciálódnak, ami a legegyszerűbb esetben azt jelenti, hogy kimenetelük bizonyossággal ismert. A bizonyíték hatása terjedhet a hálózaton keresztül, módosítva a bizonyítékkal valószínűségi szempontból kapcsolatban álló más csomópontok valószínűségi eloszlását.

4.1. A hálóépítés szempontrendszere és használata

A háló építésekor több szempontot vettünk figyelembe: az ipar, a mezőgazdaság és a lakosság hőhasználata, a hőmennyiség elegendő-e, az átállási hozzáállás, a gazdaságosság, az ösztönző állami támogatás. A hálóban, mint ahogy fent is említésre került, többféle csomópont alkalmazható. Ilyenek többek között az esély (chance node), a döntési (decision node) és az értékcsoomópontok (value node). Ezek megfelelő használata nagyban befolyásolja a háló megfelelő működését, valamint a közöttük lévő kapcsolattal (arc) vagy annak hiányával más-más kérdésekre tudunk választ adni. Fontos beleépíteni a témát érintő összes nagyobb kérdést, amely a döntéshozásban sarkalatos pont lehet, azonban nem érdemes a hálót használni, ha az első kérdésre, például a projekt gazdaságosságára „nem”-mel válaszolunk, ugyanis onnantól értelmetlen a többi kérdés.

A csomópontok és kapcsolatok építésekor kiemelendő tényező, hogy a háló gyakorlati szempontból sosem teljes, azaz mindig van olyan szempontrendszer, ami alapján a további bővíthetősége lehetséges. Ennek megfelelően elengedhetetlen, hogy a háló építése során a fennálló kapcsolatrendszer kialakítása és vizsgálata szakértői szemmel történjen. Mindez a háló komplexitásának biztosítása szempontjából kiemelten fontos, a fentiek figyelembevételével a bővíthetőség korlátját számítási kapacitás jelentheti. A tanulmány célja a bemutatott terület állapotfelmérése, és egy olyan eszköz kínálata, amely támogatja a zöldenergia használatának bevezetését, adatokkal támasztja alá annak szükségességét, és a döntéshozó pozícióban lévők munkáját támogatja.

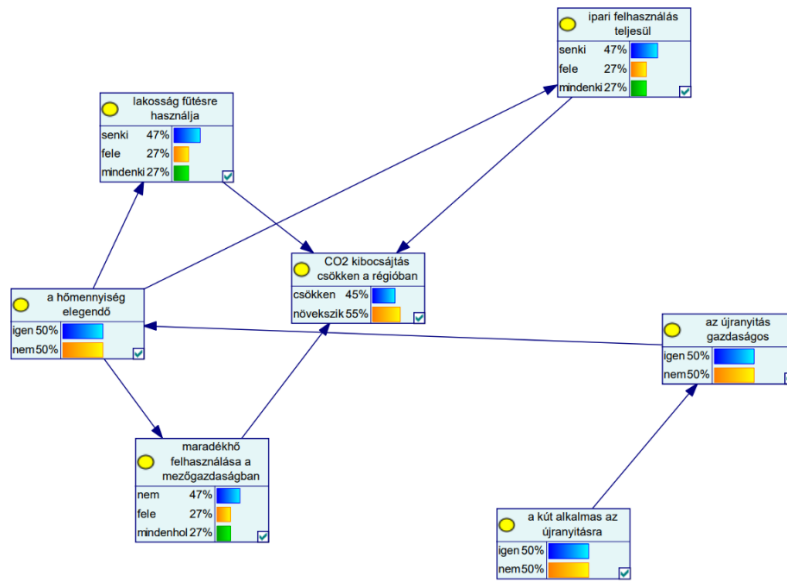
A 4. ábrán a háló alapjaként szolgáló okfa látható, amely az összefüggéseket ábrázolja, kiegészítve a legfontosabb kérdésekkel. Az okfa valójában már majdnem egy Bayes-háló, illetve könnyen átalakítható Bayes-hálóvá, a csomópontok jellegének változtatásával (esély, érték, döntés) és valószínűségek hozzáadásával. Mi ezt a hálót azonban a gondolatmenetünk grafikus ábrázolására használtuk.



4. ábra. A geotermikus átállási projektek okfája a közben felmerülő kérdésekkel

Kiinduló kérdés a kutak újrainyitásának gazdaságossága, amelyre igen válasz szükséges a további vizsgálathoz. Ezután következik a kutak által termelt hőmennyiség elegendőségének kérdése, amelyre a fentebbi fejezetben, az adatgyűjtés során adtunk választ, mindhárom település esetében igen a válasz, 20-40% pufferkapacitás is marad egyes esetekben. Amennyiben ezt a modellt más területre kívánja alkalmazni a felhasználó, beépítettünk egy „új geotermikus kút nyitása” csomópontot is, erre akkor van szükség, ha az előző kérdésre nem a válasz. Ezen ágak összefutnak a „megújuló energia használata nő” csomópontba, amelybe kiegészítésképp a szoláris energiát is belevontuk, mivel a szivattyúk működtetéséhez is használható a napenergia. A napenergia-csomópont kihatással van a közlekedésre is, amelyet ugyan a tanulmányban nem tárgyalunk, mivel települési adatunk nincs, így nem tudjuk mekkora hatással lenne az elektromos közlekedésre való átállás. A geotermia szempontjából legfontosabb hatás a hagyományos tüzelők használatának csökkenése, tehát a szén, fa, gáz tüzelőanyagok kiváltása. Ezt egy másik ágban vittük bele a modellbe, amely ág szintén a CO₂-csökkenésének csomópontjába fut be. A csökkenő CO₂ pedig végül az éghajlati térképek változásához vezetne, amely az ALADIN és a RegCM klímamodellek optimista és pesszimista projekcióit módosítaná a területen. A tiszta energiára való átállás után megtakarított CO₂-kibocsátás alapján az érintett szakemberek tudnák módosítani a klímaterképeket.

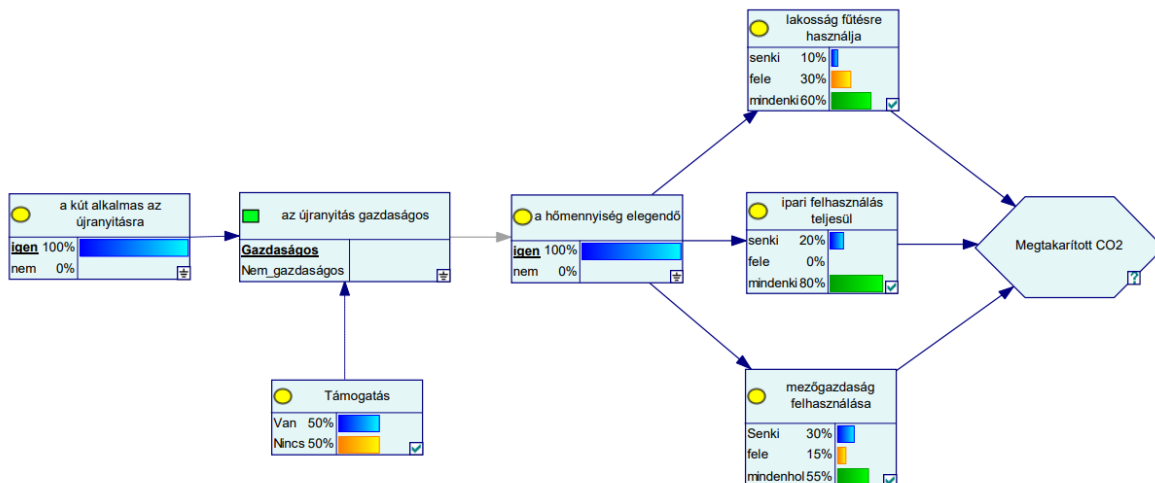
Az általunk fejlesztett Bayes-tesztháló az 5. ábrán látható, ahol a végeredmény az, hogy a CO₂ csökken a területen. A Bayes-tétel szerint egy később bekövetkezett esemény tükrében vizsgáljuk a korábban bekövetkezettek valószínűségét, de a háló használatakor ez a vizsgálat mindkét irányban elvégezhető, a kezdeti vagy kimeneti csomópontok értékeit változtatva láthatjuk, a többi érték miként változik. Természetesen aki a későbbiekben használni fogja ezt a hálót, szabadon változtathatja a többi valószínűséget, ugyanis az egyes projektek eltérőek lehetnek, több vagy kevesebb lehet a befolyásoló tényező, amelyeket törölni vagy hozzáadni kell. Ez a háló egy keretrendszernek tekinthető, gyakorlatilag egy teljesen általános modell a legegyszerűbb környezetre (vidéki falvak) építve, kis lakossággal, minimális mezőgazdasággal, illetve elenyésző vagy nem létező ipari tevékenységgel.



5. ábra. A Bayes-tesztháló becsült értékekkel lefuttatva

4.2. Az eredményháló

A kutatásunk eredményeképp előállított háló a 6. ábrán látható. Az okfában felvázolt legfontosabb befolyásoló tényezők beépítésével és a tesztháló viselkedéséből levont következtetésekkel együttesen olyan modellt készítettünk, amely a fosszilisenergia-fogyasztók átállásának függvényében megadja a megtakarított CO₂-kibocsátást tonnában. A hálóban evidenciacsomópontok, esély-, döntési és értékcsomópontok kapcsolata szolgáltatja az eredményt. Az evidenciák a kút alkalmassága az újranításra, és az elegendő hőmennyiség, amiket a kűrtékelő módszer és az energetikai számítások támasztanak alá. Az újranítás gazdaságossága ipari szakértők döntése alapján dől el, a kút műszaki állapotától és az infrastruktúra kiépítésétől függ. A kiválasztott kutak mindegyike a települések belterületén található. Az állami támogatás az átállásra szintén befolyásoló tényező, amelyet figyelembe kellett vennünk. A három fogyasztócsoport, a lakosság, az ipar és a mezőgazdaság átállásának valószínűségei a vizsgált területek tanulmányozásával álltak elő.



3. ábra. Az eredményháló

Ezek a csomópontok mutatnak a megtakarított CO₂-csomópontba, ahol összesen 27-féle eset állhat elő, amelyet az 1. táblázat szemléltet. Látható, hogy az első adat 0 t/év megtakarított CO₂-t mutat, mert sem a lakosság, sem az ipar, és a mezőgazdaság hőfelhasználása nem lett átváltva semmilyen mértékben. Az adatok egészen a 2000 t/év fölé növekednek, ahogyan az átállás egyre nagyobb mértékben megvalósul. A megközelítés lebonyolítható, egy ilyen méretű háló nem okoz számítási kapacitási problémát egy modern számítógépnek, több millió esetet is kiszámolhatunk vele. A példánk azt reprezentálja, hogy mennyire szemléletes módja lehet a bayesi megközelítés egy ilyen probléma esetén.

1. táblázat. Geotermikus fűtésre való átállás függvényében megtakarított CO₂ tonnában

lakosság	senki								
ipari	senki			fele			mindenki		
mezőgazdaság	senki	fele	mindenki	senki	fele	mindenki	senki	fele	mindenki
CO ₂ t/év	0	15,165	30,33	16,5	31,655	46,83	33	48,165	63,33

lakosság	fele								
ipar	senki			fele			mindenki		
mezőgazdaság	senki	fele	mindenki	senki	fele	mindenki	senki	fele	mindenki
CO ₂ t/év	1097,155	1112,32	1127,485	1113,655	1128,82	1143,985	1130,155	1145,32	1160,485

lakosság	mindenki								
ipar	senki			fele			mindenki		
mezőgazdaság	senki	fele	mindenki	senki	fele	mindenki	senki	fele	mindenki
CO ₂ t/év	2194,31	2209,475	2224,64	2210,81	2225,975	2241,14	2227,31	2242,475	2257,64

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Fenti munkánkban a geotermia mint opcionális energiaforrás kerül bemutatásra és értékelésre egy adott mintaterületen való alkalmazhatóság tükrében. Több felhagyott kút értékelését követően egy északkelet-magyarországi terület került kiválasztásra az értékelés és az alapmodell kialakítása kapcsán. Miután a fent bemutatott területen több felhagyott kút található, így az online fellelhető klímaadaptációs alap- és modellterképek alapján vizsgáltuk a helyi klímát egy geotermikus beruházás megvalósíthatósága szempontjából. Mindezen túlmutatva ugyanezen terület geotermikusenergia-használatra való átállásának lehetőségét szem előtt tartva Bayes-háló alkalmazásával széles spektrumon értékeltük a feltételezett projekt megvalósíthatóságát. Megállapítottuk, hogy az általunk bemutatott Bayes-háló kiváló döntéstámogató eszközként szolgálhat akár hasonló jellegű beruházási kérdések vagy egyéb természettudományos probléma megválaszolása kapcsán. Az általunk bemutatott modell egy idealizált, egyszerűsített esetet vizsgál, azonban igazolódott a háló alkalmazhatósága jóval komplexebb megközelítésű projektek esetében is [5]. A további terveink közt szerepel a vizsgálati spektrum bővítése, illetve növekvő mennyiségű adat integrálása a valószínűség-értékek egyre pontosabb meghatározhatósága érdekében.

Összefoglalásként megállapíthatjuk tehát, hogy kutatásunkkal a Bayes-háló földtudományban való alkalmazhatóságát – azon belül is a geotermikus beruházások során szükséges döntéshozatali szempontrendszer támogatásában való alkalmazhatóságát – szemléltettük és igazoltuk.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének részeként – a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával valósul meg.

Acknowledgements

The research was carried out in the framework of the GINOP-2.3.2-15-2016-00010 “Development of enhanced engineering methods with the aim at utilization of subterranean energy resources” project of the Research Institute of Applied Earth Sciences of the University of Miskolc in the framework of the Széchenyi 2020 Plan, funded by the European Union, co-financed by the European Structural and Investment Funds.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] P.A. Aguilera, A. Fernández, R. Fernández, R. Rumí, A. Salmerón (2011): Bayesian networks in environmental modelling. *Megjelent: Environmental Modelling & Software*
- [2] W-L. Cheng, T-T. Li, Y-L. Nian, K. Xie (2017); An analysis of insulation of Abandoned Oil Wells reused for Geothermal Power Generation. *Megjelent: Energy Procedia*
- [3] Tomasz Kujawa, Władysław Nowak, Aleksander A. Stachel (2006): Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy. *Megjelent: Energy, Kötet 31, Szám 5, Oldalak 650–664*
- [4] J. Molina, D. Velázquez, J. García-Aróstegui, M. Pulido-Velázquez (2012): Dynamic Bayesian Networks as a Decision Support tool for assessing Climate Change impacts on highly stressed groundwater systems. *Megjelent: Journal of Hydrology*
- [5] J. Molina, D. P. Velázquez, J. L. G. Aróstegui, M. P. Velázquez (2012): Dynamic Bayesian Networks as a Decision Support tool for assessing Climate Change impacts on highly stressed groundwater systems. *Megjelent: Journal of Hydrology, www.elsevier.com/locate/jhydrol*

Szabolcs-Szatmár-Bereg megye ÜHG-kibocsátásának alakulása 2012–2018 között

Development of GHG emissions in Szabolcs-Szatmár-Bereg county between 2012–2018

Kovács Zoltán¹ – Lajtos István¹ – Vass Róbert²

¹ Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet
4400 Nyíregyháza, Kótaji u. 9-11. E-mail: zoltan.kovacs@nye.hu

² Nyíregyházi Egyetem, Turizmus és Földrajztudományi Intézet
4400 Nyíregyháza, Sóstói u. 31/b

Összefoglaló: A klímakutatók többsége egyetért abban, hogy az utóbbi mintegy 200 évben tapasztalható globális felmelegedés szoros összefüggésben van az emberi tevékenység által a légkörbe kerülő többlet üvegházhatású gázok (ÜHG) mennyiségével. Ahogy Magyarország számos megyéje, így Szabolcs-Szatmár-Bereg Megye Önkormányzata is ennek megfelelően már 2012-ben elindította az ez irányú közép- és hosszú távú tervező-fejlesztő munkát. Ennek célja a megye fenntartható, környezettudatos fejlődésének, a vidéki élet megtartásának, a természeti erőforrások megőrzésének, valamint a táji és építészeti értékek megóvásának biztosítása. Ennek eredményeként 2018 tavaszára elkészült a megye klímastratégiája, melynek fontos lépése volt a megyei ÜHG-leltár elkészítése. Ennek a munkának a folytatásaként került sor Szabolcs-Szatmár-Bereg megye ÜHG-kibocsátásának további vizsgálatára. Jelen tanulmány azt vizsgálja, hogy a 2012–2018 közötti időszakban hogyan alakult a megye ÜHG-kibocsátása, amely alapvetően az energiafelhasználáshoz, a nagyiparhoz, a közlekedéshez, a mezőgazdasági termeléshez, valamint a szennyvíz- és hulladékfeldolgozáshoz köthető kibocsátásból áll. Vizsgálataink során megállapítottuk, míg 2012–2016 között alapvetően csökkenő tendenciát mutatott az összesített ÜHG-kibocsátás, addig ezt követően jelentős emelkedés figyelhető meg. Ezzel párhuzamosan a szén-dioxid-megkötés az erdőterületek minimális növekedése miatt kismértékben nőtt.

Kulcsszavak: ÜHG-kibocsátás, Szabolcs-Szatmár-Bereg, energiafelhasználás, közlekedés, klímastratégia

Abstract: The majority of climate scientists agree that global warming over the last 200 years or so is closely linked to the amount of excess greenhouse gases (GHGs) released into the atmosphere by human activity. Like many counties in Hungary, the self-government of Szabolcs-Szatmár-Bereg County started medium- and long-term planning and development work in 2012. The aim is to ensure the sustainable, environmentally aware development of the county, the preservation of rural life, the conservation of natural resources and the protection of landscape and architectural values. As a result, the county's climate strategy was completed by the spring of 2018, and an important step in this process was the preparation of the county's GHG inventory. As a continuation of this work, the GHG emissions of Szabolcs-Szatmár-Bereg county were further analysed. This study examines the evolution of the county's GHG emissions over the period 2012-2018, which mainly consist of emissions related to energy use, large industry, transport, agriculture, and wastewater and waste treatment. Our analysis found that while aggregate GHG emissions showed an overall downward trend between 2012 and 2016, there was a significant increase thereafter. At the same time, carbon sequestration has increased slightly due to the minimal increase in forest area.

Keywords: GHG emissions, Szabolcs-Szatmár-Bereg, energy use, transport, climate strategy

1. BEVEZETÉS

A hétköznapi szóhasználatban a klímaváltozás ma már mindennaposá vált. Általánosságban a kifejezés alatt az emberi tevékenység következtében a Föld éghajlatában megfigyelhető változást, valamint a gyorsuló ütemű globális felmelegedést értjük. A klímaváltozás okozta negatív hatások Szabolcs-Szatmár-Bereg megyét az országos átlaghoz képest nagyobb mértékben érik. Az évi középhőmérséklet az ország ezen részében nőtt a legintenzívebben az elmúlt évtizedekben [1]. Az utóbbi mintegy 200 évben tapasztalható globális felmelegedés okozói – a legtöbb klímakutató szerint – az emberi tevékenység által a légkörbe kerülő többlet üvegházhatású gázok (ÜHG) [2]. A legjelentősebbek üvegházhatású gázok: a vízgőz, a szén-dioxid, a metán, a dinitrogén-oxid, a troposzférikus ózon [3]. Az éghajlatváltozás legkézenfoghatóbb eleme a globális felmelegedést kiváltó folyamatok és anyagi összetevők jelentős része az antropogén (emberi) tevékenységek nélkül is jelen van. Az éghajlati változásokat előidéző természetes körülmények között is előforduló ÜHG-k mellett a 20. század folyamán megjelenő mesterségesen előállított üvegházhatású gázok is nagyban felelősek, mint pl. a nitrogén-trifluorid (NF₃), kén-hexafluorid (SF₆), a HFC-125, HFC-134a, HFC-143 [4].

A jelenlegi határozott mértékű felmelegedés azonban egyértelműen az ipari forradalom kezdetétől, a csaknem két évszázadon át jelentősen növekvő szén-dioxid- (CO₂-) kibocsátásnak tulajdonítható. A KSH adatforrásai alapján fő forrásként a hő- és villamosenergiát előállító, fosszilis (nem megújuló) tüzelőanyagot égető, pl. kőszén-, lignit-, kőolaj-, olajpala-, földgáz-erőművek szolgálnak. Az üvegházhatású gázok másik jelentős kibocsátója a közlekedés, amely az összes hazai ÜHG csaknem 17%-át teszi ki, ez az érték jóval nagyobb szintet mutat a nagyvárosi környezetben. A legfontosabb közlekedésből származó gázok a CO₂ (szén-dioxid), N₂O (dinitrogén-oxid), O₃ (ózon), valamint a szilárd koromrészecskék. Országos viszonylatban jelentős mértékű a mezőgazdaság ÜHG-kibocsátása, ami tartalmazza a műtrágya-felhasználásból, az állattenyésztésből és egyéb mezőgazdasági technológiák – mint pl. a talajforgatás – használatából eredő kibocsátást. Ebben az ágazatban a fő üvegházhatású gázok a N₂O és a CH₄ (metán).

2. ANYAG ÉS MÓDSZERTAN

A globális felmelegedési potenciált (GWP=Global Warming Potential) a légkörben előforduló gázok üvegházhatásának számszerűsítésére használják. Ennek értékei az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának CO₂-egyenértékké történő átalakítására szolgálnak. A felhasznált globális felmelegedési potenciálok (100 éves időhorizontra) a következők: CH₄ = 25; N₂O = 298; SF₆ = 22 800; NF₃ = 17 200. Tehát a CO₂-egyenértékre történő átszámítás során az egyes gázokat a fentebbi szorzókkal vesszük figyelembe (pl. 1 t CH₄ = 25 t CO₂-egyenértékkel).

Jelen tanulmányunkban a 2012–2018-as évek esetében határoztuk meg Szabolcs-Szatmár-Bereg megye teljes ÜHG-kibocsátásának mértékét. A számítható felhasznált adatok forrása alapvetően a KSH által gyűjtött adatokra épül. Az adatok feldolgozása, elemzése és értékelése a Klímabarát Települések Szövetsége (KBTSZ) által kidolgozott módszertan alapján történt. Ennek alapján ebben a dokumentumban az ÜHG-értékek meghatározása során is ezt a módszertan alkalmaztuk. A módszertan pontos meghatározásának leírása megtalálható a következő dokumentumban: Módszertani útmutató megyei klímastratégiák kidolgozásához [4]. A módszertan az alábbi területek ÜHG-kibocsátását veszi figyelembe:

- energiafogyasztás,
- nagyipar,
- közlekedés,
- mezőgazdasági termelés,
- hulladékkezelés,
- nyelők.

Az energiafogyasztásból származó ÜHG-mennyiség meghatározása során figyelembe vettük az elektromosáram-fogyasztásból, a földgázfogyasztásból, valamint a lakossági tűzifa- és szénfogyasztásból származó kibocsátást. A nagyipari kibocsátás figyelembe veszi az előző felsorolásban nem szereplő, egyéb ipari energiahordozók felhasználásából, valamint a nagy ÜHG-termeléssel járó ipari üzemek (pl. cementgyártás, vegyipar, kohászat stb.) működése során keletkező ÜHG-mennyiséget. A közlekedési szektor ÜHG-kibocsátásának meghatározása során a közúti közlekedésből és a vasúti közlekedésből származó mennyiségeket határoztuk meg. A mezőgazdasági termeléshez köthető ÜHG-kibocsátás a kérődzők kibocsátásából, a hígtrágya-emisszióból, valamint a szerves- és műtrágya-emisszióból tevődik össze. A hulladékkezelés ÜHG-kibocsátásának forrása a szilárdhulladék-kezelés, valamint a szennyvízkezelés. A nyelők, amelyek alapvetően az erdőket jelentik, a szén-dioxid megkötését valósítják meg.

Az ÜHG-leltár nemzetközileg egységesített szabályok alapján felépített számítási eljárás és adattár, mely az üvegházhatású gázok kibocsátásának és a szénmegkötésnek számszerű becslésére alkalmas. Nemzetközi megállapodás és a kapcsolódó EU-s és hazai jogszabályok alapján az országos ÜHG-leltárról Magyarország évente jelentést tesz az ezzel foglalkozó ENSZ-testület számára. Jelen tanulmányunk készítése során a Klímabarát Települések Szövetsége (KBTSZ) által a megyei ÜHG-leltárak készítéséhez kiadott, egységesített számítási módszertant, illetve számolótáblákat használtuk fel.

3. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

3.1. Az energiafogyasztásból eredő ÜHG-kibocsátás

Szabolcs-Szatmár-Bereg megye a KEHOP-1.2.0-15-2016-00012 kódszámú projekt keretében már korábban megalkotta saját klímastratégiáját, amelyet 2018-ban fogadott el a Megyei Közgyűlés. A dokumentum 2.1.1. fejezete tartalmazza a megye ÜHG-leltárát a 2012–2015 évek vonatkozásában. Jelen tanulmányban a megadott módszertan alapján határoztuk meg Szabolcs-Szatmár-Bereg megye ÜHG-kibocsátásának értékeit a 2016–2018-as évek vonatkozásában, folytatva a korábbi adatsorokat.

A megye energiaforrások tekintetében döntően importforrásokból látja el szükségleteit. A fosszilis energiahordozók tekintetében működő kőszénbányával nem rendelkezik, földgáz- és kőolaj-kitermelés nem folyik a megye területén. A megújuló energiaforrásokat tekintve igen változatos a felhasználási források köre. Vízenenergia-hasznosítás területén kiemelendő az 1959-től üzemelő Tiszalöki vízerőmű (12,9 MW). A megye legnagyobb erőműve a Nyíregyházi Kombinált Ciklusú Erőmű (48 MW), amely földgázfogyasztású. A megye területén több biogáz-előállító telep is található. Biomassza-erőmű Szakolyban működik, melynek névleges kapacitása: 19,8 MW. A távhőrendszerek földgázfogyasztású gázmotorokkal üzemelnek, villamos energiát és hőenergiát (nyáron hűtést is) állítanak elő

(Nyíregyházi Egyetem: 2 MW, Nyíregyháza Örökösöld). A LEGO gázturbinás egysége 7,5 MW. Biobrikett- és biopellet-előállító üzem több helyen működik a megyében. Biouzemanyag-előállító üzem jelenleg nem működik a megyében.

A geotermikus energia felhasználása elsősorban gyógyászati (balneológiai) célú, kismértékben távhő formájában is hasznosított. Szélerőmű a megye területén nem található. Kisebb szélerőgépek és vízszivattyúzásra alkalmas szélerőgépek azonban működnek a lakossági és a mezőgazdasági szektorban. A napelemes erőművek száma az utóbbi években a megyében számottevően megnövekedett (pl. Nyíregyházi Egyetem – 0,367 MW; Tiszabездéd – 0,617 MW; Baktalórántháza – 2x0,499 MW; Balkány – 2x0,499 MW; Fehérgyarmat – 9 MW stb.).

A megye villamosenergia-fogyasztása 2018-ban 1.584.632 MWh volt, mely kommunális, lakossági, közvilágítási, ipari, mezőgazdasági és egyéb célra történt. A villamosenergia-fogyasztás legnagyobb hányadát a lakossági és az ipari fogyasztás tette ki, számszerűleg 533.528 MWh és 635.009 MWh. A villamosenergia-felhasználás összességében növekvő tendenciát mutat. A megyei klímastratégiában vizsgált 2012. évi fogyasztási adatokhoz képest mintegy 1 %-os növekedés jellemzi 2018-ra a megyei villamosenergia-felhasználást.

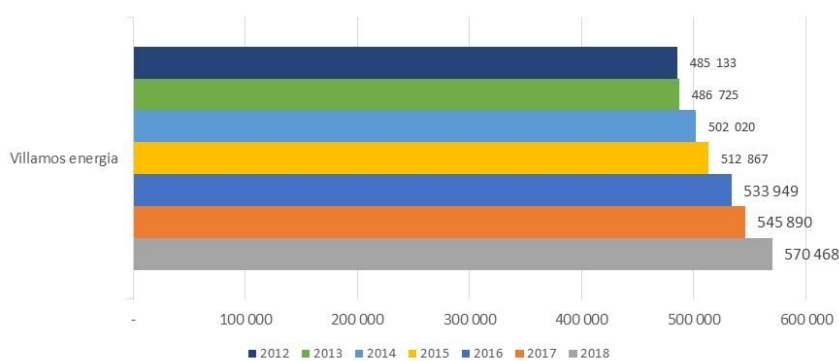
A villamosenergia-fogyasztásból származó szén-dioxid-kibocsátás az 1. ábrán látható. Ezen értékek a fogyasztásnak megfelelően növekvő tendenciát mutatnak. Csökkenés akkor várható, ha az országos villamosenergia-előállítási forrásoldal részarányában a megújuló energiaforrások és az atomenergia részaránya tovább fog növekedni.

A megyei vezetékes földgáz-felhasználás fogyasztók szerint a lakosság, az ipari szereplők, a szolgáltatás, a mezőgazdaság és az önkormányzati (kommunális) fogyasztók között oszlik meg. A felhasznált földgáz mennyisége alapján meghatározható a keletkező szén-dioxid mennyisége, melynek alakulását összesítő évenkénti bontásban a 2. ábra mutatja.

A lakossági fogyasztás (háztartások és lakóépületek központi kazánjai) adja a felhasznált mennyiségben belül a legnagyobb arányt. Bár ebben a szegmensben változó tendencia látszik, melynek oka elsősorban a külső hőmérséklet változásától függő fűtési igényvel van összefüggésben.

A vizsgált időszak vonatkozásában a teljes ÜHG-kibocsátás értékeiben egyértelműen ingadozás figyelhető meg, amely – a lakossági használathoz hasonlóan – szoros összefüggésben van a fűtési időben tapasztalható külső hőmérséklettel. Ugyanakkor az ipari szegmensben növekedés figyelhető meg, amely – az előző okon túlmutatóan – a növekvő megyei ipari termelésből származik. A szolgáltatási szektorban – amelynek legnagyobb hányadát a távhőszolgáltatás jelenti – az ingadozást szintén a fűtési szükségletek kielégítésének igényváltozása okozza. A mezőgazdasági szektorban szintén jelentős ingadozások figyelhetőek meg, ami szoros összefüggésben van a terményszárítás hőigényével. Összességében a vizsgált időszakban a megye földgázfogyasztásból származó ÜHG-kibocsátása az 500-600 ezer tonna/év sávban ingadozott, és alapvetően stagnálást mutat.

Az éves megyei villamos energia fogyasztásból származó ÜHG kibocsátás alakulása 2012-2018 között (t CO₂ egyenérték)



1. ábra. Szabolcs-Szatmár-Bereg megye villamosenergia-fogyasztásból származó ÜHG-kibocsátása (Forrás: KSH-adatok alapján saját számítás)

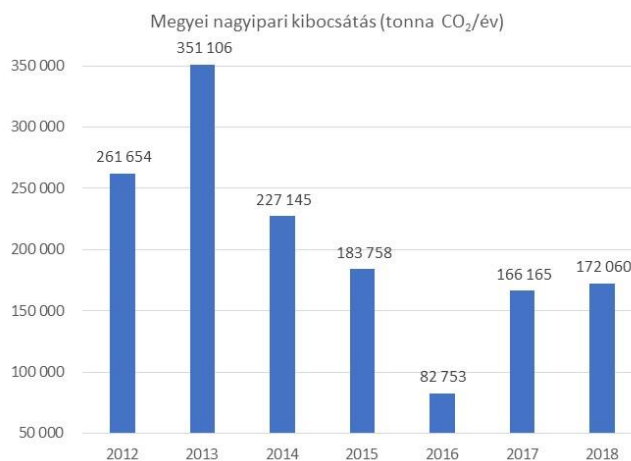
Földgáz felhasználásból származó CO₂-kibocsátás megyénként a felhasználók szerint (tonna)



2. ábra: Szabolcs-Szatmár-Bereg megye földgázfelhasználásból származó ÜHG-kibocsátása (Forrás: KSH-adatok alapján saját számítás)

3.2. A nagyipari folyamatokból eredő ÜHG-kibocsátás

A nagyipari kibocsátók közé sorolhatók a villamos energiától és földgáztól eltérő energiahordozók (pl. fűtőolaj, biomassza, szén) felhasználásával működő létesítmények. A nagyipari kibocsátásoknál figyelembe vehető üvegházhatású gázok: a szén-dioxid (CO₂), a metán (CH₄) és a dinitrogén-oxid (N₂O). A szén-dioxid-kibocsátás jelentkezik közvetlen és közvetett formában, azaz a földgáz és a villamos energia felhasználása következtében és a technológia során. A szén-dioxid-egyenértékre átszámított ÜHG-kibocsátás összesítve a 3. ábrán látható, amely a vezetékes földgáz felhasználáson kívüli egyéb más energiaforrásból származtatható. A vizsgált időszak vonatkozásában jelentős ingadozás figyelhető meg, amely a nagyipari ÜHG-kibocsátás ingadozásának, illetve az alkalmazott adatszolgáltatás-változásnak a következménye. Általánosságban kijelenthető, hogy Szabolcs-Szatmár-Bereg megyében a nagyipari ÜHG-kibocsátás nem tekinthető meghatározó forrásnak.



3. ábra. Szabolcs-Szatmár-Bereg megye nagyipari ÜHG-kibocsátása
(Forrás: EU ETS adatok alapján saját számítás)

3.3. A közlekedésből származó ÜHG-kibocsátás

A közlekedés a társadalom és a gazdaság működésének egyik alapvető feltétele, amelynek színvonala egyben a gazdasági fejlettség egyik fokmérője is. Jelenleg a nitrogén-oxidok (NO_x), szénhidrogének (HC), szén-monoxid (CO) és a szálló por (PM₁₀ és PM_{2,5}) határértékeit szabályozzák a legtöbb gépjármű esetében, beleértve a személy- és tehergépkocsikat, traktorokat, vonatokat és folyami hajókat; a tengerjáró hajók és repülőgépek azonban nem esnek a szabályozás hatálya alá. Mivel Szabolcs-Szatmár-Bereg megye fekvéséből adódóan Romániával, Szlovákiával és Ukrajnával is határos, ezért a



4. ábra. Szabolcs-Szatmár-Bereg megye közlekedésből származó ÜHG-kibocsátása
(Forrás: KSH-adatok alapján saját számítás)

nemzetközi kapcsolattartásban és országos viszonylatban is jelentős szerepe van az infrastruktúra-rendszerek közül a közút- és vasúthálózatnak. A közlekedésből származó ÜHG-kibocsátás alakulása a vizsgált időszak vonatkozásában a 4. ábrán látható (az adatok nem tartalmazzák a vízi és légi közlekedésből származó kibocsátást).

Amennyiben az egyes alszektorok összmenységhez képesti részarányát vizsgáljuk, úgy az alábbi megállapításokat tehetjük:

- az egyéni közlekedésből származó ÜHG-kibocsátás folyamatosan, évről évre növekedést mutat;
- a tömegközlekedés ÜHG-kibocsátása a három szektor közül a legkisebb, és szintén növekedés jellemzi;
- a teherszállítás okozta ÜHG-kibocsátás szintén jelentős növekedést mutat.

Szabolcs-Szatmár-Bereg megye vonatkozásában a közlekedés által kibocsátott ÜHG-mennyiség évenkénti bontásban a következőképpen alakult (1. táblázat):

1. táblázat. Szabolcs-Szatmár-Bereg megye közlekedésből származó ÜHG-kibocsátása (t CO₂-egyenérték)

Év	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Átlag
ÜHG-kibocsátás	488 635	447 929	437 711	448 393	481 802	625 016	659 490	512 711

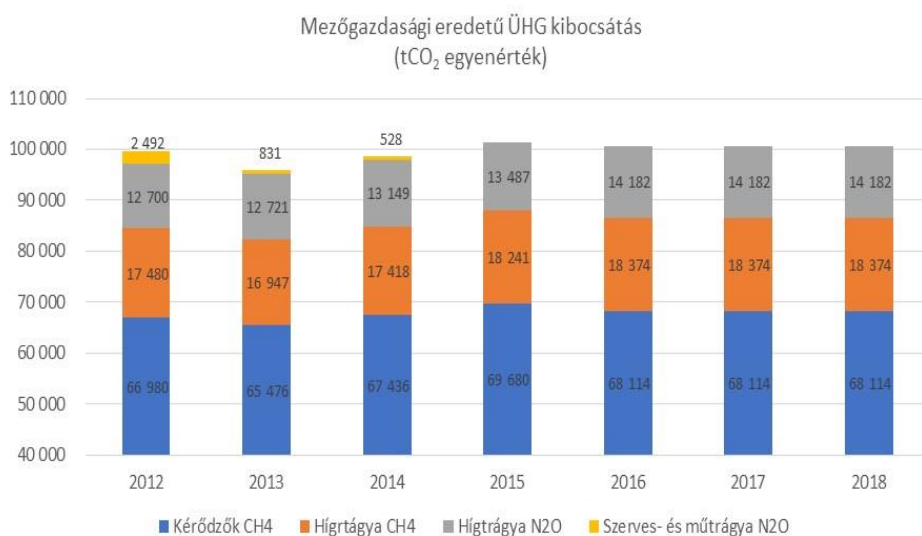
A technológia fejlődése ellenére a közúti közlekedéshez kapcsolódó szén-dioxid-kibocsátás mértéke egyértelműen nőtt a vizsgált időszakban. A megyei szintű értékek csökkenése a jövőben részben a további technológiai fejlődéssel (pl. elektromos autók számának növekedése, közösségi közlekedésben környezetkímélőbb járművek alkalmazása stb.) oldható meg, amely szerint az egyre szigorúbb euronormájú autók és teherautók a jövőben egyre energiahatékonyabbak lesznek, így kevesebb üzemanyagot fognak fogyasztani kilométerenként, és kevesebb szén-dioxidot és egyéb szennyező anyagot bocsátanak ki.

A csökkenést tovább javíthatja az elektromos járművek fokozatos elterjedése, valamint a közösségi közlekedés feltételeinek javulása, a kerékpáros közlekedés – megfelelő infrastrukturális feltételek mellett – erősödése. A kerékpáros közlekedés egyrészt a munkahelyek elérése, másrészt a szabadidő eltöltése (turizmus) kapcsán is tetten érhető. Emiatt a kerékpározás lehetőségeinek javítása fontos társadalompolitikai céllá vált, amelynek ráadásul a környezet- és klímavédelmi aspektusai is jelentősek. Ez a komplex megközelítés számos infrastrukturális fejlesztés megvalósulását eredményezte és eredményezi országszerte és Szabolcs-Szatmár-Bereg megyében is.

A közlekedésben szemléletváltásra van szükség a lakosság közlekedési módját illetően, hiszen a megyei ÜHG-kibocsátás jelentős része ezen a területen realizálódik. Ez döntően a munkahelyek és lakóhelyek területi szétválásának, a közösségi közlekedés területi és infrastrukturális helyzete romlásának, valamint a fogyasztási szokások átalakulásának a következménye is. Így az ÜHG-kibocsátás csökkentése érdekében nem csupán technológiai újításra, hanem a közlekedés szerkezetváltására – mind a személy-, mind az áruszállítás tekintetében –, illetve annak változására, racionalizálására is szükség van. Ez többek között az egyéni közlekedésről (személygépjármű) a közösségi közlekedésre történő áttérés ösztönzését, továbbá az egyéni közlekedés tekintetében a gépjármű-használati szokásokat befolyásoló közlekedési módokat jelenti (pl. kerékpáros közlekedés, közösségi közlekedés, esetleg telekocsi-szolgáltatás igénybevétele), amelyek a fajlagos károsanyag-, ill. ÜHG-kibocsátás szempontjából kedvezőbbnek tekinthetők.

3.4. A mezőgazdasági termelésből származó ÜHG-kibocsátás

A mezőgazdasági szektor ÜHG-kibocsátásának elemzésekor abból a megközelítésből célszerű kiindulni, hogy a mezőgazdasági termelés elsődleges feladata a Föld egyre növekvő lakosságának élelmiszerekkel történő ellátása. A növekvő élelmiszerszükséglet kielégítése a termeléstehnológiák biológiai folyamataiból következően természetes módon növekvő ÜHG-emisszióval is együtt jár. A mezőgazdasági ÜHG-kibocsátás a szerves- és műtrágya felhasználásra, az állattartásra és a mezőgazdasági



5. ábra. Szabolcs-Szatmár-Bereg megye mezőgazdasági eredetű ÜHG-kibocsátása (Forrás: KSH-adatok alapján saját számítás)

technológiák alkalmazására vezethető vissza. A mezőgazdasági szektor összes ÜHG-kibocsátása CO₂-egyenértékben 2012–2018 között az 5. ábrán látható módon alakult.

A CO₂-egyenértékben kifejezett kibocsátás főleg a szarvasmarha-állomány metánkibocsátásából származik, de emellett jelentősnek mondható a hígtrágya-kezelésből származó emisszió is. Mindezekhez képest a szerves- és műtrágya-felhasználás csekély mértékű ÜHG-kibocsátást eredményez. Összességében megállapítható, hogy a megye agrárszektorának ÜHG-kibocsátása éves viszonylatban mintegy 100.000 t CO₂-egyenértéknek felel meg, és nagyon enyhe (1-2%) emelkedést mutat. Ez a mennyiség a fenntartható trágyakezelési és kijuttatási technológiák alkalmazásával csökkenthető.

3.5. A megye ÜHG-nyelése

Magyarország erdőterületeinek mértéke az elmúlt évtizedben folyamatosan növekedett. Szabolcs-Szatmár-Bereg megye erdőterülete 2018-ban mintegy 125.568 ha volt, amely a megye területének 21,3%-a. Ez az arány szinte megegyezik az országos átlaggal (20,9%). A megyei erdőterületek 2018-ban összesen 198.397 tonna széndioxidot kötöttek meg. Ez az érték alapvetően a vizsgált időszakban nem változott. A 2012–2018 közötti időszakra vonatkozó megyei erdőterületek mértéke és az ebből fakadó ÜHG-megkötőképesség (nyelés) értékei a 6. ábrán láthatók.

Megállapítható, hogy a nyelés mértéke a megye teljes ÜHG-kibocsátásának mintegy 10%-át teszi csupán ki, így egyenleg szempontjából Szabolcs-Szatmár-Bereg megye jelenleg még messze áll a karbonsemlegességtől.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Az adatok értékelése és elemzése alapján az alábbi általános megállapításokat és következtetéseket tehetjük meg (7. ábra):

– a megyei ÜHG-kibocsátás jelentős részét (mintegy 55-60%) az energiafelhasználással kapcsolatos kibocsátás eredményezi, amely a vizsgált időszakban növekvő tendenciát mutat;

– a nagyipari kibocsátás a teljes ÜHG-kibocsátás mintegy 5-8%-áért felel, amely a vizsgált időszakban szintén emelkedő tendenciát mutat;

– jelentős kibocsátószektornak tekinthető a közlekedés.

A teljes kibocsátott ÜHG-mennyiség közel egyharmadáért (27-30%) ez a szektor a felelős, amely a vizsgált időszakban szintén emelkedő tendenciájú. A közlekedési szektoron belül a legjelentősebb ÜHG-kibocsátó szegmens az egyéni közlekedés, ezt a teherszállítás, majd a tömegközlekedés (közösségi közlekedés) követi;

– a mezőgazdasági termeléssel összefüggésbe hozható ÜHG-kibocsátás mennyisége az össz mennyiségen belül nem mondható jelentősnek (alig 5-6%). A megye mezőgazdaságának CO₂-egyenértékben kifejezett ÜHG-kibocsátási szerkezeti összetétele a vizsgált időszakban alapvetően nem változott;

– általános megállapításként elmondható, hogy a megyei hulladékgazdálkodás és szennyvízkezelés okozta ÜHG-kibocsátás alig 2% alatti mértékben járul hozzá az ÜHG-kibocsátáshoz;

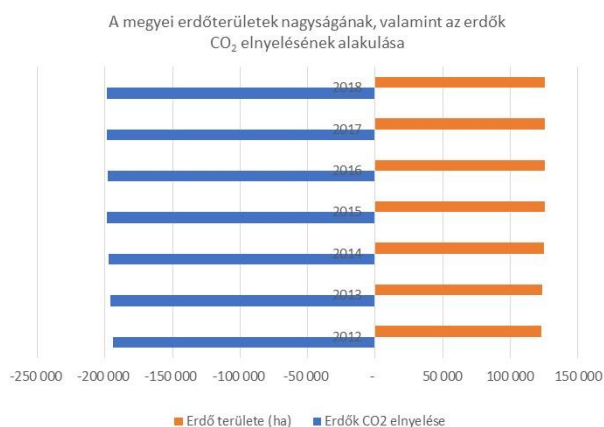
– a szén-dioxid megkötésében az erdőterületek meghatározó jelentőséggel bírnak. A megye vonatkozásában a vizsgált időszakban (2012–2018) az erdőterületek kismértékű növekedése volt megfigyelhető.

Köszönetnyilvánítás

Jelen tanulmány a HUSKROUA/1702 azonosítószámú GeoSES projekt támogatásával készült.

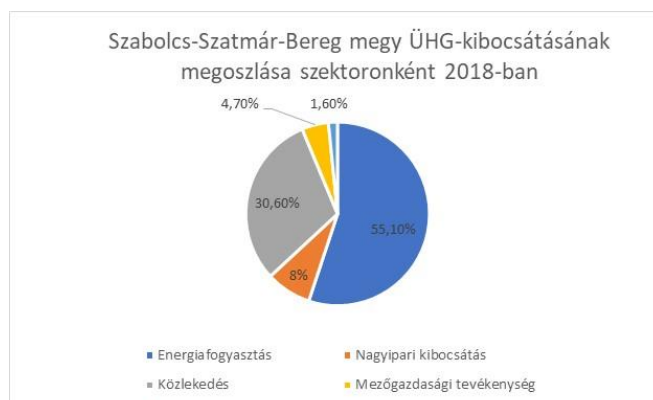
FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [2] GYETVAI G. et al. (2016): Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz egy példatelepülésen. (<https://adoc.pub/kalmazkodas-a-klimavaltozashoz-egy-peldateleplesen.html>)
- [3] Módszertani útmutató megyei klímastratégiák kidolgozásához. Klímabarát Települések Szövetsége
- [1] TAKSZ, L.: Módszertani útmutató megyei klímastratégiák kidolgozásához 2017, MAGYAR FÖLDTANI ÉS GEOFIZIKAI INTÉZET NEMZETI ALKALMAZKODÁSI KÖZPONT
- [4] T. F. STOCKER et al. (2013): CLIMATE CHANGE 2013 – Climate Change 2013 The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. ISBN 978-92-9169-138-8



6. ábra. Szabolcs-Szatmár-Bereg megye szén-dioxid-nyelése

(Forrás: KSH-adatok alapján saját számítás)



7. ábra. Szabolcs-Szatmár-Bereg megye ÜHG-kibocsátásának megoszlása 2018-ban

(Forrás: KSH-adatok alapján saját számítás)

A nedvesíthetőség és a zéta-potenciál közötti kapcsolat kísérleti vizsgálata

Investigation of the relationship between wettability and Zeta potential

Pintér-Móricz Ákos^{1} – Hompoth Szabolcs² – Czagány Máté² – Baumli Péter²*

¹ Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros, Pf. 2., afkpiak@uni-miskolc.hu

² Miskolci Egyetem, Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Nanotechnológiai Kihelyezett Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros, Pf. 2.

Összefoglaló: Az olajkitermelési eljárásoknál a nedvesíthetőségi viszonyok ismerete elengedhetetlen. A szilárd felületen lévő töltések eloszlásáról, az azok közötti kölcsönhatásokról pedig a zéta-potenciál ad információt. Mivel az eltérő nedvesítési viszonyok között eltérő mértékben alakul ki folyadék-/szilárd határfelület, a két mennyiség között kell, hogy legyen kapcsolat. Erről azonban kevés szakirodalmi adat áll rendelkezésre. Kutatásunk célja ezért a nedvesíthetőség és a zéta-potenciál közötti kapcsolat feltárása. Első lépésben az összefüggést fémeken és kerámiákon végzett mérésekkel igazoltuk.

Kulcsszavak: nedvesíthetőség, zéta-potenciál, kerámiák

Abstract: For oil production technologies, knowledge of wettability properties is of utmost importance. Zeta potential provides information about the distribution of the charges on the solid surface and the interaction between them. Since different wettability properties result in different interface extensions, the existence of a relationship between the two quantities can be presumed. However, there are only a few data in the scientific literature. Therefore, the aim of our research work is to explore the relationship between the wettability properties (contact angle) and the zeta-potential. In the first step, the relationship was proven by measurements on metals and ceramics.

Keywords: wettability, zeta potential, ceramics

1. BEVEZETÉS

A zéta-potenciál a szilárd felület és a folyadék közötti potenciálkülönbségként értelmezhető [1] [2] [3] [4] [5]. Amikor az ellenionok koncentrációja a folyékony közegben alacsony, a szilárd anyag felületi potenciálját úgy lehet meghatározni, hogy a telített csoportok töltöttségének jellemzésére a zéta-potenciált mérjük. Más szavakkal a zéta-potenciál abszolút értéke a szilárd anyag felszínén lévő telített csoportok elektrosztatikus vonzását jelenti az oldatban lévő ionokkal szemben. A továbbiakban példáinkat kőzetek esetében ismertetjük, mivel a kőzetek határfelületi jelenségeinek vizsgálatával kapcsolatosan található jelentősebb számú irodalom.

Ezenkívül a zéta-potenciál pozitívan korrelál az elektrosztatikus vonzóerővel. Eközben az elektrosztatikus vonzóerő alapvetően például egy kőzetfelület töltésétől és az oldat ionkoncentrációjától függ [6] [7] [8]. A kőzetfelületen lévő telített csoportok elektrosztatikus vonzóereje a határfelületen lévő ionokkal szemben ellentétes töltéselőjelű, míg az oldatban lévő ionokéval megegyezik. Ezért a felületi telített csoportok növekedése vagy az ionkoncentráció csökkenése fokozza az elektrosztatikus vonzást, ami végül az abszolút zéta-potenciál növekedésében nyilvánul meg, más szóval, ha más tényezők állandóak maradnak, minél nagyobb a zéta-potenciál abszolút értéke, annál erősebb a kőzet és a folyadék között az adhézió, a folyadék annál jobban szétterül a szilárd felületen, azaz a szilárd felület hidrophil jellege erősödik.

Több kísérleti eredmény igazolja, hogy a zéta-potenciál abszolút értéke csökken az idő előrehaladtával, ami azt jelzi, hogy a kőzet felületén elhelyezkedő telített csoportok oldatban lévő molekulákra ható elektrosztatikus ereje az idő előrehaladtával gyengül [9]. A peremszögmérések azonban azt mutatják, hogy a kőzetek egyre hidrophilebbek lesznek az idő előrehaladtával. Ennek fényében tehát más tényezőknek is jelen kell lenniük, amelyek nemcsak ellensúlyozzák a zéta-potenciál csökkenését, hanem fokozzák a kőzet hidrophilitását. Ezért figyelembe kell venni a molekulacsoportok változásának vagy átalakulásának nedvesíthetőségre gyakorolt hatását is.

A C-O és C=O csoportok számának növekedése összefügg a $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ képződésével a kőzetfelületen. A C-O és C=O csoportok az intermolekuláris erőket és a hidrogénkötést képviselik a határfelületen, míg a zéta-potenciál az elektrosztatikus erőt. Ezek a határfelületen lévő erők az oldat molekulák felé vonzóerőt fejtenek ki, ami megkönnyíti az oldat szétterülését a kőzet felszínén.

A homokkő nedvesíthetőségét a felületi funkciócsoportoknak a határfelületen lévő folyadékcsepp molekuláira kifejtett vonzása okozza (töltött és molekuláris csoportok), ami hatással van a felületi feszültségre, a van der Waals-erőkre, az elektrosztatikus erőkre és a hidrogénkötésre, ami makroszkopikusan a nedvesítési szögben nyilvánul meg. Így a kőzet nedvesítési viszonyainak változását komplexen lehet értelmezni a nedvesítési szög vizsgálatával,

röntgendiffrakciós analízissel, zéta-potenciál-mérésekkel, FTIR-analízissel, amely segítséget nyújthat a növelt hatékonyságú olajkihozatali vizsgálatok (EOR) tervezésekor, értelmezésekor.

A szuperkritikus szén-dioxid-víz-kőzet dinamikus reakciókísérletei, a nedvesítésiszög-vizsgálatok, az XRD-analízis, a zéta-potenciál-mérések és az FTIR-eredmények megerősítették, hogy a tömött kőzetek nedvesíthetőségének megváltozását elsősorban egyes molekulacsoportok számának növekedése okozta (C-O és C=O csoportok). A szuperkritikus CO₂-víz-kőzet dinamikus reakció csökkentheti a tömött kőzetek nedvesítési szögét, és fokozhatja annak hidrofilitását az ásványi összetétel megváltoztatásával, de a hatás a reakcióidővel csökken.

A szuperkritikus CO₂-víz-kőzet dinamikus reakció csökkentheti a tömött homokkő zéta-potenciáljának értékét, és gyengítheti az elektrosztatikus erő nedvesíthetőségre gyakorolt hatását. Ez ellentétes azzal, hogy a nedvesítési szög csökken, ami bizonyítja, hogy a felszíni, töltés nélküli csoportok hatása a tömött homokkő nedvesíthetőségére nem elhanyagolható. A szuperkritikus CO₂-víz-kőzet dinamikus reakció növelheti a tömött homokkő felszínén a C-O és a C=O hidrofil csoportok számát, és fokozhatja a töltés nélküli csoportok mikroszkopikus erejét, ami a tömött homokkő jobb nedvesíthetőségét okozza.

Összefoglalva a tömött homokkő nedvesíthetősége a folyadék és a kőzet felszíne között ható mikroszkopikus erők makroszkopikus megjelenési formája. Általában nemcsak egyetlen változó vagy telített csoport hatásmechanizmusát vesszük figyelembe a nedvesíthetőség vizsgálatokor, de a molekuláris csoportok hatását sem lehet figyelmen kívül hagyni a tömött homokkő nedvesíthetőségére nézve. Ez a felismerés nagy jelentőséggel bír a szén-dioxid geológiai megkötésével és a nedvesíthetőség szabályozásával kapcsolatos EOR-technológiák fejlesztését illetően [10].

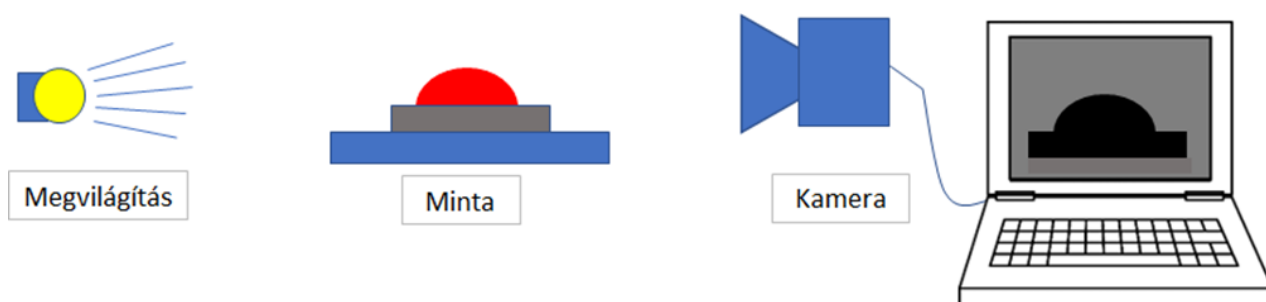
Az irodalomban eddig ehhez hasonló összefüggést nem állapítottak meg. Ugyan több cikk is címében utal arra, hogy a zéta-potenciál és a nedvesítés között kapcsolatot állít fel, de ezen esetekben csak a zéta-potenciál-értékek találhatók meg a publikációkban, nedvesítésiperemszög-adat csak elvéve. Ha mégis megtalálhatóak egy cikkben belül a nedvesítési adatok mellett a zéta-potenciál-adatok is, akkor sem foglalkoznak a közöttük fellelhető összefüggéssel [11]. Jiang és munkatársai [12] az emulziók stabilitását vizsgálják. Megállapítják, hogy a vizsgált emulziók és a bennük diszpergált anyagok közötti nedvesítés fontos az emulzió stabilitása szempontjából, de cikkükben nem tesznek említést egyetlen nedvesítési peremszög értékre sem. Konkrét peremszögértékeket a tökéletes nedvesítés állapotára publikáltak, melyek szerint ez 30 mV zéta-potenciál-érték eredményez [13]. Nishizawa [14] publikált még megbízható peremszög-zéta-potenciál-értékeket. Látható, hogy az irodalomban nem ismert összefüggés vagy kapcsolat a peremszögértékek és a zéta-potenciál között.

Munkánk célja az irodalomban fellelt tudáshiányt pótolni és megtalálni a kapcsolatot a nedvesítési tulajdonságok és az elektrokinetikai tulajdonságok között.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A nedvesítésmérések kivitelezését ún. nyugvócseppmódszerrel végeztük el. A nyugvócseppmódszer lényege, hogy a vizsgálandó folyadék kb. 5 mikroliter térfogatú cseppjét a vizsgálandó anyag szilárd, vízszintes felületére cseppentjük. A folyadék a határfelületi erőknek megfelelően egy gömbsüveg alakot vesz fel.

A nyugvócseppmódszer során a folyadékcsepp egyik oldalát megvilágítottuk, majd a megvilágítással szembeni oldalon nagy sebességű kamerával felvételeket készítettünk a csepp sziluettjéről (1. ábra). A felvételek alapján, KSV szoftver segítségével határoztuk meg a peremszög értékét.



1. ábra. A kísérleti elrendezés sematikus vázlata

A nedvesítésvizsgálatokat Ni-P-oldattal végeztük el, melynek összetételét az 1. táblázatban foglaljuk össze.

1. táblázat. Ni-P fürdők összetétele

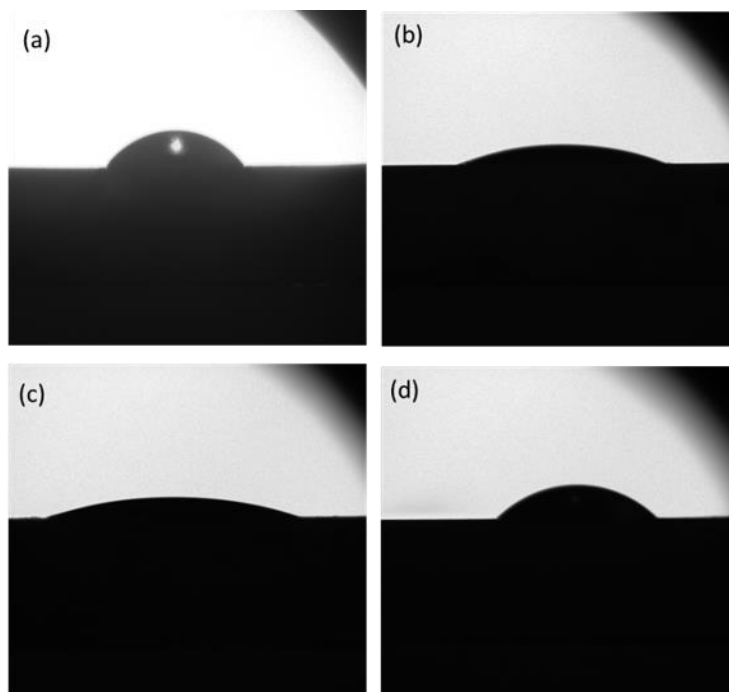
Komponens	Koncentrációk
Nikkel-szulfát (NiSO ₄ ·6H ₂ O)	15 g/l
Na-acetát (CH ₃ COONa·3H ₂ O)	13 g/l
Na-hipofoszfít (NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O)	14 g/l
Tiokarbamid (CH ₄ N ₂ S)	1 mg/l
CTAB	
SDBS	0,1; 0,5; 1 g/l
PVP	

A vizsgálatok elvégzése során felületaktív anyagokat használtunk, így polivinil-pirrolidont (PVP), cetil-trimetil-ammónium-bromidot (CTAB) és Nátrium-dodecil-benzol-szulfonátot (SDBS). A nedvesítésvizsgálathoz szubsztrátként TiC kerámiát használtunk.

A peremszögértékek szerint a következő megállapítások érvényesek:

- $\Theta \geq 90^\circ$: a folyadék nem nedvesíti a szilárd anyagot, az adhéziós energia kisebb a folyadék felületi feszültségénél,
- $\Theta < 90^\circ$: a folyadék nedvesíti a szilárd anyagot; az adhéziós energia a folyadék felületi feszültségénél nagyobb (de kevesebb, mint annak kétszerese)
- $\Theta = 0^\circ$: a folyadék tökéletesen nedvesíti a szilárd anyagot; az adhéziós energia legalább kétszerese a folyadék felületi feszültségének.

A zéta-potenciál-mérést Nano-ZS Zetasizer berendezésen hajtottuk végre (Malvern Panalytical Ltd., Malvern, United Kingdom).

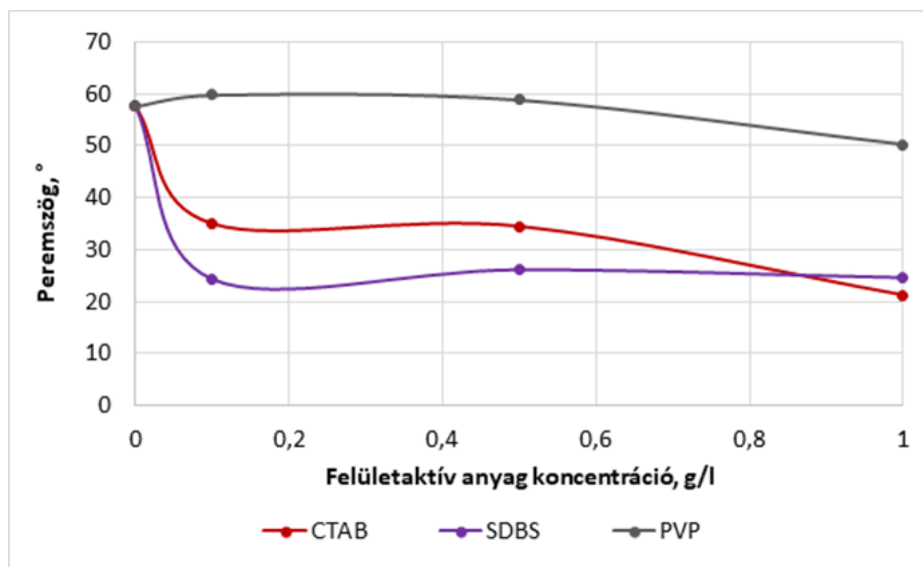


2. ábra. TiC lapka felületén elhelyezkedő (a) felületaktívanyag-mentes Ni-P fürdő, (b) 1 g/l CTAB-t tartalmazó Ni-P fürdő, (c) 1 g/l SDBS-t tartalmazó Ni-P fürdő, (d) 1 g/l PVP-t tartalmazó Ni-P fürdő sziluettje

3. EREDMÉNYEK

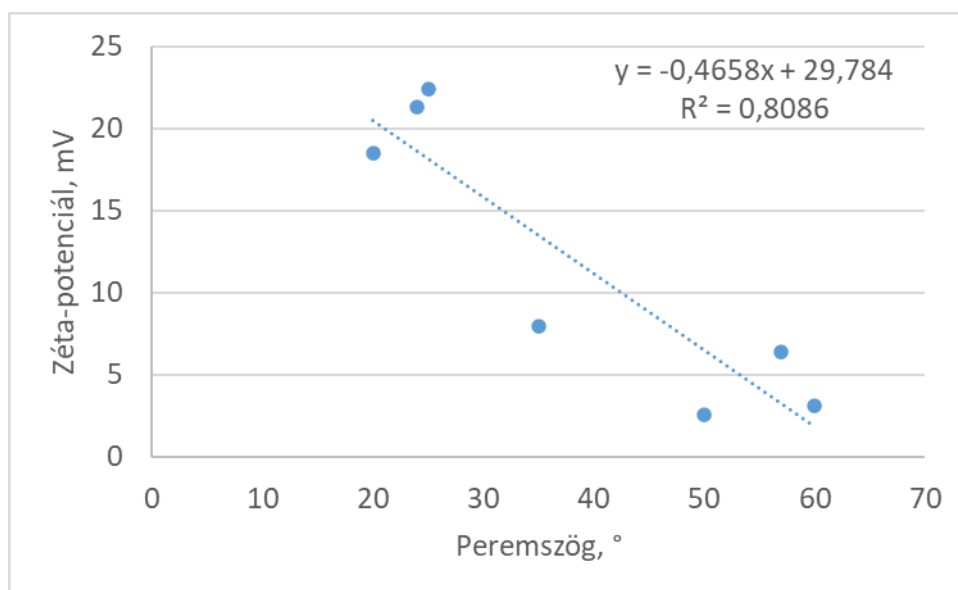
A TiC szubsztrát felületén vizsgálva a vizes oldatok nedvesítési tulajdonságait, a peremszög sziluettejéről készített felvételek a 2. ábrán láthatóak, míg a mért peremszögértékeket a 3. ábrán szemléltetjük. A 3. ábra alapján elmondható, hogy a PVP esetén, a mérési hibahatáron ($\pm 3^\circ$) belül 0,5 g/l koncentrációig a peremszög értéke a felületaktívanyag-mentes oldathoz képest nem változik, majd kismértékű csökkenés figyelhető meg a peremszögértékben, azaz $58^\circ \pm 3^\circ$ értékről a PVP hatására a peremszög $50^\circ \pm 3^\circ$ értékre csökken.

A CTAB és az SDBS alkalmazásával jelentős nedvesedésjavulást sikerült elérni a TiC felületén. A CTAB hatására a Ni-P fürdő $21^\circ \pm 3^\circ$ peremszöget ért el.



3. ábra. Ni-P fürdő peremszöge TiC felületen

A peremszögértékek mellett meghatároztuk a különböző felületaktív anyagokat tartalmazó oldatokban a TiC szemcsék zéta-potenciál-értékét is, melyet a 4. ábrán foglaltunk össze. Látható, hogy a TiC felületén mért peremszög értékek és a TiC szemcséken mérhető zéta-potenciál között kapcsolat áll fenn, a csökkenő peremszög, azaz a javuló nedvesítés hatására a zéta-potenciál értéke növekszik.



4. ábra. A felületaktív anyagot tartalmazó Ni-P oldatok peremszöge és zéta-potenciálja közötti kapcsolat

A zéta-potenciál esetében azt mondhatjuk, hogy a diszperzió (szol) stabil, ha értéke ± 30 mV vagy attól több, azaz abszolút értékben minél nagyobb a zéta-potenciál, annál stabilabb a diszperzió [15]. Továbbá a 0 mV zéta-potenciál-értéket akár (+), akár (-) értékek felől közelítjük meg, a vizsgált szol szétesik, a szemcsék agglomerálódnak. Ezért a peremszöggel való kapcsolatában nem teszünk különbséget, hogy a zéta-potenciál (+) vagy (-) előjelű.

Minél kisebb a peremszögérték, azaz minél jobb a felület nedvesíthetősége, annál nagyobb zéta-potenciál-értékeket kapunk. A mért értékek alapján az is kijelenthető, hogy $\sim 60^\circ$ peremszögérték esetén már 0 mV értékű zéta-potenciált is mérhetünk. A tökéletes nedvesítést jelentő 0° peremszög esetén pedig legkevesebb 30 ± 2 mV zéta-potenciál határozható meg.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkánk során azzal a hipotézissel éltünk, hogy a peremszög és a zéta-potenciál között valamilyen kapcsolatnak kell lennie. A szakirodalom áttanulmányozása során megállapítottuk, hogy eddig nem fogalmaztak meg összefüggést a két mérhető érték között. Hipotézisünk alapja az volt, hogy a jó nedvesítés hatására létrejövő nagy folyadék-/szilárd határfelületen több töltés adszorbeálódhat a szilárd felületen, mint a rossz nedvesítés során kialakuló kisebb határfelületnél. Ezek szerint a változó határfelület változó felületi töltöttséget eredményez, és így változó zéta-potenciál-értéket fogunk megfigyelni. Mérési eredményeink alapján levonható megállapításainkat a következő pontokban foglaljuk össze.

- Nyugvócseppmódszerrel meghatároztuk Ni-P oldatok peremszögértékeit a TiC lapkák felületén, valamint TiC szemcsék felületén Ni-P oldatban megmértük a zéta-potenciál értékét.
- Felületaktív anyag nélkül a Ni-P oldat peremszöge TiC felületén $58^\circ \pm 3^\circ$.
- A felületaktív anyagok hatását megfigyelve megállapítottuk, hogy a PVP felületaktív anyag hatására a peremszög csak kismértékben csökken, abban az esetben, ha a PVP-t legalább 1g/l koncentrációban használjuk.
- CTAB és SDBS hatására jelentősen csökken az oldat peremszöge a TiC felületén, CTAB alkalmazása mellett érhető el a legalacsonyabb peremszög érték Ni-P oldat esetén, azaz $21^\circ \pm 3^\circ$.
- Zéta-potenciál-mérést elvégezve, és a zéta-potenciál-eredményeket a peremszög mérési eredményeivel összevetve a nedvesítés mértéke és a zéta-potenciál közötti kapcsolat állapítható meg. 60° peremszög érték esetén ~ 0 mV értékű zéta-potenciál várható, azaz ha a vizsgált szemcsék peremszöge 60° vagy attól nagyobb, akkor a szolban lévő szemcsék agglomerálódnak.
- Tökéletes nedvesítést jelentő 0° peremszög esetén legkevesebb 30 ± 2 mV zéta-potenciál-érték várható, amely érték stabil szolok kialakulását eredményezi.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyságnövelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének részeként – a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával valósul meg.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] H. Tian, M. Wang, "Electrokinetic mechanism of wettability alteration at oilwater-rock interface," *Surface Science Reports*, Vol. 72, Issue 6, pp. 369–391, 2017.
- [2] S. Pamucku, R.A. Shrestha, A.B. Ribeiro, E.P. Mateus, "Electrically induced displacement transport of immiscible oil in saline sediments," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 313, pp. 185–192, 2016.
- [3] H.G. Ozcelik, M. Barisik, "Electric charge of nanopatterned silica surfaces," *Physical Chemistry Chemistry Physics*, Vol. 21, Issue 14, pp. 7576–7587, 2019.
- [4] M. Nazarova, P. Bouriat, P. Creux, "Electrical double-layer expansion impact on the oil-quartz adhesion for high- and low-salinity brines," *Energy Fuels*, Vol. 32, Issue 7, pp. 7319–7325, 2018.
- [5] R. Mészáros, A. Jobbik, G. Varga, S. Bárány, "Electrosurface properties of Na-bentonite particles in electrolytes and surfactants solution," *Applied Clay Science*, Vol. 178., 2019.
- [6] Z. Cheng, Z. Ning, S. Dai, "The electroviscous flow of non-Newtonian fluids in microtubes and implications for nonlinear flow in porous media," *Journal of Hydrology*, Vol. 590, 2020.
- [7] Z. Cheng, Z. Ning, D.-H. Kang, "Lattice Boltzmann simulation of water flow through rough nanopores," *Chemical Engineering Science*, Vol. 236, 2021.
- [8] Z. Cheng, Z. Ning, W. Zhang, S. Ke, "Theoretical investigation of electroviscous flows in hydrophilic slit nanopores: effects of ion concentration and pore size," *Physics of Fluids*, Vol. 32, Issue 2, 2020.
- [9] Z. Jia, Z. Ning, X. Gao, W. Zhang, Z. Cheng, "Experimental investigation on molecular-scale mechanism of wettability alteration induced by supercritical carbon dioxide-water-rock reaction," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 205, 108798, 2021.

- [10] Z. Hua, M. Li, X. Ni, H. Wang, Z. Yang, M. Lin, "Effect of injection brine composition on wettability and oil recovery in sandstone reservoirs," *Fuel*, Vol. 182, pp. 687–695, 2021.
- [11] G. Bassioni, S.T. Taqvi, "Wettability Studies Using Zeta Potential Measurements," *Journal of Chemistry*, Article ID 743179, 2015.
- [12] T. Jiang, G. J. Hirasaki, C. A. Miller, "Characterization of Kaolinite ζ Potential for Interpretation of Wettability Alteration in Diluted Bitumen Emulsion Separation," *Energy Fuels*, Vol. 24, Issue 4, pp. 2350–2360, 2010.
- [13] S.T. Taqvi, A. Almansoori, G. Bassioni, "Understanding the Role of Asphaltene in Wettability Alteration Using ζ Potential Measurements," *Energy Fuels*, Vol. 30, Issue 3, pp. 1927–1932, 2016.
- [14] K. Nishizawa, M. Toriyama, T. Suzuki, Y. Kawamoto, Y. Yokogawa, H. Nagae, "Effects of the Surface Wettability and Zeta Potential of Bioceramics on the Adhesiveness of Anchorage-Dependent Animal Cells," *Journal of Fermentation And Bioengineering*, Vol. 75, Issue 6, pp. 435–437, 1993.
- [15] J. Man, S. Zhang, J. Li, B. Zhao, Y. Chen, "Effects of electrolyte pH on morphologies and mechanical properties of α -Al₂O₃/Ni composite coatings and role of zeta potentials in co-deposition process," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 249, pp. 118–124., 2014

Kőzetfizikai modellek az akusztikus terjedési sebesség és a porozitás nyomásfüggésének leírására

Rock physical models to describe the pressure dependence of acoustic propagation velocity and porosity

Somogyiné Molnár Judit

Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros, gfmj@uni-miskolc.hu

Összefoglaló: A cikkben kőzetfizikai modelleket mutatok be az akusztikus hullámsebesség és a teljes porozitás nyomásfüggésének leírására. A modellek alapja, hogy a nyomás növekedésével a kőzet egységnyi térfogatában lévő mikrorepedések bezáródnak, így növekvő terjedési sebesség, csökkenő másodlagos porozitás és ennek eredményeképpen csökkenő teljes porozitás mérhető. A kvantitatív kőzetfizikai modellek nem egyszerű görbeillesztésen, regresszió alapulnak, hanem háromparaméteres exponenciális egyenletekkel adnak fizikai magyarázatot a nyomásfüggés jelenségére. A modelleket laboratóriumban, a nyomás függvényében mért longitudinális hullámsebesség és porozitás adatsorokon teszteltem. Az együttes inverziós adatfeldolgozás során számított adatok megfelelően illeszkedtek a mért adatokhoz, ami alátámasztja, hogy a javasolt kőzetfizikai modellek jól működnek a gyakorlatban.

Kulcsszavak: nyomás, hullámsebesség, porozitás, kőzetfizikai modell, együttes inverziós eljárás

Abstract: In this paper rock physical models to describe the pressure dependence of acoustic wave velocity and total porosity are presented. The basis of the models is that microcracks in a unit volume of rocks are closing with increasing pressure, thus increasing propagation velocity, decreasing secondary porosity and as a result, decreasing total porosity can be measured. The quantitative rock physical models are not based on simple curve fitting, regression, but provide physical explanation of the phenomena of pressure dependence with three-parameter exponential equations. The models were tested on acoustic longitudinal wave velocity and porosity data sets measured in laboratory as a function of pressure. The calculated data obtained by quality checked joint inversion data processing matched accurately the measured data, which confirms that the suggested petrophysical models perform well in practice.

Keywords: pressure, wave velocity, porosity, rock physical model, joint inversion method

1. BEVEZETÉS

A szénhidrogének iránti növekvő kereslet és az ismert szénhidrogénmezők jövőbeli kimerülése miatt egyre nagyobb igény mutatkozik a kitermeléshez kapcsolódó kőzetfizikai paraméterek pontosabb meghatározására nem konvencionális körülmények között is. A geofizika szakterülete többféle módszerrel rendelkezik a szükséges paraméterek, például az akusztikus hullámsebességek, porozitás, permeabilitás vagy a rugalmassági modulusok meghatározására. Közismert, hogy a kőzetekben terjedő akusztikus hullám sebessége jelentősen függ a kőzetre ható nyomástól, amely befolyásolja a kőzet mechanikai, transzport és rugalmas tulajdonságait, mint például a porozitást és a rugalmassági modulusokat is. A szeizmikus, akusztikus mélyfúrési adatok értelmezéséhez, valamint laboratóriumi mérési adatok in situ paraméterekhez történő összehasonlításához elengedhetetlen megérteni, hogy a nyomás milyen hatással van e paraméterekre.

Az akusztikus hullámsebesség-nyomás kapcsolatának leírására többféle elképzelés létezik. A modellek leggyakrabban azon a két jelenségen alapulnak, hogy a kőzetre ható nyomás növekedésével a kőzetben lévő mikrorepedések bezáródnak [1], vagy a pórusok záródnak [2], ami a pórustérfogat csökkenését eredményezi. Általános megfigyelés, hogy a sebesség és a nyomás közötti kapcsolat a terhelés kezdeti szakaszában nemlineáris és leggyakrabban exponenciális függvénnyel írható le [3] [4]. A szakirodalomban számos kvalitatív modell található [5] [6] [7] [8] [9] az akusztikus hullámsebesség nyomásfüggésének leírására, de ezek az empirikus modellek nem magyarázzák meg a folyamat fizikai jelentését, csak a mért adatokra illesztett regressziós függvényeket adják meg.

Számos geofizikai tanulmány foglalkozik a porozitás meghatározásával és nyomásfüggésével, hiszen ez egy kulcsparaméter a szénhidrogén- és vízkutatásoknál. A kőzet porozitását általában laboratóriumban méri, de természetesen ezek az eredmények eltérhetnek az in situ értékektől, hiszen terepen a korlátozott lehetőségek, a jól ellenőrzött körülmények hiánya miatt nem lehet megfelelő eredményeket kapni. A végső célt egy in situ adatokon alkalmazható porozitásbecslési módszer használata jelentené. Hasonlóan a sebességhez a nyomásnövekedés hatására bekövetkező porozitásváltozás leírására is empirikus összefüggéseket találhatunk a szakirodalomban [7] [10] [11] [12] [13], melyek csak a legjobban illeszkedő görbék regressziós paramétereit adják meg. Ezen összefüggések sem kvantitatív kőzetfizikai modellek, a paraméterek közötti fizikai kapcsolatokat nem írják le. Laboratóriumi mérések megfelelő

értelmezéséhez kvantitatív modellekre van szükség, amelyek a nyomásfüggés mechanizmusának fizikai magyarázatát is megadják. Ebben a cikkben új, a nyomásfüggés fizikai jelenségét is leíró kőzetzfizikai modelleket mutatok be, amelyek megadják az akusztikus hullámsebesség és a teljes porozitás nyomásfüggését.

2. A TERJEDÉSI SEBESSÉG NYOMÁSFÜGGÉSÉT LEÍRÓ MODELL

A kőzetek nyomásra (amely közvetlen összefüggésben van a kőzetre ható feszültséggel) adott válasza a mikrostruktúrájuktól, az ásványos összetételüktől és a porozitásuktól függ, amely a bennük terjedő rugalmas hullám sebességének nyomásfüggését is okozza. Walsh és Brace [1] elképzelése alapján feltételezzük, hogy a longitudinális (P) hullám terjedési sebességének nyomásfüggését meghatározó fő tényező a mikrorepedések záródása. A növekvő nyomással bezáródnak a mikrorepedések, javul a szemcsék kontaktusa, így az akusztikus hullámok gyorsabban tudnak terjedni a kőzetben. Emiatt vezessük be az N paramétert, mint a kőzetek egységnyi térfogatában lévő mikrorepedések számát. A fent említett jelenséget az alábbi differenciálegyenlettel lehet leírni

$$dN = -\lambda N d\sigma, \quad (1)$$

ahol dN a mikrorepedések számának változása egységi kőzettérfogatban, $d\sigma$ a nyomásváltozás és a λ kőzetzfizikai paraméter a terjedési sebesség nyomásérzékenysége [14]. A negatív előjel azt jelenti, hogy a nyomás növekedésével a mikrorepedések száma csökken. A fenti egyenlet megoldása

$$N = N_0 e^{-\lambda\sigma}, \quad (2)$$

ahol N_0 a (másodlagos porozitáshoz kapcsolódó) mikrorepedések száma nyomásmentes állapotban ($\sigma=0$). Lineáris összefüggést feltételezve a longitudinális hullám sebességének végtelenül kicsiny változása ($d\alpha$) és a mikrorepedések számának változása között egy második differenciálegyenlet is megfogalmazható

$$d\alpha = -\kappa dN, \quad (3)$$

ahol κ egy új anyagjellemző arányossági tényező. A negatív előjel azt jelenti, hogy a terjedési sebesség a mikrorepedések számának csökkenésével növekszik. Az (1)-(3) egyenleteket összevonva az alábbi egyenletre juthatunk

$$d\alpha = \kappa \lambda N_0 e^{-\lambda\sigma} d\sigma. \quad (4)$$

A fenti egyenlet megoldása

$$\alpha = K - \kappa N_0 e^{-\lambda\sigma}, \quad (5)$$

ahol K integrációs állandó. Nyomásmentes állapotban ($\sigma=0$) az α_0 terjedési sebesség mérhető, így K meghatározható az (5) egyenletből: $\alpha_0 = K - \kappa N_0$. Bevezetve a $\Delta\alpha_0 = \kappa N_0$ jelölést végül az alábbi modellegyenletet kapjuk

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha_0 (1 - e^{-\lambda\sigma}), \quad (6)$$

melyben három modellparaméter van: α_0 a longitudinális hullámsebesség nyomásmentes állapotban, $\Delta\alpha_0$ a sebességcsökkenés (a sebességkülönbség a nyomásmentes állapot és a maximális nyomás között, ahol minden mikrorepedés zárva van), λ pedig a már említett kőzetzfizikai paraméter, a terjedési sebesség nyomásérzékenysége. A (6) egyenlet alapján könnyen belátható, hogy a sebesség a nyomás növekedésével α_0 -ról (nyomásmentes állapotról) növekszik egy maximális $\alpha_{\max} = \alpha_0 + \Delta\alpha_0$ értékre, hiszen nagy nyomás mellett minden mikrorepedés zárva van. Tehát $\Delta\alpha_0$ tekinthető a kőzetben nyomásmentes állapotban lévő mikrorepedések miatt bekövetkező sebességcsökkenésnek [14]. A nagy nyomások tartományában a kritikus nyomás elérésekor a reverzibilis tartományt túllépve új mikrorepedéseket hozunk létre a kőzetben, így a sebesség csökkenése figyelhető meg. A nyomás további növelése a minta tönkremeneteléhez vezethet. Fontos megjegyezni, hogy a fenti modell csak a reverzibilis tartományban érvényes.

3. A POROZITÁS NYOMÁSFÜGGÉSÉT LEÍRÓ MODELL

Két különböző típusú porozitást lehet megkülönböztetni. A porustérfogat keletkezési ideje alapján beszélhetünk elsődleges porozitásról (ϕ_1), amely a kőzet diagenézise során képződik, valamint másodlagos porozitásról (ϕ_2), amelyet később a kőzetben bekövetkező fizikai és/vagy kémiai folyamatok okoznak. Az elsődleges porozitáshoz általában a gömb alakú pórusokat kötjük, míg a másodlagos porozitás többnyire mikrorepedésekből vagy oldott üregekből áll. A cikkben azt feltételezem, hogy a másodlagos porozitást a kőzetben lévő mikrorepedések adják. A teljes porozitás (ϕ_t) tehát

$$\phi_t = \phi_1 + \phi_2. \quad (7)$$

A sebességmodellben azt feltételeztem, hogy a mikrorepedések a terhelés vagy nyomás növekedésével bezáródnak. Az előzőekben bemutatott analógia alapján felírható egy olyan differenciálegyenlet is, amely leírja azt a jelenséget, hogy a másodlagos porozitás a nyomás növekedésével csökken, hiszen a mikrorepedések bezáródnak

$$d\phi_2 = -\lambda \phi_2 d\sigma, \quad (8)$$

ahol λ a sebességmodellben bevezetett kőzetzfizikai paraméter. Az egyenlet megoldása

$$\phi_2 = \phi_2^{(0)} e^{-\lambda\sigma}, \quad (9)$$

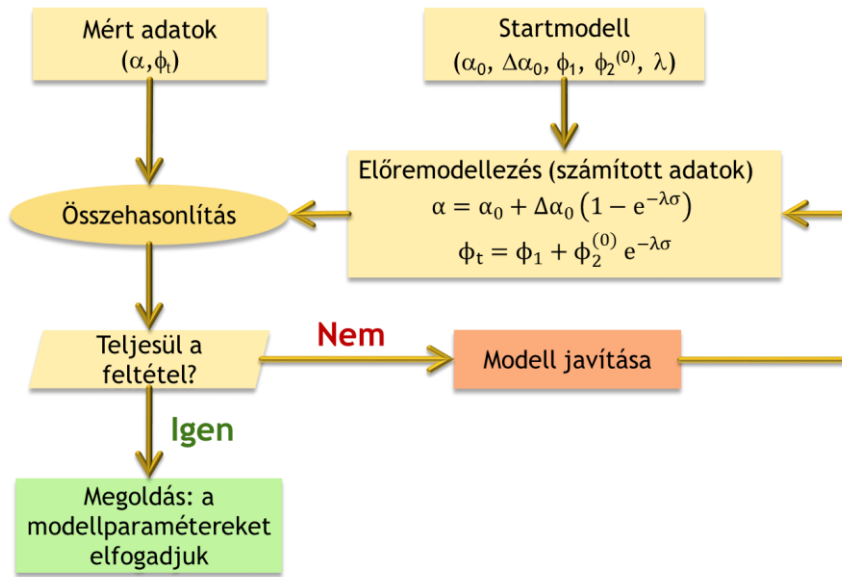
ahol $\phi_2^{(0)}$ a másodlagos porozitás nyomásmentes állapotban. A (9) egyenletet behelyettesítve a (7) egyenletbe megkapjuk a teljes porozitás nyomásfüggését

$$\phi_t = \phi_1 + \phi_2^{(0)} e^{-\lambda\sigma}. \quad (10)$$

Az egyenlet alapján könnyen belátható, hogy a teljes porozitás nagy nyomás esetén az elsődleges porozitáshoz tart, és leolvasható a három modellparaméter is: ϕ_1 az elsődleges porozitás, $\phi_2^{(0)}$ a másodlagos porozitás nyomásmentes állapotban és a λ közetfizikai paraméter.

4. EGYÜTTES INVERZIÓS ADATFELDOLGOZÁS

A laboratóriumban kőzetmintákon mért sebesség-, valamint porozitásnyomás-adatrendszereket együttes inverziós eljárással egyszerre is fel lehet dolgozni. Együttes inverziós eljárás csak akkor alkalmazható, ha legalább egy közös paraméter összekapcsolja az adatrendszereket. Mindkét modellegyenletnek – (6) és (10) egyenletek – része a λ közetfizikai paraméter, így jelen esetben ez lesz a közös paraméter. Az együttes inverziós eljárással a két modellegyenletben lévő öt modellparamétert ($\alpha_0, \Delta\alpha_0, \lambda, \phi_1, \phi_2^{(0)}$) tudjuk meghatározni. Mivel az adatok alacsony zajjal terheltek, és az inverz probléma túlhatározott (az adatok száma nagyobb, mint a modellparaméterek száma), a Gauss-féle legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztam. Az inverziós eljárás folyamatábráját az 1. ábrán láthatjuk.



1. ábra. Az együttes inverziós eljárás folyamatábrája

Először a mért adatok alapján definiálni kell a kezdő vagy startmodellt. Az első iterációban előre modellezés történik, amely azt jelenti, hogy a startmodell paramétereit behelyettesítjük a paraméterek közötti fizikai kapcsolatot leíró modell- vagy válasz egyenletekbe, így elméleti vagy számított sebesség- és porozitásadatokat kapunk. Majd a számított adatokat összehasonlítjuk a mért adatokkal. Ekkor kerül meghatározásra az inverziós becslés adatillesztésének pontosságát jellemző relatív adattérbeli távolság (D), amely a k -adik nyomásszinten mért ($d_k^{(m)}$) és számított ($d_k^{(sz)}$) adatok eltérésének, a mért adatokkal normált négyzetes középértéke (C a mért adatok száma)

$$D = \sqrt{\frac{1}{C} \sum_{k=1}^C \left(\frac{d_k^{(m)} - d_k^{(sz)}}{d_k^{(m)}} \right)^2} \cdot 100 [\%]. \quad (11)$$

Ez a paraméter tehát az inverziós eljárás pontosságát jellemzi. Ha az adattérbeli távolság nagy, akkor a modellparamétereket megváltoztatva az elméleti adatokat újra kell számítani. Ezt addig szükséges folytatni, amíg az adattávolság megfelelően kicsi nem lesz, ez lesz a leállási vagy stop kritérium. Stop kritériumnak tekinthetjük az iterációs lépések számának megválasztását is. Jelen esetben ezt választottam, és 50 iterációt állítottam be, mert 50 iteráció után már konvergens volt a módszer. Mindkét esetben az utolsó iterációs lépésben használt modellparaméterek tekinthetők a probléma megoldásának. A Menke [15] által javasolt módszer szerint a modellparaméterek becslési hibái (σ_{m_i}) is meghatározhatók. A becslési hibák négyzetét a paramétertérbeli kovarianciamátrix ($cov(m)$) főátlója alkotja, így

$$\sigma_{m_i} = \sqrt{cov(m)_{MM}}, \quad (12)$$

ahol M a modellparaméterek száma, jelen esetben $M=5$.

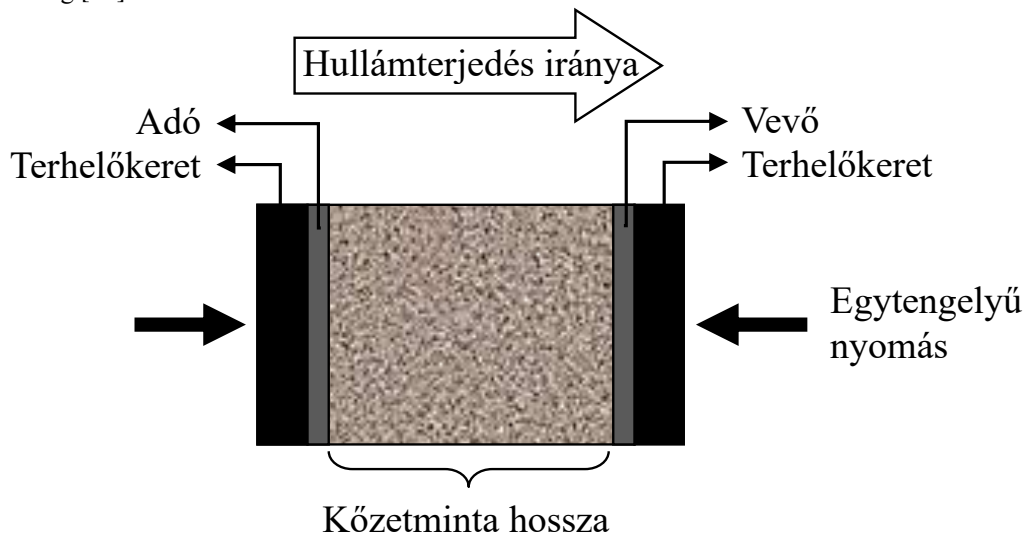
Az inverzióval becsült modellparaméterek megbízhatóságát a modellparaméterek korrelációs mátrixának ($corr(m)$) együtthatói segítségével jellemezhetjük. A korrelációs mátrixot egyetlen 0-1 tartományba eső skalárral, az úgynevezett átlagkorrelációval (S) is megadhatjuk [15]

$$S = \sqrt{\frac{1}{M(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (\text{corr}(m)_{ij} - \delta_{ij})^2}, \quad (13)$$

ahol δ a Kronecker-delta szimbólumot jelöli (mely $i=j$ esetén 1, egyébként 0). Általánosságban elmondható, hogy az alacsony, 0,4 alatti átlagkorreláció megbízható becslést jelent.

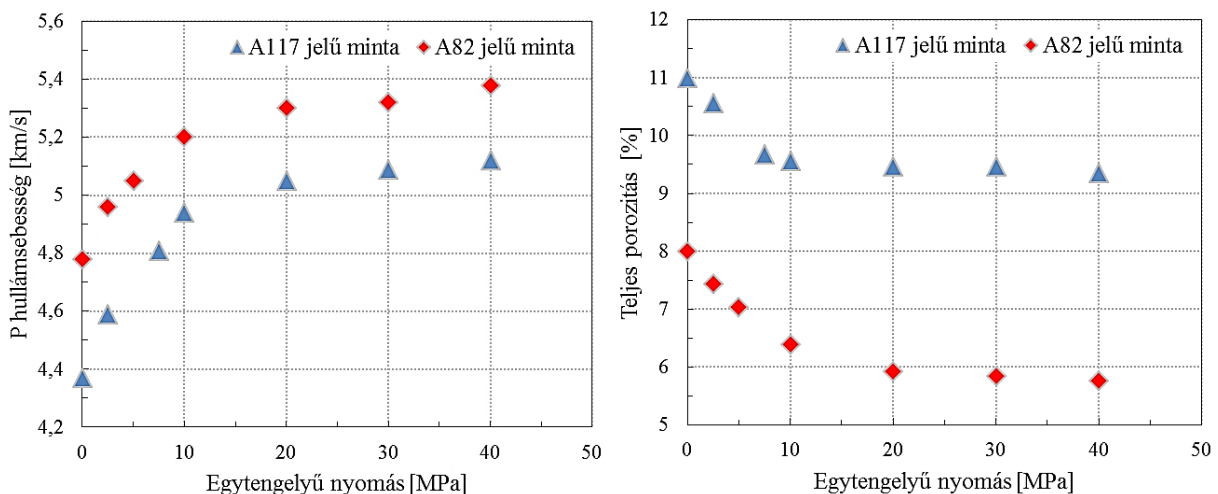
5. A MODELLEK TESZTELÉSE LABORATÓRIUMBAN MÉRT ADATRENDSZEREKEN

A közt fizikai modelleket a szakirodalomban Gomez et al. [16] által publikált adatrendszeren teszteltem. A longitudinális hullámsebességet az impulzusátviteli módszer segítségével mérték 1 MHz frekvencián. A mérések során egy piezoelektromos adó-vevő pár közé helyezték a kőzetmintát, és megmérték a kibocsátott impulzus terjedési idejét a kőzetmintában, majd a minta hossza alapján kiszámították a terjedési sebességet (2. ábra). A sebességmérés hibáját 1% körülire adták meg [16].



2. ábr.: Az impulzusátviteli módszer illusztrálása

Gomez et al. [16] számos mintára közli a mért adatokat, melyekből kettőt választottam ki, az A82 és A117 jelű mintákat. Mindkét minta oligocén fontainebleau-i homokkő 8 és 11%-os porozitással. A minták mért P hullámsebesség- és teljes porozitásadatai az egytengelyű nyomás függvényében a 3. ábrán láthatóak.



3. ábra. Gomez et al. által mért longitudinális hullámsebesség/teljes porozitásnyomás adatok [16]

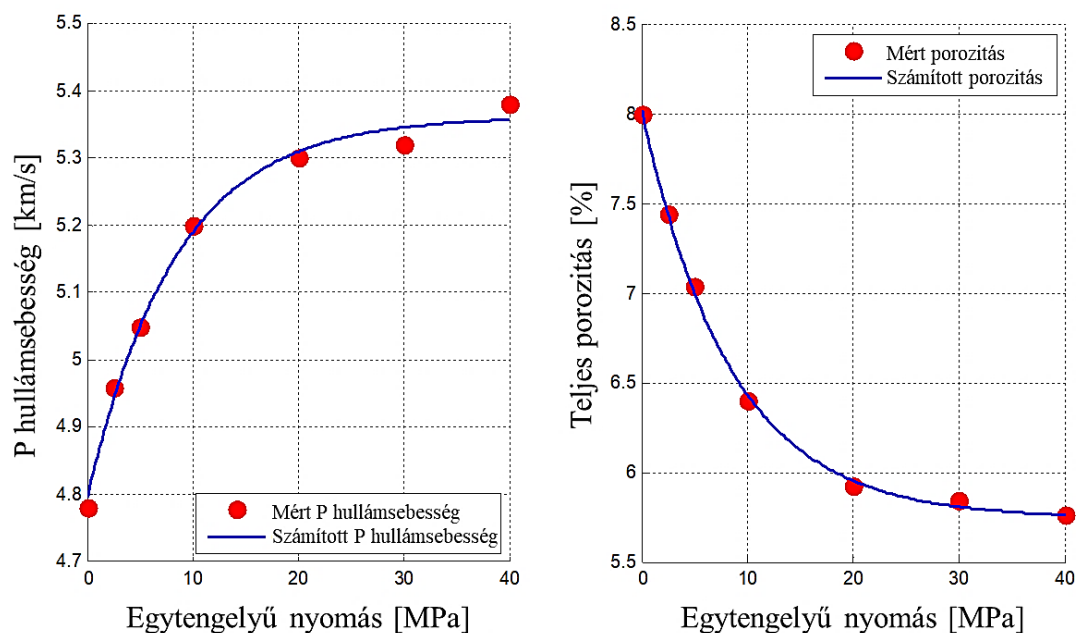
A mérési adatok azt mutatják, hogy a sebesség először nemlineárisan növekszik a nyomás növekedésével, mivel ekkor a mintában sok nyitott mikrorepedés van. Nagyobb nyomástartományban a sebességnövekedés növekvő nyomás

mellett mérsékeltté válik, ami a kőzetmintában lévő mikrorepedések záródásának, számuk csökkenésének tudható be. Látható, hogy a teljes porozitás csökken a nyomás növekedésével, és egy határértékhez tart. Ez a határ az elsődleges porozitás, amely a terhelés során nem záródik be.

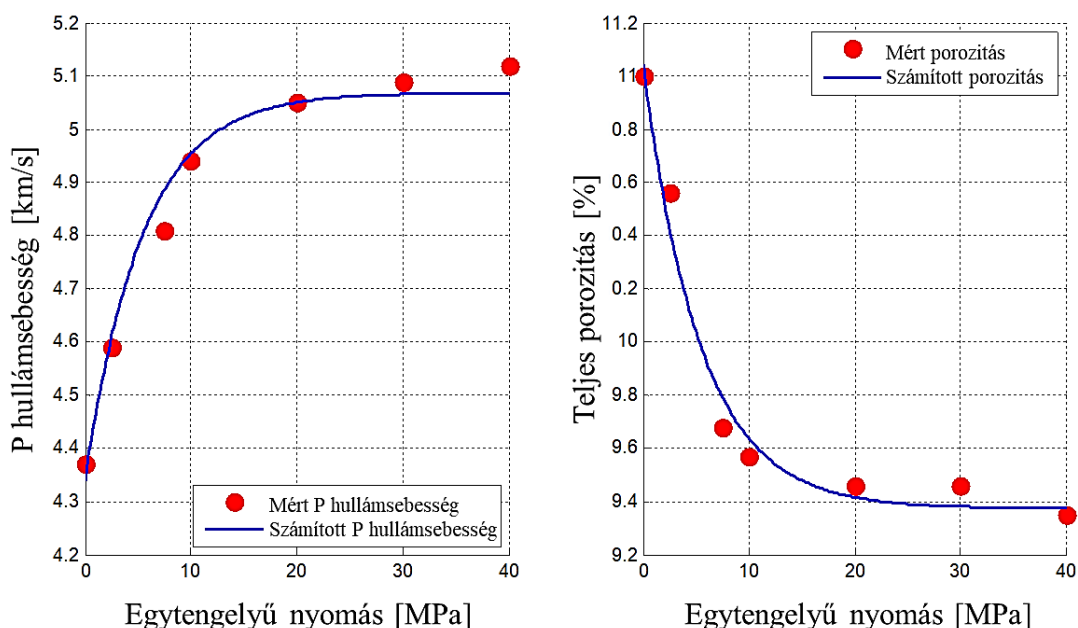
A sebesség- és porozitásadatok feldolgozása a korábban bemutatott együttes inverziós eljárással történt. A becült modellparamétereket a becslési hibáikkal együtt, valamint a kapcsolódó (az utolsó iterációs lépésben) számított relatív adattérbeli távolságokat és átlagkorrelációkat az 1. táblázat foglalja össze. A becült modellparamétereket behelyettesítve a (6) és (10) modellegyenletekbe bármely nyomáson ki tudjuk számítani a longitudinális hullámsebességet és a teljes porozitást. Az így kapott függvényeket a 4–5. ábrákon láthatjuk.

1. táblázat. Az együttes inverzióval becült modellparaméterek és becslési hibáik, valamint a relatív adattérbeli távolság és átlagkorreláció értékei

Minta	α_0 (km/s)	$\Delta\alpha_0$ (km/s)	λ (1/MPa)	ϕ_1 (%)	$\phi_2^{(0)}$ (%)	D (%)	S (-)
A82	4,79 ($\pm 0,02$)	0,57 ($\pm 0,02$)	0,119 ($\pm 0,004$)	5,75 ($\pm 0,02$)	2,27 ($\pm 0,03$)	0,38	0,39
A117	4,34 ($\pm 0,04$)	0,73 ($\pm 0,05$)	0,184 ($\pm 0,022$)	9,38 ($\pm 0,05$)	1,67 ($\pm 0,09$)	1,82	0,38



4. ábra. Az A82 jelű kőzetmintán mért és az együttes inverzióval számított P hullámsebesség-nyomás, illetve teljes porozitásnyomás-függvény



5. ábr.: Az A117 jelű kőzetmintán mért és az együttes inverzióval számított P hullámsebesség-nyomás, illetve teljes porozitásnyomás-függvény

A folytonos vonalak a számított P hullámsebesség/teljes porozitásnyomás-függvényeket, míg a szimbólumok a mért adatokat jelölik. Látható, hogy a számított függvények jól illeszkednek a mért adatokhoz, ami bizonyítja, hogy a kőzetfizikai modellek jól működnek a gyakorlatban. A relatív adattérbeli távolság mindkét esetben 2% alatti, amely megerősíti az inverziós becslés pontosságát. Az átlagkorreláció mindkét esetben 0,4 alatti volt, tehát a paraméterek alacsony korrelációs kapcsolatban vannak egymással, így az inverziós eredmények megbízhatónak tekinthetők.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben Walsh és Brace [1] elméletén alapuló, a longitudinális hullámsebesség és a teljes porozitás nyomásfüggését leíró kőzetfizikai modelleket mutattam be. A modellek előnye, hogy nem egyszerű görbeillesztésen, regresszió alapulnak, hanem háromparaméteres exponenciális egyenletekkel adnak fizikai magyarázatot a folyamatra. A reverzibilis tartományban érvényes modellek megalkotásánál abból az alapfeltevésből indultam ki, hogy növekvő nyomás mellett a kőzetmintában lévő mikorepedések záródnak. Így a terjedési sebesség a nyomás növekedésével növekszik, míg a teljes porozitás csökken (mivel a mikorepedésekhez köthető másodlagos porozitás csökken). E fizikai elvből kiindulva állítottam fel a jelenségeket leíró differenciálegyenleteket, melyek megoldásával könnyen értelmezhető formulákat vezettem le. Szakirodalomban publikált, növekvő nyomás mellett homokkő kőzetmintákon mért longitudinális hullámsebesség és porozitás adatrendszeremmel teszteltem a modelleket. A modellegyenletekben szereplő modellparamétereket együttes inverziós eljárással határoztam meg. A paraméterek ismeretében, a kőzetfizikai modellek alapján számított adatokat a mérési adatokkal összevetve jó egyezést találtam, amely bizonyítja a kőzetfizikai modellek pontosságát és alkalmazhatóságát.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] J. B. Walsh and W. F. Brace, "A fracture criterion for brittle anisotropic rock," *J. Geophys. Res.*, kötet 69, pp. 3449–3456, 1964.
- [2] F. Birch, "The velocity of compression waves in rocks to 10 kilobars, Part 1.," *J. Geophys. Res.*, kötet 65, pp. 1083–1102, 1960.
- [3] G. Yu, K. Vozoff and D. W. Durney, "The influence of confining pressure and water saturation on dynamic elastic properties of some Permian coals," *Geophysics*, kötet 58, szám 1, pp. 30–38, 1993.
- [4] A. I. Best, "The effect of pressure on ultrasonic velocity and attenuation in near-surface sedimentary rocks," *Geophys. Prospect.*, kötet 45, pp. 345–364, 1997.
- [5] W. W. Wepfer and N. I. Christensen, "A seismic velocity-confining pressure relation, with applications," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, kötet 28, pp. 451–456, 1991.
- [6] Q. Wang, S. C. Ji, M. H. Salisbury, M. B. Pan, B. Xia and Z. Q. Xu, "Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie Sulu orogenic belt: Implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections," *Tectonophysics*, kötet 398, pp. 67–99, 2005

- [7] D. Eberhart-Phillips, D. H. Han, and M. D. Zoback, "Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone," *Geophysics*, kötet 54, pp. 82–89, 1989.
- [8] N. Sengun, R. Altindag, S. Demirdag, and H. Yavuz, "P-wave velocity and Schmidt rebound hardness value of rocks under uniaxial compressional loading," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, kötet 48, pp. 693–696, 2011.
- [9] S. Ji, Q. Wang, D. Marcotte, M. H. Salisbury, and Z. Xu, "P wave velocities, anisotropy and hysteresis in ultrahigh-pressure metamorphic rocks as a function of confining pressure," *J. Geophys. Res.*, kötet 112, B09204, 2007.
- [10] D. W. Rhett, and L. W. Teufel, "Effect of reservoir stress path on compressibility and permeability of sandstones," SPE Ann. Technical Conf. and Exhibition, Washington, D.C., October 1992. Paper SPE-24756-MS.
- [11] R. W. Zimmerman, *Compressibility of sandstones*, Developments in Petroleum Science, New York: Elsevier, 1991.
- [12] G. Han and M. B. Dusseault, "Description of fluid flow around wellbore with stress-dependent porosity and permeability," *J. Pet. Sci. Eng.*, kötet 40, pp. 1–16, 2003.
- [13] M. Saul, D. Lumley and J. Shragge, "Modeling the pressure sensitivity of uncemented sediments using a modified grain contact theory: Incorporating grain relaxation and porosity effects," *Geophysics*, kötet 78, szám 5, pp. D327–D338, 2013.
- [14] J. Somogyiné Molnár, „Rugalmas hullámok terjedési jellemzőinek nyomásfüggése – új közetfizikai modellek,” Miskolci Egyetem, PhD értekezés, 2013.
- [15] W. Menke, *Geophysical data analysis – Discrete inverse theory*, London: Academic Press, 1984.
- [16] C.T. Gomez, J. Dvorkin and T. Vanorio, "Laboratory measurements of porosity, permeability, resistivity and velocity on Fontainebleau sandstones," *Geophysics*, kötet 75, szám 6, pp. E191–E204, 2010.

A CO₂-dús környezet hatása a mesterségesen konszolidált magminták petrofizikai tulajdonságaira

Effect of CO₂ rich environment on the petrophysical properties of synthetic sandstone samples

VARGA Gyula^{1*} – BARACZA Krisztián²

¹ PhD hallgató, tudományos segédmunkatárs, oljvarga@uni-miskolc.hu

² PhD, tudományos munkatárs, baracza@afki.hu

^{1,2} Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, Miskolci Egyetem

Összefoglaló: Számos másodlagos vagy harmadlagos kőolajtermelési módszerekhez kapcsolódó mérésekhez szükség van megfelelő geometriájú és petrofizikai tulajdonsággal rendelkező természetes kőzetmagokra. Ennek hiányában a mesterségesen konszolidált kőzettestek előállítása és fejlesztése vált szükségessé, melyek különböző receptek és technológiák alapján készülhetnek. Ezek a modellanyagok a kőolaj és a földgáz kitermelésében játszhatnak szerepet, és a másodlagos vagy harmadlagos technológiák kifejlesztését és/vagy kiválasztását, illetve alkalmazását segíthetik elő a hagyományos és a nem hagyományos rezervoárokban. Az általunk kifejlesztett és használt eljárásnak köszönhetően különböző alapanyagokból lehetséges ilyen mintatestek előállítása. Jelen tanulmányban a szintetikus kőzetmagok porozitás- és permeabilitás-változását mutatjuk be, amelyet egyrészt az előállítás során alkalmazott terhelés, másrészt az utókezelés periódusában a CO₂-dús környezet befolyásolt. A mintatestek különböző ideig és változó időszakban voltak kitéve ennek a különleges környezetnek.

Kulcsszavak: szintetikus kőzetmag, porozitás, permeabilitás, petrofizikai paraméterek

Abstract: Most of the measurements of enhanced oil recovery (EOR) require natural core samples with proper geometry and suitable petrophysical properties. In the absence of these, it became necessary to develop artificially consolidated (or synthetic) core samples, which can be produced according to different recipes and technologies. These materials may play a role in the production of oil and gas, which may help in the development of EOR technologies in conventional and unconventional reservoirs. The process we have developed and used allows the production of such samples from different materials. In this study, the changes in porosity and permeability of synthetic core samples are presented, which were influenced by the compressive force during the production process and by the CO₂-rich environment during the curing period. The samples were exposed to this specific environment for different and varying periods of time.

Keywords: synthetic core samples, porosity, permeability, petrophysical properties

1. BEVEZETÉS

A kőolajtárolók életeciklusa során előbb-utóbb meghatározásra kerülnek a kitermelés növelését célzó, úgynevezett másodlagos vagy harmadlagos módszerek (EOR). Ahhoz azonban, hogy a rendelkezésre álló módszereket és technológiákat az adott tárolóhoz igazítsák, egy jól felépített döntési folyamat szükséges. A szénhidrogén-tárolók termeltetése, továbbá a gazdaságos fejlesztése és fenntartása érdekében különböző mérésekre – adatgyűjtésre – van szükség, amelyek nagymértékben a természetes magminták tulajdonságaira támaszkodnak. Az ezekhez kapcsolódó információk nagy részét a kőzetmintákon elvégzett laboratóriumi mérések szolgáltatják. Azonban a vizsgálatok során felhasznált természetes kőzetminták a mérések sajátosságai miatt legtöbbször csak egyszer használhatóak fel. A véges mennyiségben elérhető természetes kőzetminták száma azonban folyamatosan csökken. Ennek egyik oka, hogy a költséges kútmunkálati tevékenységnek számító magfúrások száma is csökken, valamint a mélyfúrási környezetben alkalmazott információszerzési technológiák fejlődésével bizonyos mérések akár a kútkörnyezetben is elvégezhetőek. Így a természetes magminták hiánya és nagy értéke miatt jelentkező igényeket nem lehet csak ezekből a forrásokból kielégíteni.

Az így felmerült igények miatt szintetikus kőzetminták előállítását tűztük ki célul. A mesterséges kőzetmagokról általánosan elmondható, hogy – korlátozott alkalmazásuk mellett – számos előnnyel bírnak. Az előállításuk lényegesen olcsóbb és nagyobb ütemű, alkalmazásuk nagyban megkönnyíti például a kontrollméréseket vagy az EOR-kísérletek tervezését, kivitelezését, ehhez azonban a viselkedésük rezervoármechanikai szempontból történő leírása is elengedhetetlen. További előnyt jelent, hogy a kívánt geometriai forma is tetszőlegesen megválasztható. A természetes kőzetmagok esetében nincs mindig lehetőség a 1,5"-os dugók kialakítására. Azonban a mesterségesen konszolidált kőzetmagok esetében a kívánt átmérő és hossza tetszés szerint megválasztható, így akár egyedi mérőberendezések vagy kísérleti eszközök tesztelésénél is megfelelőek lehetnek az ilyen típusú mintatestek. Továbbá az előállított, mesterségesen konszolidált kőzetmagok azért is fontosak, mert a petrofizikai sajátosságai és azok összefüggései, korreláció szinten még

relatíve ismeretlenek, illetve nagyban függenek az előállítási eljárástól. A mérési eredmények értékelése hasznos információt adhat a valódi szénhidrogén-tárolókból származó kőzetmagminták nagy mintaignyú méréseknél történő kiváltásával kapcsolatban. A kiváltáshoz azonban szükség van a mérési eredmények rezervoármechanikai értelmezésére, valamint ezek megfeleltetésére a valódi mért adatokkal. Ha szükséges, korrigálni kell a paramétertartományok szórását a gyártási eljárás megváltoztatásával.

Jelen tanulmány célja tehát, egy adott szemcseméretből előállított mesterségesen konszolidált kőzetmagok petrofizikai paraméterei befolyásolhatóságának a megfigyelése volt. A folyamat során a mesterségesen konszolidált kőzetmagok egyes csoportjait szén-dioxiddal töltött cellában tartottuk változó ideig és periódusban annak érdekében, hogy megfigyeljük milyen változások következnek be az egyes kőzetsoportok között. A vizsgálatok a porozitás, az abszolút és effektív permeabilitás-mérésekre terjedtek ki.

2. A SZINETIKUS KŐZETMAGOK

2.1. A szintetikus kőzetmagok előállítása

Az olajipar számára szükséges természetes kőzetmagokhoz hasonló, úgynevezett szintetikus mintatestek előállítására tett első kísérletek már több évtizedre nyúlnak vissza [1]. A technológia fejlődésével újabb anyagok és eszközök kerültek felhasználásra attól függően, hogy milyen területen kívánták ezekkel a mintatestekkel a kutatásokat elvégezni. A szakirodalom alapján számos, különböző módszer segítségével előállíthatók olyan mesterséges kőzetmagok, amelyeken akár szénhidrogén-tárolókhöz kapcsolódó laborkísérleteket is el lehet végezni (alapvető magvizsgálatok, elárasztásos vizsgálatok, EOR-modell-kísérletek stb.).

Mindenekelőtt szükség van alapanyagokra, amelyek valamilyen vázanyagok, illetve kötőanyagok. Vázanyagként a legtöbb technológia természetes kvarcsemcsét használ [2] [3] [4], míg mások mesterséges üvegyöngyöket [5], hulladéküveget és kőzetzúzalékot [6] vagy hulladék kőzetiszapot [7] használnak, hogy mesterségesen konszolidált porózus közeget hozzanak létre.

A másik nélkülözhetetlen alapanyag, a megfelelő kötőanyag. Attól függően, hogy mi a konkrét, tervezett felhasználási területe az elkészült szintetikus magoknak, különböző kötőanyagokat alkalmazhatunk. Nátrium-szilikáttal, vagy alkáli szilikagéllal törékeny (rideg mechanikai tulajdonságú) cementanyag állítható elő [8] [9]. A kedvező tulajdonságai mellett meg kell jegyezni, hogy a szilikagéses kötőanyag vizes közegben devitrifikálódhat [10], ezért folyadékkal mért áteresztőképesség-meghatározása nem végezhető el biztonsággal ilyen mintatesteken. Ezen próbált javítani Tillitson [11], aki kaolinites agyagokkal javította a nátrium-szilikát-alapú kötőanyagot, hogy erősebb kémiai kötéseket hozzon létre benne. Más rideg kötőanyagok is alkalmazhatóak, mint például a boroszilikát üveg [12] vagy a Visser [13] által használt, erősen toxikus SiCl_4 . Hasonlóképpen portlandcement vagy különböző típusú ipari cementek is szolgálhatnak kötőanyagként [14] [15] [16] [17][18], mellyel szintén egy törékeny, rideg cementanyagú mintatest készül. További előnye a cementalapú kötőanyagoknak, hogy alapvetően víznedves közeget jelentenek, mellyel jól közelíthetők a természetes homokkövek víznedvesítési tulajdonságai. Rideg kőzettest készíthető agyagkiégetéses módszerrel is [19] [20] [21]. Az előzőekkel ellentétben gyantával (epoxy ragasztó) egy mechanikusan képlékenyen viselkedő kötőanyag hozható létre [22] [6]. Az így készült mintatestek ezért mechanikai paramétereken alapuló kísérletekre nem alkalmasak, mivel az eredmények nem lesznek reprezentatívak a természetes rezervoárközegekre. Viszont a vizes közegekkel való mérésekhez, kísérletekhez alkalmas, annak figyelembevételével, hogy ez a kötőanyag általában olajnedvesen viselkedik [23].

Az igényeknek megfelelően a kiválasztott alapanyagokból alapos homogenizálással egy kőzetmasszát kapunk. Ezt a keveréket valamilyen tömörítő eljárással általában henger vagy hasáb formájú cellába kell tölteni. A keverék megfelelő tömörítettségi szintjét különböző eszközökkel és berendezésekkel lehet elérni, melyek vibrációs és/vagy kompaktációs elveken működnek [2] [6] [7] [9]. A technológiától és az alapanyagoktól függően a formába töltött és tömörített keveréket a kötési idő alatt különböző mértékű nyomáson és/vagy hőmérsékleten kell tartani. Ez azért is fontos lehet, mivel a természetes rezervoárközetek diagenezise a mélyben zajlik, esetenként több ezer méter mélyen a felszín alatt, tehát magas nyomáson és hőmérsékleten történik. Ezért mérlegelni kell, hogy a mesterségesen konszolidált kőzettest készítése során hogyan és milyen mértékű nyomást alkalmazunk [24].

Másrészt a természetes kőzetmagok felszín alóli kiemelésekor (magvétel) fellépő hirtelen nyomásesést is imitálhatja a nyomás alól, illetve a formából való kivétel, így mind jobban közelítve a rezervoárból származó kőzetmintát [24].

2.2. A szintetikus kőzetmagok előállítása az általunk fejlesztett eljárással

Az eddigi kísérletek alapján széles tartományban tudunk előállítani olyan mintatesteket, amelyeknél előre megválasztható a porozitás és/vagy a permeabilitás értéke [25], amelyek természetes és nem természetes kőzetalapanyagból is készülhetnek. A mélyfúrásból származó alapanyagot tekintjük természetes, míg a folyami és bányahomokot, valamint a külszíni kőbányákból fejtett kőzetek örleményeit tekintjük a nem természetes kőzetalapanyagoknak, vázanyagoknak. Jelen tanulmányban olyan nem természetes vázanyagot választottunk, amely az ásványos összetétele szerint nem mutat jelentős eltérést a Magyarországon jelentősen megkutatott rezervoár kvarcdús homokköveihez képest. A vázszerkezetet alkotó szemcsék mérete 110–150 mikrométeres nagyságú volt, valamint kötőanyagként cementalapú ipari ragasztót választottunk.

A szakirodalomból ismert a mesterségesen konszolidált kőzetmagok előállítása olyan vizsgálatokhoz, amelyeken keresztül CO₂-injektálás történik [26]. Azonban a porózus kőzetmagok előállítási folyamatában a szén-dioxid felhasználásának hatásaival kapcsolatban nem állnak rendelkezésre ilyen publikációk vagy kutatási anyagok. Azonban az utóbbi időben jelentős kutatási érdeklődést mutat a szén-dioxid tárolásának technikája a cementalapú anyagokban [27] [28] [29], mivel annak kedvező hatása van a környezetre, mérsékelheti az éghajlatváltozást. Ezekből a szakirodalmi publikációkból kiderül, hogy a CO₂ karbonizációs reakcióval történő megkötése a cementalapú kötőanyagok használata esetében – elsődlegesen a betonokban – ugyanazt az elvet követi, mint az „ásványi karbonizáció”: a kalcium- és/vagy magnéziumtartalmú szilikátásványok reakcióba lépnek a szén-dioxiddal, mely folyamat során kalcium-karbonátok és/vagy magnézium-karbonátok képződését eredményezik [30] [31].

A szintetikus kőzetmagok szén-dioxiddal történő utókezelésének hatására kialakuló kalcitkristályok tehát megváltoztathatják azok poroperm értékeit. Ennek vizsgálatára az alábbi mérési sort terveztük. A kísérlet során 24 darab mintatest készült a 1. táblázat szerint.

1. táblázat. A mintatestek utókezelése különböző környezeti körülmények között

		Minta száma					
Utókezelés szerint	2 hét pára	Minta 1	Minta 2	Minta 3	Minta 4	Minta 5	Minta 6
	1 hét pára + 1 hét CO ₂	Minta 7	Minta 8	Minta 9	Minta 10	Minta 11	Minta 12
	1 hét CO ₂ + 1 hét pára	Minta 13	Minta 14	Minta 15	Minta 16	Minta 17	Minta 18
	2 hét CO ₂	Minta 19	Minta 20	Minta 21	Minta 22	Minta 23	Minta 24

Az első kőzetcsoporthat darab hagyományosnak mondható módon elkészített minta alkotta (Minta 1–6), ahol az utókezelés kizárólag páradús (RH > 98 %, RH= relative humidity) helyen történt. A nyomóprés alól kikerülő további minták egy túlnyomásos szén-dioxid-kamrába (min 96%[V/V]) kerültek változó periódusban és különböző ideig (Minta 7–24), ahol az alkalmazott túlnyomás minden esetben 10 bar volt. A 6 darab kőzetminta előállítására azért volt szükség az egyes kőzetcsoporthoz, hogy jobban megállapítható legyen az egyes hatásokkal összefüggő változások mértéke. A vizsgálat további célja az volt, hogy megfigyeljük, a különböző előállítási módok során hasonló poroperm értékekkel rendelkező mintatesteket lehetséges-e előállítani. A vizsgálat során ügyeltünk arra, hogy a változatlan összetétel és előállítási mód mellett (2. táblázat) a páradús (RH > 98%) környezetben és a CO₂-cellában is egyaránt 45 °C (113 °F) legyen a beállított hőmérséklet az utókezelés teljes ideje alatt.

2. táblázat. A mintatestek összetétele és előállítási körülményei a CO₂-gáz hatásainak vizsgálatához

Összetétel és előállítási mód	
Homok (g)	178,80
Cement (g)	30,00
Víz (g)	12,10
Homoktípus/frakciók	Nem term.
110 µm – 150 µm	100,00%
Alkalmazott nyomás (bar)	400
Nyomás alatt (óra : perc)	24:00
Laborhőmérséklet (°C)	~23
Marshall-tömörítés	6x
Párában (óra : perc)	~336:00

3. EREDMÉNYEK

3.1. A kőzetfizikai mérések eredményei

Az általunk kifejlesztett eljárással készített kőzetminták petrofizikai paramétereinek a szén-dioxid hatására bekövetkező változását célzó mérési folyamat első lépéseként a porozitásértékek meghatározására került sor. A különböző környezetben kezelt kőzetdugók porozitásértékei a 3. táblázatban kerültek összefoglalásra.

A kizárólag páradús (RH > 98 %) környezetben kezelt minták esetében az átlagos porozitás értéke 24,44% volt. A 24 darab kőzettest közül a három legtömörebb minta (Minta 3, 4 és 5) is ebben a csoportban található, ezeknek az értéke nem éri el a 24%-ot. Az egy hét változatlan mértékű relatív párartalmú környezetet követő egy hét CO₂-érlelésű

közetsoportban kismértékű porozitásnövekedés figyelhető meg (átlagos porozitás = 25,99%) az előzőekben bemutatott közetsoport mintatestjeivel összehasonlítva, ahol az átlagos értéktől való eltérés legnagyobb mértéke 1,47%. Az egy hétre szén-dioxidba, majd egy hét páradús környezetbe (ahol a relatív páratartalom minimum 98%) helyezett kőzettestek esetén az átlagos porozitás értéke 25,64%, és az ettől való eltérés maximuma mindössze 0,5%. A reprodukálhatóságot ez esetben jól mutatja az, hogy a 6 mintatestből háromnál mindössze 0,01 és 0,02% közötti eltérés mutatható ki, valamint csak egyetlen minta porozitása haladja meg a 26%-ot. A két hét CO₂-dús környezetben kezelt minták esetében az átlagos porozitás értéke 26,68% volt, és az ettől való eltérés legfeljebb 1,73%.

3. táblázat. A mintatestek előállítási körülményei a CO₂-gáz hatásainak vizsgálatához

	Minta száma	Porozitás (%)				Abszolút permeabilitás (mD)				Effektív permeabilitás (mD)			
utókezelés módja	2 hét pára	Minta 1	26,47			231				98			
		Minta 2	25,75			188				105			
		Minta 3	22,73			162				77			
		Minta 4	23,12			190				167			
		Minta 5	23,73			217				88			
		Minta 6	24,81			239				122			
	1 hét pára + 1 hét CO ₂	Minta 7		25,65			196				99		
		Minta 8		26,67			258				148		
		Minta 9		26,25			275				167		
		Minta 10		24,25			89				70		
		Minta 11		25,97			252				66		
		Minta 12		26,86			257				226		
	1 hét CO ₂ + 1 hét pára	Minta 13			25,11			82				64	
		Minta 14			26,14			36				28	
		Minta 15			25,72			57				38	
		Minta 16			25,71			38				32	
		Minta 17			25,73			12				9	
		Minta 18			25,42			13				10	
	2 hét CO ₂	Minta 19				27,41			89				22
		Minta 20				28,36			35				21
		Minta 21				26,60			37				20
		Minta 22				26,44			18				12
		Minta 23				24,95			15				7
		Minta 24				26,30			17				9
Átlagos érték		24,44	25,99	25,64	26,68	205	221	40	35	110	129	30	15

A mérési sor második elemeként az abszolút permeabilitás értékei kerültek meghatározásra. Az első 6 kőzetminta esetében a nitrogéngázzal mért permeabilitás átlagosan 205 mD volt. Az egy hét páradús (RH > 98%) környezetben kezelt majd egy hét CO₂-dal töltött cellába helyezett kőzeteknél (Minta 7–12) ez a nitrogénnel mért áteresztőképesség 221 mD értékű átlagot mutat. Azonban jelentős mértékű permeabilitás változás következik be (gyakorlatilag változatlan porozitásértékek mellett) abban az esetben, ha az utókezelés először egy CO₂-dal töltött cellában történik. Ilyen esetekben (Minta 13–18) az abszolút permeabilitás átlaga 40 mD értékre csökken. Hasonló áteresztőképesség-változás érhető el úgy is, ha a mintatesteket két hétig tároljuk az említett közegű túlnyomásos kamrában. Így a kőzetmagok abszolút permeabilitása 15–89 mD közötti értékeket mutat. Meg kell jegyezni, hogy a Minta 19 jelű mintatest értéke eltér az adott közetsoportot alkotó minták abszolút permeabilitás értékeitől, azonban a többi öt kőzetmag értéke egy szűk tartományba esik.

A kőzetmagok telítését követő effektív áteresztőképesség-mérések szintetikus rétegvízzel történtek (4. táblázat), ahol a térfogatáram 50 ml/óra volt. A minimum tíz pórustérfogatnyi folyadékmennyiség átszajlását követően került sor a kiértékelésekre a kapott adathalmazok alapján. Az előzőekben bemutatott négy csoport közül az első közetsoport esetében az effektív áteresztőképesség átlagos értéke 110 mD volt. Ez az érték a második csoport esetében is hasonló (129 mD) volt, annak ellenére, hogy az utókezelés második felében a kőzetmagok egy túlnyomásos szén-dioxid-kamrába kerültek. A harmadik közetsoportnál a megváltoztatott előállítási körülmények hatására jelentős effektív áteresztőképesség-változás mutatható ki. A jól látható csökkenés már az abszolút permeabilitás értékeiben is kimutatható

volt. Jelen esetben az effektív átteresztőképességek számtani átlaga 30 mD értéket ér el annak ellenére, hogy a kőzetcsoporthoz tartozó minták átlagos porozitása több mint egy százalékkal volt nagyobb az első kőzetcsoporthoz tartozó mintatestek porozitásértékeihez képest. Az utolsó csoportban található szintetikus kőzetek folyadékkal mért átteresztőképességeinek értékei – a porozitásértékekhez hasonlóan – alacsony értéken kerültek meghatározásra úgy, hogy a legmagasabb porozitásértékeket itt mértünk, mivel több mint 2%-kal volt nagyobb a héliummal kitölthető póruster, összehasonlítva a szén-dioxid-mentesen készült mintatestek porozitásával. Ezen kőzetmagok átlagos effektív permeabilitása csupán 15 mD volt. A vizsgált mesterségesen konszolidált kőzetmagoknál részecskekihordást nem tapasztaltunk az abszolút és az effektív permeabilitásméréseknél sem. Ezek alapján megállapítható, hogy fizikailag és kémiaiilag is stabil szerkezet került előállításra.

4. táblázat. A szintetikus rétegvíz összetétele

Név	Mennyiség
	(g/l)
NaCl	0,5
NaHCO ₃	2,6
CH ₃ COONa	1,6
Összesen	4,7

4. ÖSSZEZÉS

A tanulmány célja a szintetikus homokkő kőzetminták lehetséges előállítási módszereinek a bemutatása, valamint az előállított mintákon alkalmazott különböző utókezelési technikák hatásainak vizsgálata volt. A minták között négy csoportot különítettünk el. Az első csoport mintáinak a tárolása – két héten keresztül – kizárólag túlnyomásos (10 bar) szén-dioxidban történt. A második csoport mintáit egy hétig CO₂-ban és egy hétig vízpárában (RH > 98 %) tartottuk. A 3. csoport egy hetet töltött párában, majd egy hetet CO₂-dús környezetben, és az utolsó csoport mintáit két hétig párában tartottuk. A porozításban és az átteresztőképességben jelentős változásokat tapasztaltunk. A páradús utókezelésű minták esetében magasabb abszolút és effektív átteresztőképesség-értékeket kaptunk alacsonyabb porozitásértékek mellett, mint a kizárólag szén-dioxidban tartott mintatestek ezen értékei. Kimutattuk, hogy a változó periódusban történő CO₂-os elárasztás hatására akkor kapunk számottevő változást a poroperm értékekben – a páradús utókezelésű mintákkal összehasonlítva –, ha a szén-dioxid az utókezelés kezdeti fázisában érintkezett a szintetikus mintatestekkel.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Q. Jishun, The manufacture and use of artificial consolidated core samples in China, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina; International Symposium of the Society of Core Analysts; Abu Dhabi, UAE, 5–9 October, 2004.
- [2] R.M. Holt és C.J. Kenter, Laboratory simulation of core damage induced by stress release, Rock Mechanics Proceedings of the 33rd U.S. Symposium, pp. 959–968, edited by J.R. Tillerson and W.R. Wawersik, Balkema, Rotterdam, ISBN 90-5410-045-1, 1992.
- [3] S.W.J. Den Brok, C. David és Y. Bernabé, Preparation of synthetic sandstones with variable cementation for studying the physical properties of granular rocks. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science 325, pp. 487–492, 1997.
- [4] E. S. Al Homadhi és G.M. Hamada, Determination of petrophysical and mechanical properties interrelationship for simulated sands, Engineering Journal of the University of Qatar, Volume 16, pp. 1–10, 2003.
- [5] B. Weinhardt és Z. Heinemann, Artificial consolidated porous media for model investigations of 1-D-displacement, Handout, 10, 1985.
- [6] M.Y. Lee, C.H. Ko, F.C. Chang, S.L. Lo, Y.D. Lin, M.Y. Shan, és J.C. Lee, Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction, Cement and Concrete Composites, Volume 30, Issue 7, pp. 583–587, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.03.004, 2008.
- [7] F.C. Chang, M.Y. Lee, S.L. Lo, és Y.D. Lin, Artificial aggregate made from waste stone sludge and waste silt. Journal of Environmental Management, Volume 91, Issue 11, pp. 2289–2294, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.06.011>, 2010.
- [8] C. David, B. Menéndez, és Y. Barnabé, The Mechanical Behaviour of Synthetic Sandstone with Varying Brittle Cement Content, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 35, Issue 6, pp. 759–770,; [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(98\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00003-5), 1998.
- [9] E. S. Al Homadhi, Artificial Sandstone Cores Production with a Wide Range of Petrophysical Properties, J. King Saud Univ., Volume 14, Eng. Sci. (1), pp. 95–118. [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30747-5](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30747-5), 2002.

- [10] B. Den Brok, How to cook "Strasbourg" sandstone, Internal Report, Institut de physique des matériaux, École et observatoire de physique du globe de Strasbourg (EOPGS), 10, 1993.
- [11] P. Tillitson, J. Sothcott, I.A. Best, M. Chapman, és X.Y. Lee, Experimental verification of the fracture density and shear-wave splitting relationship using synthetic silica cemented sandstones with a controlled fracture geometry, *Geophysical Prospecting*, Volume 60, Issue 3, pp. 516–525, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2011.01021.x>, 2012.
- [12] Y. Bernabé, D.T. Freyer, és A. Hayes, The effect of cement on the strength of granular rocks, *Geophysical Research Letter*, Volume 19, Issue 14, pp. 1511-1514, <https://doi.org/10.1029/92GL01288>, 1992.
- [13] R. Visser, Acoustic measurements on real and synthetic reservoir rock, Proefschrift Technische Universiteit Delft (PhD-thesis Delft University), Delft, ISBN 90-9002609-6, 1988.
- [14] A. Viksne, J.W. Berg, és K.L. Cook, Effect of porosity, grain contacts, and cement on compressional wave velocity through syntetic sandstones, *Geophysics*, Volume 26, Issue 1, pp. 77-84, 1961.
- [15] F. Saidi, Y. Bernabé és T. Reuschle, The mechanical behaviour of synthetic, poorly consolidated granular rock under uniaxial compression, *Tectonophysics*, Volume 370, Issues 1–4, pp. 105-120, [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00180-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00180-X), 2003.
- [16] X.M. Chen, és Y. Zhang, Method for making artificial core using dry cement as cementing agent, *Advanced Materials Research*, Volume 997, pp. 387-391, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.997.387, 2014.
- [17] S. Rios, A.V. da Fonseca, és B.A Baudet, On the shearing behaviour of an artificially cemented soil, *Acta Geotech.*, Volume 9, Issue 2, pp. 215–226, <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0242-7>, 2014.
- [18] A. Younessi, V. Rasouli, és B. Wu, Sand production simulation under true-triaxial stress conditions, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 61, pp. 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.03.001>, 2013.
- [19] M. Maccarini, Laboratory studies of a weakly bonded artificial soil, Ph.D. Thesis, Imperial College London (University of London), 1987.
- [20] A.D. Shabdirova, Z. Bissekénova, N.H. Minh, és J.R. Kim, Sample preparation method of clay-rich sandstone analogue of sandstone reservoirs in Kazakhstan, (American Rock Mechanics Association) ARMA, 50th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, pp. 904–910, 26–29 Houston, Texas, ISBN (Electronic) 9781510828025, 2016.
- [21] M.A. Hemzi, S. Wheeler, és D. Gallipoli, On the preparation of artificially bonded soil samples for unsaturated testing, 4th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, 21–25. Available: <http://eprints.gla.ac.uk/42969/>, 2009.
- [22] J.S. Rathmore, E. Fjaer, R.M. Holt, és L. Renlie, P- and S- wave anisotropy of a synthetic sandstone with controlled crack geometry, *Geophysical Prospecting*, Volume 43, Issue 6, pp. 711–728, DOI: 10.1111/j.1365-2478.1995.tb00276.x, 1995.
- [23] H. Xie, A. Li, J. Qin, és B. Lazaro, Manufacture of water wet artificial core by chemical modification method, International Symposium of the Society of Core Analysts, Snowmass, Colorado, USA, 21–26 Corpus ID: 32513114, 2016.
- [24] R.M. Holt, Particle vs. Laboratory Modelling of In Situ Compaction, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, Volume 26, Issues 1–2, pp. 89-93, [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00028-X), 2001.
- [25] G. Varga, és A. Fiser-Nagy Mesterségesen konszolidált kőzetmagok petrofizikai tulajdonságainak módosítása különböző adalékanyagokkal, *Műszaki Tudomány az Észak – Kelet Magyarországi Régióban*, Debrecen, Hungary, ISBN 978-963-7064-37-1, 2018.
- [26] A. El Husseiny, és T. Vanorio, The effect of micrite content on the acoustic velocity of carbonate rocks, *Geophysics*, Volume 80, Issue 4, pp. 1JA-Z63, <https://doi.org/10.1190/GEO2014-0599.1>, 2015.
- [27] D.K. Panesara és L. Mo, Properties of binary and ternary reactive MgO mortar blends subjected to CO₂ curing, *Cement and Concrete Composites*, Volume 38, pp. 40–49, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.009>, 2013.
- [28] D.P. Siriwardena és S. Peethamparan, Quantification of CO₂ sequestration capacity and carbonation rate of alkaline industrial byproducts, *Construction and Building Materials*, Volume 91, pp. 216–224, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.035>, 2015.
- [29] L. Haselbach és A. Thomas, Carbon sequestration in concrete sidewalk samples, *Construction and Building Materials*, Volume 54, pp. 47–52, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.055>, 2014
- [30] J.J.W. Huijgen, G.J. Witkamp, és R.N.J. Comans, Mineral CO₂ Sequestration by Steel Slag Carbonation, *Environmental Science & Technology*, Volume 39, Issue 24, pp. 9676–9682, <https://doi.org/10.1021/es050795f>, 2005.
- [31] A.A. Olajire, A Review of Mineral Carbonation Technology in Sequestration of CO₂. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 109, pp. 364–392, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.013>, 2013.

KÖRNYEZETTUDOMÁNYI SZEKCIÓ II.

A szondamező paramétereinek hatása a geotermikus hőszivattyús potenciálra

Effect of the parameters of the borehole field on the potential of heat pump systems

Buday Tamás^{1} – Bertalan Eszter Viola¹*

¹ Debreceni Egyetem, Ásvány- és Földtani Tanszék, 4002 Debrecen, Pf. 400, *buday.tamas@science.unideb.hu

Összefoglaló: A geotermikus hőszivattyús energiatermelés potenciáljának meghatározása a megújuló energetikai területi tervezés lényeges eleme. A felszín alatti térrészből egy év alatt maximálisan kitermelhető energiát (szondánként, területegységenként) EED szoftverrel határoztuk meg különböző kiépítések esetén, összesen 99 esetet vizsgálva. A kapott eredmények alapján az adott terület technikai potenciálja jelentősen függ a kiépítés és üzemeltetés paramétereitől. A kapott értékek jellemzően egy nagyságrenden belül maradtak, míg a környezet hővezető képessége általában kisebb változatossággal jellemezhető. Következésképpen a hőszondás rendszerek technikai potenciáljának meghatározása során a technikai-társadalmi adottságok hatása összemérhető vagy fontosabb a természeti adottságoknál, amennyiben egy terület teljes hőszondás-hőszivattyús technikai potenciálját szeretnénk meghatározni.

Kulcsszavak: geotermikus potenciál, szondamező, EED, geotermikus hőszivattyú

Abstract: Determining the potential of geothermal energy production with heat pumps is an essential element of regional planning of renewable energy utilization. The maximum energy that can be extracted from the subsurface space in one year (per borehole, per area unit) was determined with the EED software in the case of different configurations, with an evaluation of 99 cases. Based on the obtained results, the technical potential of the given area significantly depends on the parameters of the construction and operation. The values typically vary within an order of magnitude; however, the thermal conductivity of the subsurface materials has a smaller variability. Consequently, the effect of the technical and social features is comparable to or more important than the natural conditions when determining the complete technical potential of an area using heat pumps with borehole heat exchangers.

Keywords: geothermal potential, borehole field, EED, geothermal heat pumps

1. BEVEZETÉS

A geotermikus energia számos szektorban használható megújuló energia, melynek legdinamikusabban fejlődő és már a legnagyobb kapacitással rendelkező ágazata a hőszivattyús energiahasznosítás [1]. A hőszivattyúk olyan berendezések, amelyek a környezet energiáját juttatják magasabb hőmérsékletű helyre, melyhez külső energiát használnak fel [2]. Más geotermikus energiahasznosításokkal ellentétben nem igényelnek klasszikus hőforrást és nagy mélységű fúrásokat, így nagyon sok helyre telepíthetők. Alkalmaskak decentralizált energiaellátásra, a rendszereket általában lakóépületek vagy nagyobb intézmények önálló fűtésére, hűtésére alkalmazzák.

A geotermikus hőszivattyús rendszerek primer oldali kiépítése lehet nyílt vagy zárt [2]. Nyílt rendszerek esetén sekély mélységből történik vízkitermelés, a vizet 2-3 °C-nyi hűtés után visszajuttatják a rezervoárba besajtoló kúton vagy kutakon keresztül. Zárt rendszerek esetén egy zárt csőrendszert építenek ki a felszín alatt, melyben hőhordozó közeg áramlik. E közeg energiát vesz fel környezetéből vagy (hűtési üzemmódban) energiát ad le a környezetének, melynek hőmérséklete ezáltal megváltozik. A megváltozott hőmérséklet horizontális hőtranszportot, elsősorban hővezetést hoz létre, így a hőkivétel nemcsak a hőcserélő felület közvetlen környezetére korlátozódik, hanem attól több méter távolságban is kimutatható [3]. Ez önálló, egymástól távol eső szondák esetében minimális hatást jelent, de nagyobb rendszerek szondamezőiben vagy a rendszerek nagyobb arányú elterjedésével a hőszondáknak lesz egymásra hatása, és akkor is szondamezőként lesznek értelmezhetőek, ha esetleg az egyes hőszondákat eltérő tulajdonosok üzemeltetik.

A települési szintű megújuló energetikai stratégiák készítéséhez bemeneti információként szükség van az egyes energiaforrásokból kinyerhető energiára, potenciálra [4]. Tanulmányunk célja, hogy rámutassunk, a hőszondás primer oldali kiépítésű hőszivattyús rendszerek tervezése esetén ennek megadása nemcsak a természeti adottságoktól és a rendelkezésre álló hőmennyiségtől függ, hanem a kitermelés módjától, a hőkivételi egységek tervezett elhelyezkedésétől is.

2. A GEOTERMIKUS POTENCIÁL ÉRTELMEZÉSI LEHETŐSÉGEI

A hagyományos geotermikus energiahasznosítás potenciálmeghatározásának alapja a felszíni hőmérséklethez képest tárolt hőtöbblet. Ennek teljes mennyisége az elméleti potenciál, melynek kiszámítására a Muffler és Cataldi által definiált képletek használhatók [5]. Azonban az így meghatározott értékek felhasználásának jelentős gyakorlati korlátai vannak. Ezek közé tartozik a rezervoár mélységének kérdésköre, valamint a kitermelés időbeli lefolyásának megadása is.

Ezek egyértelműsítése azért is lényeges, mert több nagyságrendbeli különbség lehet a különböző értelmezések között, melyek a geotermikus energia jelentőségének túl- vagy alulértékeléséhez is vezethetnek [6].

Az elméleti potenciálnak az ismert eljárásokkal kitermelhető része a technikai potenciál [6]. Értékét tehát a leghatékonyabb kitermelő rendszer hosszú üzemeltetése során kialakuló hőmérséklet-csökkenés (nyílt rendszereknél emellett a rezervoár-tér fogat esetleges csökkenése) határozza meg. A technikai potenciál azon részét, amely jelen körülmények között gazdaságosan kitermelhető, gazdasági potenciálnak nevezik. Végül megadható a kitermelhető potenciál, mely nemcsak a gazdasági, hanem az egyéb szabályozó környezetet is figyelembe véve kitermelhető része a gazdasági potenciálnak, illetve megadható a fenntartható potenciál, mely a hosszabb távon maximálisan kitermelhető mennyiségű geotermikus energiát jelenti. Az egyre kisebb értékek esetében megnő az egy év alatt kitermelhető energiamennyiség vagy teljesítmény jellegű mennyiségek megadása a helyben tárolt energiamennyiséghez képest.

A geotermikus hőszivattyús rendszerek esetében az itt bemutatott osztályozás részben módosul. Mivel klasszikus rezervoárokról ilyenkor nem beszélhetünk, így szükséges magadni a potenciálmeghatározásba bevont mélységtartományt, illetve a horizontális kiterjedést is. Emellett a helyben tárolt energia kiszámításához fűtési üzemmódban az adott hőszivattyús rendszer által még kezelhető minimális hőmérsékletet kell meghatározni/megadni. Ezek már részben technológiai kérdések, így nem lehetne része az elméleti potenciál meghatározásának, ugyanakkor jelentős arányú elméleti potenciálnövekedést jelent, ha a termelésbe bevont mélység- és hőmérséklettartományt növeljük. Ráadásul a kivett energia részben pótlódik horizontálisan, így egy véges térrész alól kitermelhető energia össz mennyisége szélsőséges esetben több lehet, mint az ott helyben tárolt energia (elméleti potenciál). A geotermikus hőszivattyús rendszerek primer oldai kiépítése segítheti az épületek hűtését és a hőraktározást is. Ebben az esetben a hűtési energiaigényt is (nagy részt) a felszín alól elégítjük ki, miközben a felszín alatti térrész hőmérséklete nő, ami definíciószerűen növekvő geotermikus potenciált jelent. Ebben az esetben is előfordul, hogy sokévnnyi geotermikus energiafelhasználás után a helyben tárolt energia mennyisége nem csökken.

Bár a különböző kutatások a hőszivattyús rendszerek geotermikus potenciálját különböző oldalokról közelítették meg, így nincs egységes értelmezés [4], azonban praktikussági szempontból a tervezések során célszerű technikai potenciálként a hőszondáknak egy év alatt kivehető energiamennyiséget (pl. [7], [8]), vagy az egységnyi területre eső, egy év alatt kivehető energiamennyiséget megadni (pl. [9]) 100 m-es szondahossz, mint gyakran használt méretezési érték esetén.

A hőszivattyús geotermikus potenciál értelmezésében van még egy jelentős eltérés a hagyományos geotermikus potenciálhoz képest. A felszín alól kinyert energiához még hozzáadódik a hőszivattyú által felhasznált külső energia is, így jut a felhasználóhoz. Ennek számszerűsítése például a COP (coefficient of performance) érték, mely a szekunder oldalon leadott energia és a külső energia hányadosa, értéke jellemzően 3–5 közé esik [2].

3. MÓDSZEREK

3.1. A kivehető hőmennyiség analitikus meghatározása

A hőszondák környezetében kialakuló hőmérséklet-változásokat különböző egyszerűsítő modellekkel analitikusan is meg lehet határozni [10], [11]. Ezek közül a legegyszerűbb a végtelen vonalforrás módszer, mely a hőszondát végtelenül hosszú és horizontálisan nagyon kis kiterjedésű objektumként írja le, ahol a hőmérséklet-eloszlás a mélységtől nem függ. Ekkor a termelés hatására kialakuló hőmérséklet-változást az (1) egyenlet írja le.

$$T_0 - T = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \int_{r^2}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

A hőszonda körül kialakuló mélységtől is függő hőmérsékletmező pontosabban modellezhető a véges vonalforrás módszerrel ((2) egyenlet).

$$T_0 - T = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \int_0^H \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} dh \quad (2)$$

ahol: T: hőmérséklet a hőszondától r távolságban és t idő elteltével (K)

T₀: kiindulási hőmérséklet (K)

Q: a hőszondából kitermelt hőteljesítmény (W)

H: szondahossz (m)

λ: a földtani közeg hővezetési tényezője (W/(mK))

α: a földtani közeg hődiffúziivitása (m²/s)

r: a vizsgált hely távolsága a hőszondától (m)

t: a hőkivétel kezdete óta eltelt idő (s)

z: a vizsgált hely mélysége a felszíntől (m)

Az ilyen módon kapott hőmérsékletváltozás-függvények térben és időben összegezhethők, de nagy szondamező és normál használat mellett a tisztán analitikus megközelítés használata számolásigényes. A fenti összefüggések analógiájára Eskilson definiálta az ún. Eskilson-féle g-függvényt (válaszfüggvényt) [12], melyre:

$$T_0 - T = \frac{Q}{2\pi\lambda H} \cdot g \left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}, \frac{B}{H} \right) \quad (3)$$

ahol a fentiekben túl:

$t_s = H^2 / (9\alpha)$: karakterisztikus idő (s)

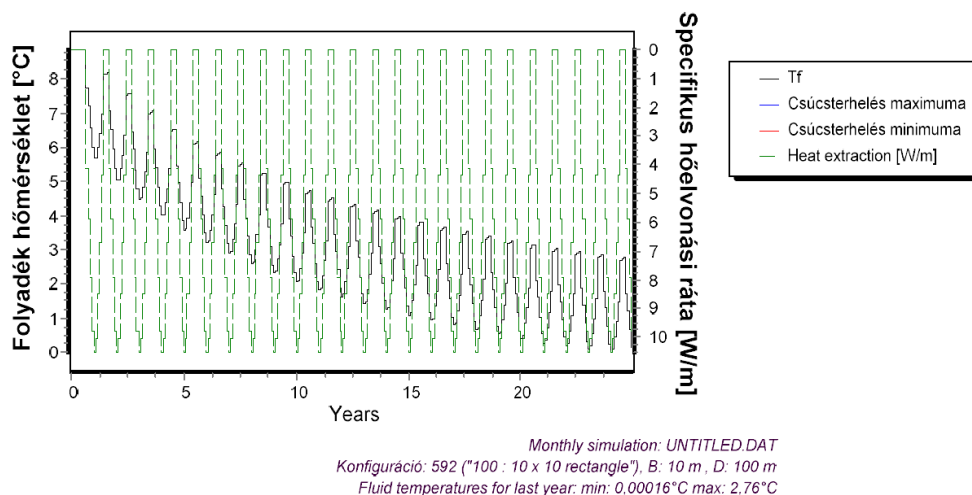
r_b : a hőszonda sugara (m)

B : hőszondák távolsága szondamezőben (m)

3.2. A kivehető hőmennyiség meghatározása EED szoftver segítségével

Az Earth Energy Designer (EED) hőszondák tervezésére létrehozott szoftver [13], melynek egyik funkciója a többéves üzemelés során kialakuló folyadék-hőmérsékletek kiszámítása (1. ábra). Számításaihoz a különböző szondakiosztásokhoz tartozó, analitikusan vagy numerikusan meghatározott g -függvényeket használja fel, bemenő paraméterként egyaránt felhasznál földtani (természeti), technikai-megvalósítási és hőigényadatokat, melyek közül jelen kutatásban elsősorban a szondamezők kiépítésének paramétereit változtattuk, a többi adatot konstans értékűnek vettük, melyek az alábbiak: a felszín alatti térrész hővezető képessége $3,5 \text{ W/(mK)}$, térfogati hőkapacitása $2,16 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$, a hőmérséklet-csökkenés $8 \text{ }^\circ\text{C}$. A szondafurat átmérője 110 mm , a csövek távolsága 70 mm , a csővastagság 32 mm , a csőfal 3 mm . A hőszállító folyadék 25% -os etilénlikol. A méretezés során a szondatípus, a szondahossz, a szondakonfiguráció és a szondatávolság változtatásával összesen 99 esetet vizsgáltunk.

A fűtési hőigény havi eloszlásában a beépített értékeket használtuk, a hűtési igény eloszlását a hőmérséklet járásának megfelelően becsültük (1. táblázat). A szoftver az évi hőszükségletet az eloszlások alapján számolja át havi hőszükségletre, melyekre a fluidum-hőmérsékletet számolja. A számolások során a használati meleg víz előállításához szükséges hőigényt nem vettük figyelembe. Az adott paraméterek esetén elérhető maximális kivehető éves energiamennyiséget iteratív módon határoztuk meg úgy, hogy az üzemelés során elért legalacsonyabb havi átlagos folyadék-hőmérséklet $-0,005$ és $0,005 \text{ }^\circ\text{C}$ közé essen.

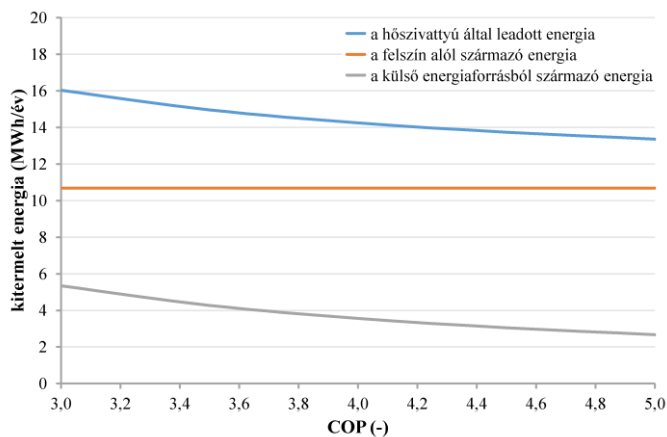


1. ábra. A modellezett folyadék-hőmérséklet (T_f) és fajlagos teljesítmény (heat extraction) változása $742,9 \text{ MWh/év}$ hőigény esetén egy 10×10 -es szondamezőben, dupla U szonda és 10 m -es szondatávolság esetén (képernyőkép az EED szoftver grafikus felületéről)

1. táblázat. A havi hőigények eloszlása a modellekben (%)

hónap	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
fűtés	15,5	14,8	12,5	9,9	6,4	0,0	0,0	0,0	6,1	8,7	11,7	14,4
hűtés	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0	22,0	24,0	23,0	16,0	0,0	0,0	0,0

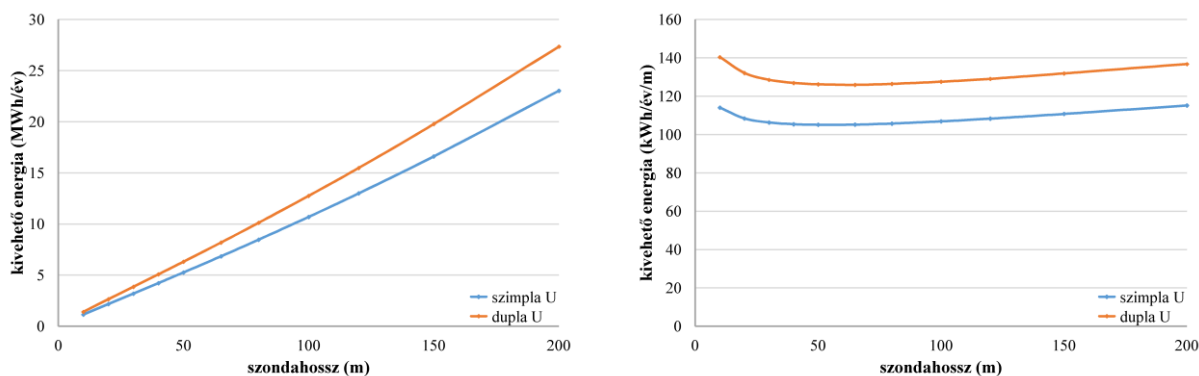
A szoftverben beállítható a hőszonda COP-értéke is. Ez azonban a felszín alól kivehető energiát nem befolyásolja, a COP-értékek segítségével a maximális energia kivételéhez szükséges külső energiát, és így a hőszivattyú által leadott összes energia mennyiségét számolhatjuk ki (2. ábra). A geotermikus hőszivattyús rendszerek által a felhasználó felé szolgáltatott energia adott primer odali hőkivétel esetén kisebb COP-értékű rendszerben kedvezőbb. Azonban amíg a ténylegesen kivett energia mennyisége nem közelíti meg a technikai potenciál értékét, addig a nagyobb COP-értékű hőszivattyús rendszerek fajlagosan olcsóbb és kevésbé környezetszennyező működése miatt [14] ezeket a hőszivattyúkat fogják választani a beruházók. A modellezéseket COP=3 értékkel végeztük el.



2. ábra. A kivehető hő, a külső energia és a hőszivattyú által leadott energia függése a hőszivattyú jóságfokától 1 db 100 m hosszúságú, szimpla U szonda esetén

4. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

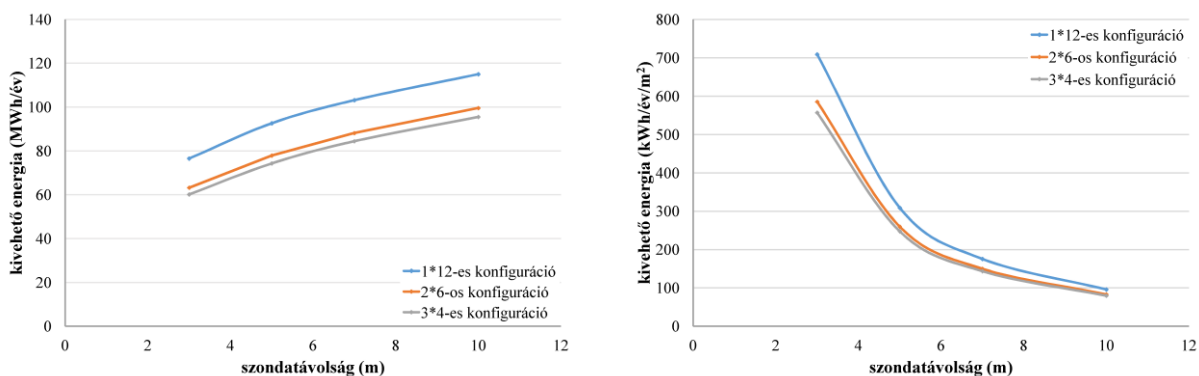
A 100 m mélységet elérő szimpla U kiképzésű hőszonda által egy év alatt kitermelhető, maximális energiamennyiség a vizsgált feltételek mellett 10,68 MWh, ami 106,8 kWh/év/m fajlagos értéket jelent, míg egy dupla U szonda esetén ezek az eredmény 12,75 MWh és 127,5 kWh/év/m. A kinyerhető energia a feltételezett homogén rétegsor esetén a mélységgel közel lineáris, a szondahosszra vonatkoztatott értékek dupla U kiépítés esetén 125–140 kWh/év/m értékűek. A dupla U kiépítés esetén a szimpla U kiépítéshez képest 19–23%-kal nagyobb hőkivétel, azaz technikai potenciál érhető el (3. ábra).



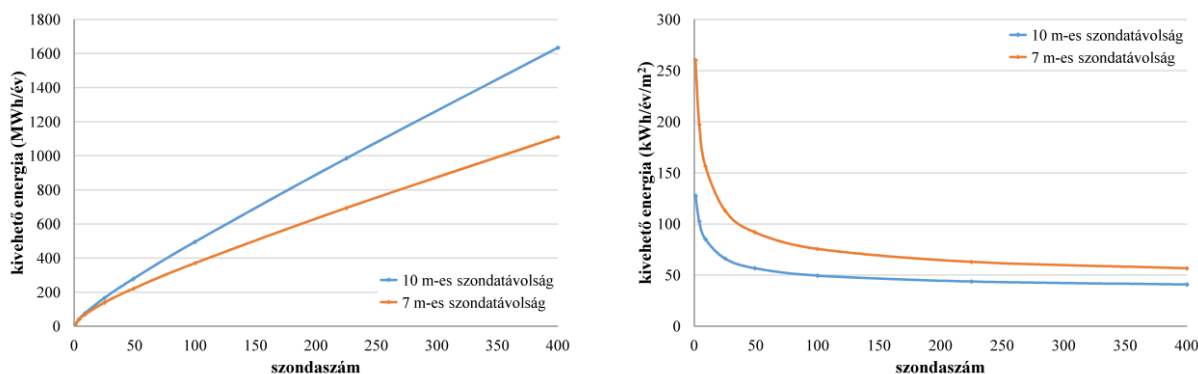
3. ábra. A kivehető energia függése a szondahossztól magányos szonda esetén

Szondamezőkben a kivehető hőteljesítmény jelentősen nő, egy nagy méretű szondamező GWh/év nagyságrendű hőenergiát is szolgáltathat. A kivehető energiára jelentős hatással van a szondamező nagysága, alakja és a hőszondák távolsága is. Egy 100 m mélységig kialakított 12 hőszondás szondamező esetében a kivehető éves energiamennyiség 60–115 MWh/év, a hőszondánként kivehető energia 5,0–9,6 MWh/év, a fajlagos hőkivétel 79,5–708,6 kWh/év/m² (4. ábra). Az egy vonalban elhelyezkedő hőszondák esetén a kivehető energiamennyiség a 3*4-es szondakiosztás értékeihez képest a szondatávolságtól függően 20–30%-kal több, mivel nincsenek belső hőszondák, így a hőszondák hűtőpótlódása kedvezőbb. A kisebb szondatávolság esetén a kivehető fajlagos energia többszöröse a nagyobb szondatávolság esetén meghatározott értéknek, melynek oka, hogy a hőszondák közötti tér energiataralmát nagyobb százalékban lehet kivenni kisebb szondatávolsággal.

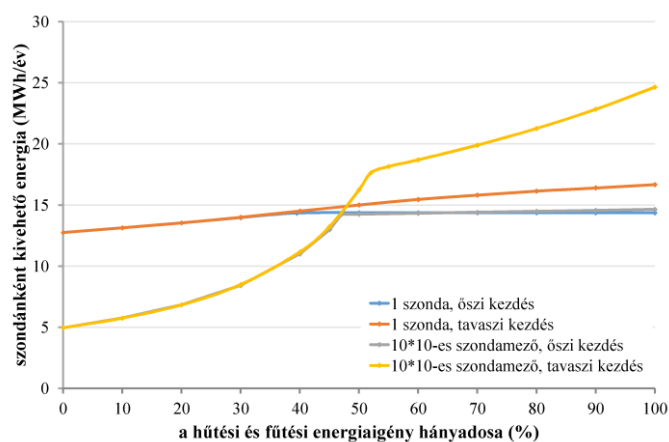
A 100 m-es hőszondákból álló nagy méretű, négyzet alakú szondamező esetében elvégzett elemzés alapján a belső hőszondák számának növekedésével az egy hőszondára eső kivehető energiamennyiség csökken: a magányos hőszondákra meghatározott 12,75 MWh/év értékről például 10 méteres szondatávolság esetén egy 10*10-es szondamezőben 4,95 MWh/év, egy 20*20-as szondamező esetén 4,09 MWh/év, 34*34-es szondamező esetén 3,73 MWh/év értékre. 7 méteres szondatávolság esetén az eredmények rendre 3,70 MWh/év, 2,77 MWh/év és 2,40 MWh/év, azaz a magányos hőszondához képest a technikai potenciál nagy szondamezőben akár az ötödére is eshet (4. ábra). A jelenlegi tervezési gyakorlat a hőszondákból kivehető energiamennyiség és a rendelkezésre álló terület alapján méretez, így jellemzően a 7–10 m-es szondatávolságot használja.



4. ábra. A kivehető energia függése a szondatávolságtól és a szondakiosztástól 12 darab 100 m-es hőszonda esetén



5. ábra. 100 méteres hőszondákból álló szondamezőből kivehető energia a szondaszám és a szondatávolság függvényében



6. ábra. Kivehető energia a betáplált energia aránya függvényében magányos hőszonda és szondamező esetén

A nyári – hűtésből vagy más többlethőből származó – energia felszín alá vezetése regenerálja a hőszondák körüli terek hőmérsékletét, így a kivehető energia mennyisége nő. Ennek aránya függ a szondamező geometriai paramétereitől, de attól is, hogy fűtéssel vagy hűtéssel kezdik az üzemelést (őszi kezdés, illetve tavaszi kezdés). A magányos hőszonda esetében a kitermelhető energia fűtési időnyel való kezdés esetén jelentős arányú hővisszatáplálással is csupán 12,7%-kal növelhető, míg egy szondamező esetében a potenciál akár 3-5-szörös is lehet megfelelő hővisszatáplálással, amivel a hőszondánként kivehető érték a magányos hőszondának megfelelő értéknél nagyobbá tehető (6. ábra).

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A hőszondás kiépítésű geotermikus hőszivattyús rendszerekkel ténylegesen kivett környezeti energiát – csakúgy mint a napenergiát – a rendelkezésre álló potenciál, a rendelkezésre álló hely és a hőigény is jelentősen befolyásolja [15] [16]. A technikai potenciálként értelmezhető, fűtési üzemmódban hőszondánként kivehető energiamennyiség szondamezőben a magányos hőszonda esetére meghatározott 12,75 MWh/év értékhez képest szignifikánsan csökken, a hatás a belső hőszondák nagyobb aránya esetén és a kisebb szondatávolság esetén jelentősebb, így a legkisebb meghatározott érték (34*34-es szondamező 7 m-es szondatávolság esetén) 2,4 MWh/év. Azonban ennek fajlagos értéke, azaz a szondamező 1 m² felületére eső érték esetében a kisebb szondatávolság jelent nagyobb fajlagos energiát. A különbségek a maximális és minimális értékek között a vizsgált modellekben kb. tízszeresek. Figyelembe véve a leggyakrabban harántolt rétegek jellemző hővezetési tényezőinek tartományát és az ebből levezetett méretezési értékeket [2] a földtani adottság néhány extrém esettől eltekintve kb. háromszoros technikai potenciálkülönbséget okoz, azaz a kiépítés hatása a technikai potenciálra összemérhető nagyságú, vagy nagyobb, mint a földtani adottság hatása.

A technikai potenciál értékét jelentősen befolyásolja, ha a hűtési energiaigény kielégítését is hőszondák segítségével érik el. A felszín alá elvezetett hő raktározódik, regenerálja a hőmérsékletet, így a szondamezők belsejének (túl)hűlése csökkenthető, a szondamezők hőszondáinak potenciálja megfelelő méretezéssel akár megegyező lehet a magányos hőszondák értékével. Ez különösen abban az esetben lesz fontos, ha hőszondák vagy kis szondamezők üzemelnek majd egymás mellett külön üzemeltetésben, mert így az egyes rendszerek egymás lehetőségeit nem csökkentik.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] J.W. Lund és A. Tóth, "Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review", 2021.
- [2] K. Ochsner, Geothermal Heat Pumps. A Guide to Planning and Installing, London : Earthscan, 2007
- [3] W.J. Eugster és L. Rybach, "Sustainable Production from Bore-hole Heat Exchanger Systems", 2000.
- [4] P. Bayer, G. Attard, P. Blum és K. Menberg, "The geothermal potential of cities", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 106, pp. 17–30, 2019.
- [5] L.J.P. Muffler és R. Cataldi, "Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources", Geothermics, 7, pp. 53–89, 1978.
- [6] L. Rybach, "Classification of geothermal resources by potential", Geothermal Energy Science, 3, 13–17, 2015.
- [7] J. Ondreka, M.I. Rüsgen, I. Stober, I. és K. Czurda, "GIS-supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany – Possibilities and limitations", Renewable Energy, 32, pp. 2186–2200, 2007.
- [8] K. Schiel, O. Baume, G. Caruso és U. Leopold, "GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO₂ emission mitigation in urban areas", Renewable Energy, 86, pp. 1023–1036, 2016.
- [9] A. Galgaro, E. Di Sipio, G. Teza, E. Destro, M. De Carli, S. Chiesa, A. Zarella, G. Emmi és A. Manzella, "Empirical modeling of maps of geo-exchange potential for shallow geothermal energy at regional scale", Geothermics, 57, pp. 173–184, 2015.
- [10] H.S. Carslaw és J.C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., London : Oxford University Press, 1959.
- [11] M. Philippe, M. Bernier és D. Marchio, "Validity ranges of three analytical solutions to heat transfer in the vicinity of single boreholes", Geothermics, 38, pp. 407–413, 2009.
- [12] P. Eskilson, "Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes", Ph.D. Thesis. University of Lund, Lund, Sweden, 1987.
- [13] "Earth Energy Designer" 2022 [Online]. Available: <https://buildingphysics.com/eed-2/>
- [14] T. Buday, Gy. Szabó, I. Fazekas, M. Paládi, Sz. Szabó, G. Szabó és A. Kerényi, "Annual pattern of the coefficient of performance considering several heat pump types and its environmental consequences", International Review of Applied Sciences and Engineering, 5, pp. 173–179, 2014.
- [15] Sz. Szabó, P. Enyedi, M. Horváth, Z. Kovács, P. Burai, T. Csoknyai, G. Szabó, "Automated registration of potential locations for solar energy production with Light Detection And Ranging (LiDAR) and small format photogrammetry", Journal of Cleaner Production, 112, pp. 3820–3829, 2016.
- [16] T. Buday, „Geotermikus hőszivattyús rendszerek primeroldali kiépíthetőségének térinformatikai vizsgálata városi területeken”, 2016.

A trágyázás okozta talajvízszennyezés kutatása növénytermesztési kísérleti telepeken

Investigation on groundwater pollution caused by fertilization at crop production experimental sites

Hajnal Andor^{1*} – Csige István² – Szabó Szilárd³ – Szabó György⁴ – Mester Tamás⁴

¹ Isotoptech Zrt., 4026, Debrecen, Bem-tér 18/C, hajnal.andor024@gmail.com

² Debreceni Egyetem, Atommagkutató Intézet, Környezetfizikai Tanszék, 4026, Debrecen, Bem-tér 18/C, csige.istvan@atomki.hu

³ Debreceni Egyetem, Természetföldrajzi és Geoinformatikai Tanszék, 4032, Debrecen, Egyetem tér 1., szabo.szilard@science.unideb.hu

⁴ Debreceni Egyetem, Tájvédelmi és Környezetföldrajzi Tanszék, 4032, Debrecen, Egyetem tér 1., szabo.gyorgy@science.unideb.hu
mester.tamas@science.unideb.hu

Összefoglaló: A precíziós mezőgazdaság egyik célkitűzése, hogy a növénytermesztés során alkalmazott különféle trágyázási technológiák optimalizálásakor a potenciális talajvízszennyezés csökkentését is figyelembe vegye. A trágyázás okozta talajvízszennyezés kutatása céljából a Debreceni Egyetem nyíregyházi és látóképi mintaterületein megfigyelő kúthálózatot létesítettünk. Rendszeres adatgyűjtésünk (vízszint, talajfizikai, vízkémiai és izotóphidrológiai paraméterek) eredményeinek felhasználásával a telítetlen és a telített zóna összekapcsolt szivárgáshidraulikai és szennyezőanyag-terjedés modellszámításával a transzportfolyamatok jobb megismerését tűztük ki hosszú távú célként.

Kulcsszavak: precíziós mezőgazdaság, trágyázás, nitrátszennyeződés, talajvíz

Abstract: One of the main objectives of precision agriculture is to take into account the reduction of potential groundwater pollution when optimizing the various fertilization technologies used in crop production. In order to research the groundwater pollution caused by fertilization, we established a network of wells in the sample areas of the University of Debrecen in Nyíregyháza and in Látókép. Using the results of our regular data collection (water level, soil physics, hydrochemical and isotope hydrology parameters), we set a better understanding of transport processes as a long-term goal with model calculations of the combined unsaturated and saturated zone leakage hydraulics and pollutant transport.

Keywords: precision agriculture, fertilization, nitrate contamination, groundwater

1. BEVEZETÉS

Az emberiség előtt álló globális kihívások között előkelő helyen található a víz problémája. Az emberiség jelentős része már most sem jut hozzá egészséges ivóvízhez, korlátozott a mezőgazdasági, ipari tevékenységhez szükséges vízkészlet, ugyanakkor növekszik a vízszennyezés mértéke. Hazánk a vízellátás szempontjából viszonylag kedvező adottságokkal rendelkezik, de vízgazdálkodásunk, vizeink hasznosítása, minőségének védelme, hosszú távú fenntarthatóságának biztosítása messze nem optimális. Mezőgazdasági területeink, lakott településeink talajvízkészlete szinte mindenhol szennyezett, emberi, állati fogyasztásra alkalmatlan [1].

A mezőgazdaságban a káros hatások minimalizálása érdekében kitűnő lehetőséget nyújthat a precíziós mezőgazdasági termelés és biogazdálkodás térnyerése. A fejlett államokban ez a tevékenység hatalmas figyelmet kap mind a döntéshozók, mind pedig a termelők részéről. Összetett, természettudományos vizsgálatok bizonyítják a precíziós és biogazdálkodás jótékony környezeti hatását szemben a hagyományos termeléssel. Pozitív hozadékai közül megemlíthető az emberi egészség védelme közvetetten a környezet védelmén keresztül, mint például a talajvíz lehetséges elszennyeződésének csökkentése az optimalizált tápanyag-utánpótlás megtervezésével. Gazdasági szempontból szintén nem elhanyagolható a hatékonyság és termésátlagok növelése, valamint a költségek csökkentése sem, de érdemes figyelembe venni azt is, hogy kevesebb üvegházhatású gáz keletkezik [2] [3].

Hazánkban is egyre elterjedtebb a környezetkímélő technológiák és anyagok használata a mezőgazdaságban. A kutatásaink céljai közé tartozik többek között a környezetkímélő mezőgazdasági gyakorlat elősegítése. Ehhez a legmodernebb tudományos módszereket alkalmaztuk, hogy minél valóságghűbben megismerhessük a felszín alatti vizek áramlásának tulajdonságait, illetve a műtrágyák és azok bomlástermékei terjedésének mozgatóerőit.

A független, hosszú távú adatgyűjtés folytatása érdekében két mezőgazdasági mintaterületen megfigyelő kúthálózatot telepítettünk. Az így begyűjtött adatokat statisztikai feldolgozás után numerikus szimulációk sorozatában

alkalmazva a végső célunk egy olyan kapcsolt szennyeződésterjedési modell felépítése volt, mely együtt képes kezelni a telített és a telítetlen zónában uralkodó folyamatokat.

2. A MINTATERÜLETEK BEMUTATÁSA

Vizsgálataink helyszínül két mezőgazdasági területet választottunk, melyek több mint harminc éve szolgálnak laboratóriumként a tudomány művelőinek szolgálatában. A tápanyagok utánpótlása kontrollált és jól dokumentált formában történik, parcellánként különböző mértékben. Szerves trágyát és szervesetlen műtrágyát is alkalmaznak a növények tápanyagellátására. Ezen tartamkísérletek előremutató eredményeit több hazai tanulmány, illetve nemzetközi források bevonásával készített jelentés is a szélesebb tudományos társadalom elé tárta [4] [5] [6] [7].

A Látóképi Kísérleti Telep Debrecentől 15 kilométerre nyugatra, a Látóképi-víztározó közvetlen szomszédságában, míg a Nyíregyházi Kísérleti Telep Nyíregyházán, a repülőtér és a telep nevét adó Westsik Vilmosról elnevezett út között található (1. ábra).



1. ábra. A kísérleti telepek és a megfigyelőkutak elhelyezkedése

2.1. A Látóképi Kísérleti Telep

A Látóképi Kísérleti Telepen 1983 óta 150 ha-on folynak tartamkísérletek. A terület talaja löszön képződött, mély humuszrétegű alföldi mészlepedékes csernozjom. Két részre osztható művelés és tápanyag-utánpótlás szempontjából. Az északi 70 ha-os területen beállított tartamkísérletek és műtrágya alkalmazása a jellemző, míg a déli 80 ha-os területen 1985 óta ökológiai gazdálkodás folyik szerves trágyát alkalmazva. Az aszályosabb időszakokban öntözéssel csökkentik a vízhiányt, melyet a tározóból automatizált lineárok segítségével oldanak meg. A területet a keleti oldalához közelebb

eső kiemelkedés szeli ketté északkelet-délnyugat irányban, amely az általános talajvízáramlási irány is egyben. Mindkét oldalon elég nagy a lejtés ahhoz, hogy egy intenzívebb esőzés alkalmával a lefolyás jelentős mértékű eróziót váltson ki.

2.1. A Westsik Kísérleti Telep

1929 óta nagyjából 12,5 ha-on 15 vetésforgó található. A kísérleti telep talaja alacsony humusztartalmú, savanyú kémhatású, laza homoktalaj. Westsik Vilmos a homoktalajok termékenységének javításához meghatározónak tartotta a talaj szervesanyag-tartalmának növelését, ezért a vetésforgókban különféle szerves trágyázási módokat alkalmazott (zöldtrágyázás, istállótrágyázás, szalmatrágyázás). A látóképi területhez hasonlóan itt is húzódik egy magasabb gerinc észak-déli irányban a terület keleti oldalához közelebb. A nyugati oldalon sokáig folytak energiafüzzel kapcsolatos kísérletek. A talajvíz délről szivárog északi irányba.

3. MŰSZEREK ÉS MÓDSZEREK

A Látóképi Kísérleti Telepen 2020 októberében kialakításra került 6 db monitoringkút, melyből 5 darab mélysége eléri a 10 métert. Ezen kutak 4–8 m között vannak szűrőzve, és 2 m hosszú iszapzsákkal vannak ellátva. Kivétel az LF-3-as jelű kút, mely 5 m mély, 2 és 4 m között van a szűrő elhelyezve, és 1 m hosszú iszapzsák zárja le.

A Westsik Kísérleti Telepen 2020. májusában került sor 3 darab 10 méter mély megfigyelőkút kialakítására, hasonló elvek és műszaki adatok alapján, mint Látóképen. Mindkét terület rendelkezik önálló meteorológiai állomással. Míg a látóképi adatok hiányosak és kevésbé pontosak, addig a nyíregyházi adatok kellően részletesek.

A furatok létesítése során félméterenként üledékmintát vettünk a szemcseméret-eloszlás meghatározása céljából. A szemcseméret-eloszlást szítalással és ülepitéssel végeztük.

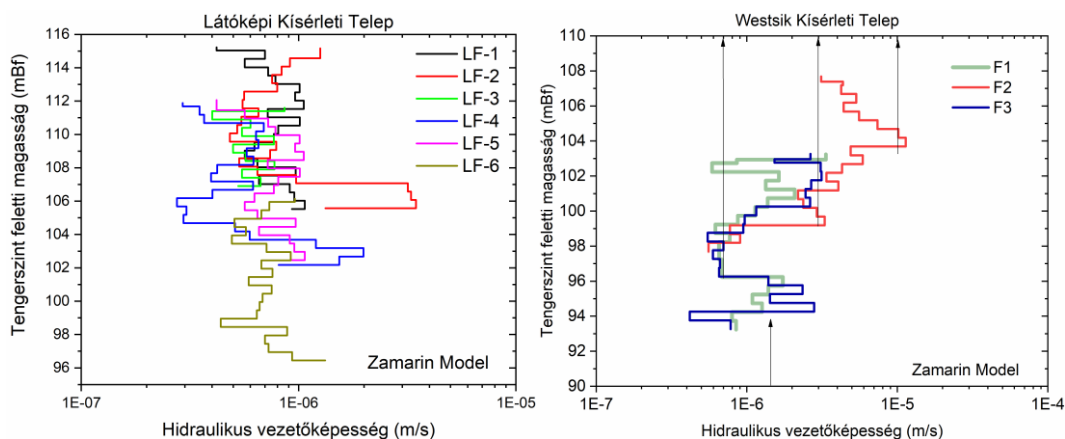
A terepi kampányokat úgy terveztük, hogy havonta egy mérési adatunk legyen. A kezdeti időszakban ezt kibővítettük heti mérésekkel, hogy képet kapjunk a vízszintingadozások dinamikájáról. A terepi vízszintmérő műszer magában foglalt egy vezetőképesség- és hőmérséklet szenzort is. Kezdetben csak néhány kiválasztott kútban, később az összes kútban vezetőképesség- és hőmérsékletprofilokat vettünk fel. A nyugalmi vízszint, a hőmérséklet és vezetőképesség mérései után tisztító szivattyúzással kitermeltük a kutak térfogatának a háromszorosát, és csak ezután történt a mintavétel és a következő vízminőségi paraméterek mérése: pH, sótartalom, redoxpotenciál, összes oldott anyag, elektromos vezetőképesség és hőmérséklet. A laboratóriumban pedig minden mintavétel alkalmával meghatároztuk a begyűjtött vízminták ammónium- (NH_4^+), nitrit- (NO_2^-), nitrát- (NO_3^-), ortofoszfát- (PO_4^{3-}), valamint szervesanyag- (KOI_{ps}) tartalmát [8], emellett vizsgáltuk a minták makro- és mikroelem-tartalmát is.

A Látóképi Kísérleti Telepen 2021 októberében bolygatatlan talajmintavételt végeztünk az LF-2 számú kút környezetében. A talajmintákat 70 cm hosszú, légmentesen lezárt PVC-csővekbe vételeztük. A laboratóriumi feldolgozás során a 20 cm-es almintákból fagyasztásos vákuumdesztillációval kinyertük a talajnedvességet. A vízmintákból $\delta^{18}O$ izotóparány eltolódást határoztunk meg [9], Thermo Fischer Scientific gyártmányú Delta plus XP stabilizotóparány-mérő tömegspektrométert alkalmazva.

4. EREDMÉNYEK ÉS DISZKUSSZIÓ

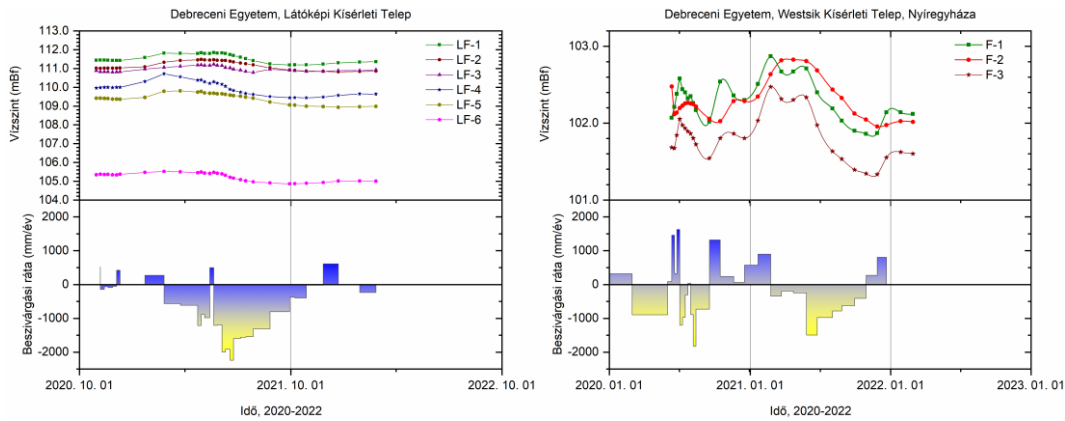
4.1. Szivárgáshidraulikai paraméterek

A Zamarin-moddellel becsült hidraulikus vezetőképesség a tengerszint feletti magasság függvényében látható a 2. ábrán. Ezeket az eredményeket használhatjuk a hidrodinamikai modellezés során a rétegek azonosítására is, amely a Westsik Kísérleti Telepen különösen jól alkalmazható. A látóképi telepen az egyes fúrások közötti eltérésekből a rétegek dőlésére következtethetünk.



2. ábra. A szemcseméret-eloszlásból becsült hidraulikus vezetőképesség a tengerszint feletti magasság függvényében

A hidrodinamikai modellezéshez határfeltételként használtuk a mért csapadékadatok és a becsült evapotranspiráció-adatok különbségeként előállított beszivárgást (3. ábra alsó része). A hidrodinamikai modellek kalibrálására a fúrásokban mért vízszintet (3. ábra felső része) használtuk.

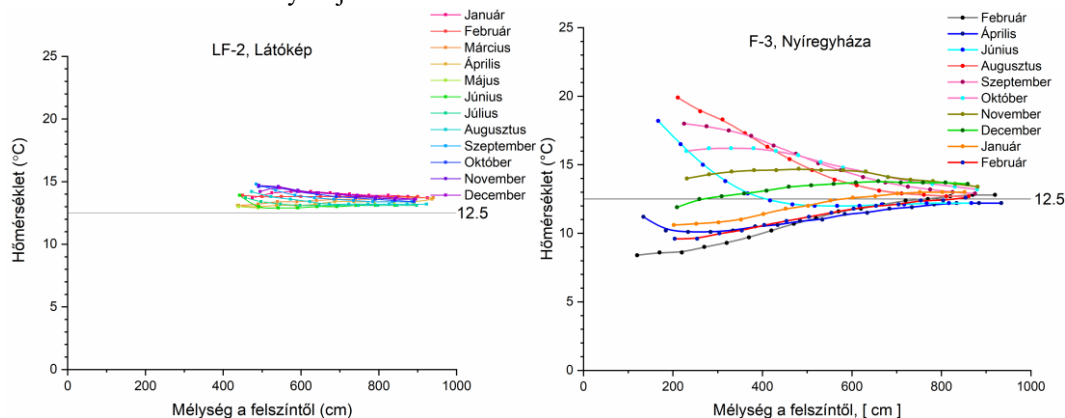


3. ábra. A mért vízszintek és a mért csapadékadatokból és a becsült evapotranspiráció-adatok különbségéből számított beszivárgás

A két talajtípus közötti különbség jól megfigyelhető a vízszintek időbeli változásában is. Míg Nyíregyházán nagy a dinamika, és az egyes fúrásokban lévő vízszintek még keresztezik is egymást, addig Látóképen sokkal simábbak a vízszintgörbék. Ez utóbbi részben köszönhető a Látóképi-tározó kiegyenlítő hatásának is. A kutatási területeken húzóó kiemelkedések vonalában, mélyített kutakban (LF-1, LF-2, LF-5, F-2) 4–5 méter mélyen feszül a víztükörszint. A többi kútban ugyanez az érték 2–3 méter között ingadozik a felszínhez viszonyítva.

4.2. Hőmérsékletprofilok

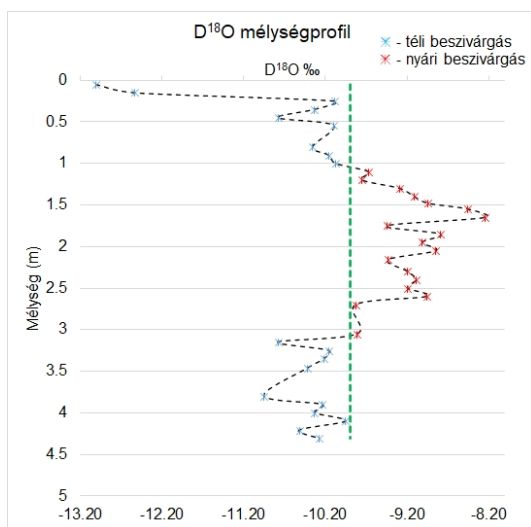
Jelentős különbség van a nyíregyházi és a látóképi területen a fúrások vízében in-situ mért hőmérsékletprofilokban is (4. ábra). Egyrészt Nyíregyházán sokkal nagyobbak a változások (ugyanakkora felszíntől mért mélységben), másrészt a látóképi fúrásoknál a talppontonál mért hőmérsékletek szignifikánsabban magasabbak, mint a nyíregyháziaknál mérték. Ezek a különbségek részben szintén az eltérő talajtípusokkal magyarázhatók, másrészt a telítetlen zóna vastagságával is, mivel a telítetlen zóna hővezetési tényezője kisebb a telítetténél.



4. ábra. Jellemző hőmérsékletprofilok a látóképi és a nyíregyházi területek legmagasabb pontján lévő megfigyelőfúrások vízében

4.3 Pórusvíz stabilizotóp-arány mérései

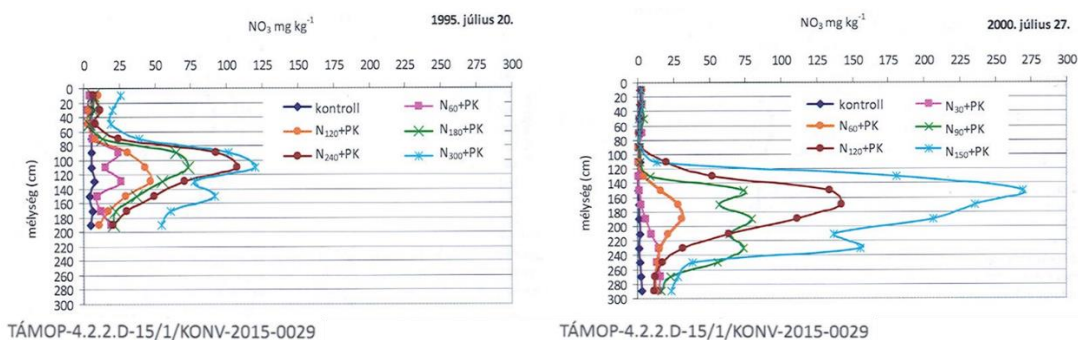
A telítetlen zónában a beszivárgó csapadékvíz mozgása alapvetően függőlegesen lefelé irányul. Mivel a csapadékvíz a $\delta^{18}\text{O}$ izotóparány-eltolódása hőmérsékletfüggő, ezért szezonális változást mutat (abszolút értékben nyáron kisebb, télen nagyobb). Ezt felhasználhatjuk a lefelé szivárgó víz szivárgási sebességének becslésére. Az 5. ábra szerint azt mondhatjuk, hogy a mintavétel helyén a csapadékvíz 1-2 éven belül eléri a telített zónát.



5. ábra. A Látóképi Kísérleti Telepen az LF-2 fúrás közelében a telítetlen zónából vett talajminták nedvességtartalmának $\delta^{18}\text{O}$ izotóparány-eltolódása a felszíntől való mélység függvényében

4.4 Nitrátprofilok

A telítetlen zónában becsült szivárgási sebesség alapján értelmezhetjük az [5] irodalomból átvett nitrátprofilok alakját is. Az 1995 és 2000 júliusában végzett nitrátprofilmérések eredményei (6. ábra) egyaránt jelentős nitrátkoncentrációt mutatnak a gyökérszóna alatt, de még a talajvíztükör fölött is. Ez azt mutatja, hogy a nitrátkimosódás jelentős volt, és tekintettel az izotóparány-eltolódásból becsült szivárgási sebességre az feltételezhető, hogy ez a nitrátszennyezés kb. 1 év alatt eléri a telített zónát.



6. ábra. A Látóképi Kísérleti Telep talajában 1995 és 2000 júliusában mért nitrátkoncentráció-eloszlások a mélység függvényében [5]

Az eddig feldolgozott adatok alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a telítetlen zónában uralkodó folyamatok ismerete rendkívüli módon segíti a talajvíz nitráttérhelésének megbízható becslését. Az izotóphidrológiai vizsgálatok alkalmazásával kideríthetjük a talajvízben található nitrát forrásának eredetét, a függőleges terjedésének sebességét, illetve bomlását és akkumulációját befolyásoló fizikai és kémiai tényezőket. Körültekintően kell eljárunk a kapcsolt modellezés folyamatánál, hogy a területek határain kívülről érkező nitrát-hozzájárulást elkülöníthessük a vizsgált területeken belül kimosódó nitrátmennyiségtől. Habár jelenleg csak a Látóképi Kísérleti Telepen alkalmaztuk ezeket a hasznos információkat nyújtó vizsgálatokat, terveink szerint hamarosan a nyíregyházi telepen is hasonló méréseket fogunk elvégezni. A kutatás eszközeinek alkalmazásával szeretnénk a precíziós és biogazdálkodással foglalkozó szakemberek munkáját megkönnyíteni, és ezáltal a környezetünk védelméhez hozzájárulni.

Köszönetnyilvánítás

A TKP2020-IKA-04 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2020-4.1.1-TKP2020 pályázati program finanszírozásában valósult meg. A TKP2021-NKTA-32 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Köszönetet mondunk a Hertelendi Ede Környezetanalitikai Laboratórium tudományos csapatának (HEKAL – Kiváló Kutatási Infrastruktúra, 2021). A szakmai tudásuk és infrastruktúrájuk biztosításával hozzájárultak a kutatásban alkalmazott izotóphidrológiai vizsgálatok megvalósításához és hasznos információ megszerzéséhez.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] 221/2004. (VII. 21.) Korm. rendelet a vízgyűjtő-gazdálkodás egyes szabályairól
- [2] M. Gutiérrez, R.N. Biagioni, M.T. Alarcón-Herrera, B.A. Rivas-Lucero, "An overview of nitrate sources and operating processes in arid and semiarid aquifer systems", *Science of the Total Environment*, 624, pp. 1513–1522, 2017.
- [3] L. Rakotovololona, N. Beaudoin, A. Ronceux, E. Venet, B. Mary, "Driving factors of nitrate leaching in arable organic cropping systems in Northern France", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 272, pp. 38-51, 2018.
- [4] Nagy J., "The effect of fertilization and precipitation on the yield of maize (*Zea mays* L.) in a long-term experiment", *Időjárás*, 116(1), pp. 39–52, 2012
- [5] Nagy J., Pepó P. (szerk.), *Tartamkísérletek : Debrecen-Látókép*, Debrecen : Debreceni Egyetem Agrártudományi Központ, 2014.
- [6] Csajbók J., „A növényi produkciót befolyásoló talajfizikai, vízgazdálkodási, tápanyaggazdálkodási tulajdonságok interaktív vizsgálata”, 2005. évi szakmai zárójelentés, OTKA: T037958, 2006
- [7] Romhány L. (szerk.), *A talaj-növény rendszer szénforgalmának vizsgálata*, Nyíregyháza : Debreceni Egyetem Agrártudományi Központ, 2012.
- [8] Literáthy P., *Egységes vízvizsgálati módszerek I. Kémiai módszerek*, 1. kötet, Budapest : Vízgazdálkodási Tudományos Kutatóintézet IV. vízminőségi és víztechnológiai Főosztálya, 1973.
- [9] Clark, I.D., Fritz, P., *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, CRC Press, pp. 63–85., 1997.

A brojlercsirketartás környezeti terhelésének meghatározása

Assessment of environmental impact of broiler chicken breeding

Kiss Nikolett Éva^{1*} – Tamás János¹ – Nagy Attila¹

¹Debreceni Egyetem, Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar, Víz- és Környezetgazdálkodási Intézet; *kiss.nikolett@agr.unideb.hu

Összefoglaló: Az intenzív brojlercsirketartás életciklus-értékelését már több kutató is elvégezte, ám magyarországi és közép-kelet-európai viszonylatban még nem állnak rendelkezésre adatok. Jelen kutatás során egy magyarországi brojlercsirke-tenyésztő telep környezeti terhelése volt vizsgálva, az életciklus-értékelés (life cycle assessment, LCA) módszertanát alkalmazva. Az elemzésbe 11 hatáskategória lett bevonva: az elemek abiotikus kimerülési potenciálja (ADPe), a fosszilis tüzelőanyagok abiotikus kimerülési potenciálja (ADPf), savasodási potenciál (AP), eutrofizációs potenciál (EP), globális felmelegedési potenciál (GWP), ózonlebontó potenciál (ODP), fotokémiai oxidációs potenciál (POP), humán toxicitási potenciál (HTP), édesvízi ökotoxicitási potenciál (FAETP), tengervízi ökotoxicitási potenciál (MAETP) és szárazföldi ökotoxicitási potenciál (TETP). Az eredmények alapján a 11-ből nyolc hatáskategória esetében (ADPe, AP, EP, GWP, POP, FAETP, HTP, TETP) a környezetterheléshez egyértelműen a takarmányozás és az ahhoz kapcsolódó folyamatok járultak hozzá. Az ADPf, ODP és MAETP hatáskategóriáknál a földgázfogyasztás, a szállítási folyamatok és az elektromos áramfogyasztás járultak hozzá leginkább a környezetterheléshez.

Kulcsszavak: brojlercsirketartás, életciklus-értékelés, környezeti hatás

Abstract: Life cycle assessment of intensive broiler chicken production has been carried out by several researchers, but there is no data available yet for Hungary and Central and Eastern Europe. In the present study, the environmental impact of a broiler chicken farm in Hungary was assessed using life cycle assessment (LCA) methodology. Eleven impact categories were included in the analysis (abiotic depletion potential of elements (ADPe), abiotic depletion potential of fossil fuels (ADPf), acidification potential (AP), eutrophication potential (EP), global warming potential (GWP), ozone depletion potential (ODP), photochemical oxidation potential (POP), human toxicity potential (HTP), freshwater ecotoxicity potential (FAETP), marine ecotoxicity potential (MAETP) and terrestrial ecotoxicity potential (TETP)). The results showed that 8 out of 11 impact categories (ADPe, AP, EP, GWP, POP, FAETP, HTP, TETP) that were clearly contributed to the environmental burden caused by feeding and related processes. For the ADPf, ODP and MAETP impact categories, natural gas consumption, transport processes and electricity consumption were the main contributors to the negative environmental impact.

Keywords: broiler chicken breeding, life cycle assessment, environmental impact

1. BEVEZETÉS

Az 1990-es évek óta a világon tenyésztett brojlercsirkék száma megduplázódott. Míg 2000-ben 14,38 milliárd brojlercsirke volt világszerte, addig 2020-ban már közel 33,1 milliárd [1]. Az intenzív növekedés leginkább a népességnövekedésnek köszönhető, mivel a csirkehús fontos és gyorsan előállítható [2] [3]. Emellett az állattartási ágazatok, beleértve a brojlercsirketartást is, az élelmiszer-ellátás mellett gazdasági szempontból is fontosak, hiszen hozzájárulnak a munkahely- és jövedelemteremtéshez, az eszközmegtakarításhoz, a gazdasági teljesítményhez és az adókhöz is.

Az állattartó szektorok jelenleg igen nagy kihívás előtt állnak a rohamosan növekvő populáció következtében, amely a legtöbb becslés alapján 2050-re már megközelítheti vagy akár meg is haladhatja a 9,8 milliárdot [4] [5] [6]. A termelési kapacitás növelése nem egyszerű, mivel figyelembe kell venni a föld- és vízhasználati korlátozásokat s a termelőket korlátozó rendeleteket. Így az állattartási ágazatban is kulcsszó a fenntarthatóság, tehát oly módon kell megoldani a minél eredményesebb termelést, hogy az ne veszélyeztesse a természeti erőforrások jövőbeni felhasználását, mindazonáltal igyekezzen kielégíteni a népesség és az állatok táplálékigényét [7]. Általánosságban elmondható, hogy az állattartási rendszerek jelentős hatással bírnak a környezetre, és szennyező hatásuk miatt egyre nagyobb figyelmet kell fordítani a környezetvédelemre [8]. Az ágazat hatással van többek között a klímaváltozásra, a nitrogén- és a foszforkörforgásra, valamint a földhasználati szokások megváltoztatása miatt a biodiverzitás csökkenésére is [9] [10] [11]. A Greenpeace is közzétett egy jelentést, amely szerint az ipari baromfitenyésztés a levegő, a talaj és a víz ammóniaszennyezésének egyik fő forrása. A jelentés kitért arra is, hogy az egészséges életmód és a jólét holisztikus megközelítése szempontjából átfogó megközelítésre van szükség ahhoz, hogy a baromfiipart fenntarthatóbbá és állatbarátabbá tegyék, miközben fenntartjuk a gazdaság életképességét [12].

Magyarországon még nem készült tanulmány a brojlercsirketelep környezeti következményeiről, ezért ebben a tanulmányban egy magyarországi brojlercsirketelep környezeti hatásait elemzem az életciklus-értékelés módszertanával.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

A környezeti hatásvizsgálat egy igen összetett folyamat a mezőgazdaságban. Az életciklus-értékelés (LCA) alapelvei és keretrendszere, valamint az LCA négy fő lépése az ISO14040:2006 szabvány alapján lett meghatározva. Az LCA lépései a következők:

1. A cél és a rendszerhatárok meghatározása: Az első lépés az értékelés célja, a hatókör (rendszerhatárok) és a funkcionális egység meghatározása az életciklus-értékelés kezdetén történik. A jelenlegi életciklus-értékelésben a cél a brojlercsirketartás kritikus termelési pontjainak azonosítása volt. A brojlercsirketartás életciklus-értékelése során a gazdaságban történő termelést, valamint a naposcsibék és a takarmány gazdaságba történő szállítását vettük figyelembe. Mivel a funkcionális egység 1 tonna brojlercsirke élősúlya, az eredmények az 1 tonna brojlercsirke előállításának környezeti hatását tükrözik.

2. Életciklus-leltárelemzés: Az LCA második lépése az életciklus-leltárelemzés, amely számszerűsíti az életciklus során keletkező inputokat és outputokat. Jelen életciklus-értékelés input és output anyag- és energiaáramait foglalja össze az 1. táblázat.

1. táblázat. A brojlercsirketelep életciklus-leltárelemzése

Input anyag- és energiaáramok	
Naposcsibe (db)	256 000,0
Takarmány (t)	1 177,9
Vitaminok (kg)	113,3
Ivóvíz (t) (takarításhoz is)	6 265,5
Alom (szalma pellet) (t)	24,3
Elektromosság, kiefeszültség (kWh)	53 059,7
Fűtés, földgázzal (m ³)	43 101,9
Output anyag- és energiaáramok	
Főtermék: vágásra leadott csirke (db)	243 831,4
Vágásra leadott csirke (t)	615,0
Trágya (t)	106,8
Technológiai szennyvíz (t)	103,5
Levegőbe történő emisszió:	
Ammónia (NH ₃) (t)	3,74
Metán (CH ₄) (t)	0,53
Dinitrogén-oxid (N ₂ O) (t)	4,01
Nitrogén-oxidok (NO _x) (t)	0,04

A folyamatba bevont anyag- és energiaáramok közé tartoznak a naposcsibék, a takarmány, az ivóvíz, az alom, a szellőzéshez és a takarmány elosztásához szükséges energia, a fűtéshez szükséges gáz. Ide tartozik az istállók körforgás végén történő tisztításához szükséges vízmennyiség is. Az output anyagáramok közül a legfontosabb természetesen maga a főtermék, a vágócsirke, amiért a termelés folyik. A legfontosabb melléktermék a trágya, amelynek szakszerű tárolásáról és felhasználásáról kötelesek gondoskodni a gazdák.

Az adatok többségét a vizsgált brojlercsirketelep biztosította, míg például a levegőbe történő emisszió esetében szakirodalmi adatokat vontuk az elemzésbe. Az értékelés során 3 év átlagértékeit vettük alapul.

3. Életciklus-hatásvizsgálat: Az LCA harmadik lépése az életciklus-hatásvizsgálat (LCIA, Life Cycle Impact Assessment), amely a leltárelemzés során gyűjtött adatok feldolgozását és értékelését foglalja magában. A gyakorlatban az életciklus-értékeléseket szoftverek segítségével végzik. Ehhez az értékeléshez az OpenLCA szoftvert választottuk, mivel az elemzés minden szintjére vonatkozóan teljes anyag- és energiaáramlási készletet biztosít. Az elemzéseket az ingyenesen letölthető Agribalyse adatbázisban végeztük el, amely nagy mennyiségű adatot tartalmaz az összes szükséges elemzéshez [13] [14]. Hatásértékelő módszerként a CML IA baseline-t alkalmaztuk, amely nemzetközileg elfogadott és igen széles körben használt módszer [15]. A CML IA baseline hatásértékelő módszer az életciklus-értékelés 11 leggyakrabban alkalmazott hatáskategóriája alapján értékeli a vizsgált folyamatokat, termékeket [16] (2. táblázat).

2. táblázat. Az életciklus-értékelés során alkalmazott hatáskategóriák

Hatáskategória	Rövidítése	Mértékegysége
1. Elemek abiotikus kimerülési potenciálja – Abiotic depletion potential for elements	ADPe	kg Sb-egyenérték
2. Fosszilis tüzelőanyagok abiotikus kimerülési potenciálja – Abiotic depletion potential of fossil fuels	ADPf	MJ
3. Savasodási potenciál – Acidification potential	AP	kg SO ₂ -egyenérték
4. Eutrofizációs potenciál – Eutrophication potential	EP	kg PO ₄ -egyenérték
5. Globális felmelegedési potenciál – Global warming potential	GWP	kg CO ₂ -egyenérték
6. Ózonlebontó potenciál – Ozone layer depletion potential	ODP	kg CFC-egyenérték
7. Fotokémiai oxidációs potenciál – Photochemical oxidation potential	POP	kg C ₂ H ₄ -egyenérték
8. Humán toxicitási potenciál – Human toxicity potential	HTP	kg 1,4-DB-egyenérték
9. Édesvízi ökototoxicitási potenciál – Fresh water aquatic ecotoxicity potential	FAETP	kg 1,4-DB-egyenérték
10. Tengervízi ökototoxicitási potenciál – Marine aquatic ecotoxicity potential	MAETP	kg 1,4-DB-egyenérték
11. Szárazföldi ökototoxicitási potenciál – Terrestrial ecotoxicity potential	TETP	kg 1,4-DB-egyenérték

4. Az eredmények értelmezése: Az életciklus-elemzés negyedik fázisa az életciklus-leltárelemzés és az életciklus-hatásértékelés fázisainak eredményeiből származó információk azonosítására, számszerűsítésére, ellenőrzésére és értékelésére szolgál.

Az eredmények meghatározása után megállapítottuk, hogy az egyes hatáskategóriákon belül mely folyamatok járulnak hozzá leginkább a környezeti terheléshez. Ehhez a hozzájáruló folyamatokat öt nagy kategóriába soroltuk, ezek a takarmányozás, a szállítási folyamatok, a földgázfogyasztás és elektromosáram-fogyasztás és az egyéb folyamatok, melyek külön-külön kis részben befolyásolják az egyes hatáskategóriákat. A legösszetettebb kategóriát a takarmányozáshoz köthető folyamatok képviselik, ugyanis a takarmánynövények termesztésétől (kukorica, búza, szója, repce) és feldolgozásától kezdve, a kiegészítő ásványi anyagok és vitaminok beszerzésén és szállításán át, a takarmánykeverő üzemből történő kész takarmánykeverék előállításáig terjed. A szállítási folyamatok a takarmányozáson felüli szállítási folyamatokat jelentik ez esetben, melyek a naposcsibék és a takarmány istállóba történő szállítását takarja. A földgáz- és elektromosáram-fogyasztás leginkább az istállóban történő hőmérséklet-szabályozáshoz és a takarmánykiosztáshoz köthető. Az egyéb folyamatok pedig egy olyan kategória, mely összefoglalja azokat a folyamatokat, melyek külön-külön nincsenek nagy hatással az adott hatáskategóriára, illetve csak egy-két hatáskategóriánál fordul elő, mint például a hulladékkezelés vagy a tisztító- és fertőtlenítőszer alkalmazása.

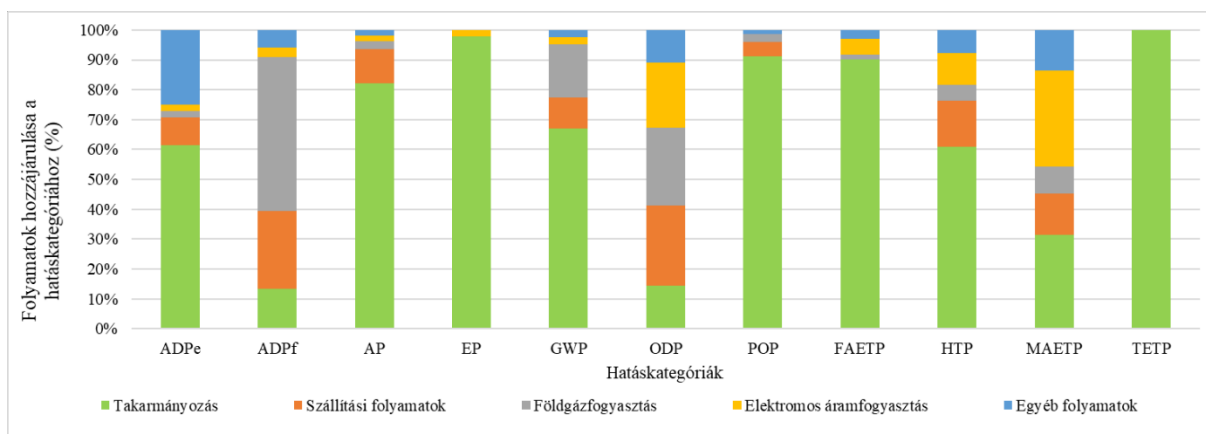
3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTELMEZÉSÜK

Az 1 tonna élősúlyú brojlercsirke tartása során fellépő környezetterhelést foglalja össze hatáskategóriánként a 3. táblázat.

3. táblázat. A brojlercsirketelep életciklus-értékelésének eredményei

Hatáskategória	
Elemek abiotikus kimerülési potenciálja ADPe (kg Sb-egyenérték)	0,00455
Fosszilis tüzelőanyagok abiotikus kimerülési potenciálja ADPf (MJ)	14861
Savasodási potenciál AP (kg SO ₂ -egyenérték)	15,65
Eutrofizációs potenciál EP (kg PO ₄ -egyenérték)	11,71
Globális felmelegedési potenciál GWP (kg CO ₂ -egyenérték)	2253
Ózonlebontó potenciál ODP (kg CFC-11-egyenérték)	0,00018
Fotokémiai oxidációs potenciál POP (kg C ₂ H ₄ -egyenérték)	1,27
Édesvízi ökototoxicitási potenciál FAETP (kg 1,4-DB-egyenérték)	1433
Humán toxicitási potenciál HTP (kg 1,4-DB-egyenérték)	630,8
Tengervízi ökototoxicitási potenciál MAETP (kg 1,4-DB-egyenérték)	658414,5
Szárazföldi ökototoxicitási potenciál TETP (kg 1,4-DB-egyenérték)	516,85

Az egyes folyamatok hozzájárulását a brojlercsirketartás kibocsátásához az 1. ábra ábrázolja. A továbbiakban a 3. táblázatban és az 1. ábrán feltüntetett eredményeket együtt értékelem.



1. ábra. Az egyes folyamatok hozzájárulása a brojlercsirketartás kibocsátásához

ADPe = elemek abiotikus kimerülési potenciálja; ADPf = fosszilis tüzelőanyagok abiotikus kimerülési potenciálja; AP = savasodási potenciál; EP = eutrofizációs potenciál; GWP = globális felmelegedési potenciál; ODP = ózonlebontó potenciál; POP = fotokémiai oxidációs potenciál; FAETP = édesvízi ökotoxicitási potenciál; HTP = humán toxicitási potenciál; MAETP = tengervízi ökotoxicitási potenciál; TETP = szárazföldi ökotoxicitási potenciál

Az ADPe (0,00455 kg Sb-egyenérték) esetében a takarmányozási folyamatok voltak a legnagyobb környezetterhelő hatással, azon belül is a tápanyag-utánpótlás, vagyis a műtrágyák és az előállításukhoz szükséges nyersanyagok. Az ADPe-nél jelentősek voltak még az istállókban a tartási folyamatok eredményeként létrejövő kibocsátások. Giannenas et al. [17] 0,0015 kg Sb-egyenértéket, Lima et al. [18] $8,6 \cdot 10^{-5}$ kg Sb-egyenértéket, Ramedani et al. [19] pedig 0,0173 kg Sb-egyenértéket jegyeztek fel 1 tonna élősúlyú brojlercsirkére vetítve.

Az ADPf-nél leginkább a földgázfogyasztás járult hozzá a kibocsátáshoz. Jelentős hányadot képviselnek még a szállítási folyamatok kibocsátásai. Míg az általunk vizsgált rotációk során 14 861 MJ volt az átlagos ADPf, addig Lima et al. [18] mindössze 150 MJ-t, Ramedani et al. [19] már 184 000 MJ-t számoltak 1 t élősúlyra vonatkoztatva. Lima et al. [18] arra a következtetésre jutottak, hogy mind az ADPe és ADPf hatáskategóriák a takarmány előállításához szükséges energia, valamint fosszilis tüzelőanyagok és ásványi anyagok felhasználásnak köszönhető. Az ADPe esetében hasonló következtetéseket vontunk le, az ADPf-nél pedig azt tapasztaltuk, hogy a földgázfogyasztásnak és a szállítási folyamatoknak is nagy szerepe van.

Az AP-t több kutató is vizsgálta. A jelen kutatásnál tapasztalt érték (15,65 kg SO₂-egyenérték) leginkább Pelletier [20] és Martinelli et al. [21] által mért 15,8 és 17 kg SO₂-egyenértékhez állnak közel. Da Silva et al. [22] egy francia és egy brazil brojlercsirketelepet hasonlított össze, előbbinél 28,7, utóbbinál 31,4 kg SO₂-egyenérték volt az AP. Más szerzőknél 25,9 és 66,7 kg SO₂-egyenérték között alakult [17] [18] [19] [23] [24] [25] [26] [27]. A legtöbb kutató szintén azt tapasztalta, hogy az AP-hez leginkább a takarmányozáshoz köthető folyamatok járulnak hozzá, valamint az elavult trágyakezelési technológiák.

Az EP esetében a környezeti terhelést szinte teljes egészében a takarmányozáshoz köthető folyamatok képviselik. Míg ebben a tanulmányban az EP 11,71 kg PO₄-egyenérték volt, Da Silva et al. [22] a francia és brazil telepek összehasonlítása során 13,8 és 19,3 kg PO₄-egyenérték közötti értékeket tapasztalt. A már említett szerzők közül a legalacsonyabb eutrofizációs potenciált Pelletier [20] tapasztalta, aki az USA-ban 3,9 kg PO₄-egyenértéket mért, míg a legmagasabbat Ramedani et al. [19] jegyezték fel, 78,4 kg PO₄-egyenértékkel.

A GWP-nek kb. 66%-át képviselik a takarmányozáshoz köthető folyamatok. A takarmányozáson belül maga a szántóföld művelése jár a legnagyobb környezetterheléssel a levegőbe történő CO₂- és CH₄-emisszió miatt. A takarmánynövények közül a kukorica termesztése kb. 15%-kal (N₂O, CO₂), az őszi búzáé 8%-kal (N₂O, CO₂) járul hozzá a kibocsátásokhoz a takarmányozás kategóriáján belül. A fennmaradó kibocsátások leginkább a földgázfogyasztáshoz és a szállítási folyamatokhoz köthetők, kismértékben pedig az elektromosáram-fogyasztáshoz és egyéb folyamatokhoz. A más tanulmányokban mért CO₂-egyenértékben megadott értékek is igen változatosak. Míg jelen tanulmányban 2253 kg CO₂-egyenérték volt a GWP, addig a különböző szerzők által mért GWP-nek igen nagy a szórása. A legalacsonyabb értéket Pelletier [20] jegyezte fel (1395 kg CO₂-egyenérték/t élősúly), míg a legmagasabbat (5782 kg CO₂-egyenérték/t élősúly) Payandeh et al. [26]. A legtöbb szerző a GWP-nél is azt a következtetést vonta le, hogy a brojlercsirketartás kibocsátásaihoz leginkább a takarmányozással összefüggésbe hozható folyamatok járulnak hozzá, valamint az elavult trágyakezelési technológiák. Esetünkben az alacsonyabb kibocsátásnak az lehet a magyarázata, hogy a vizsgált telep technológiája igen korszerű, modern trágyaeltávolító berendezésekkel, a szellőztetés optimalizálásával s fedett trágyatárolókkal rendelkezik.

Az ODP esetében jelentősebb hozzájáruló folyamat a földgázfogyasztás, ezt követik a szállítási folyamatok miatti kibocsátások, majd az elektromosáram-fogyasztás és a takarmányozás. Az ODP tekintetében is igen változatosak az egyes szerzők által mért értékek. Kalthor et al. [28] a nyári és téli rotációknál is 0,001 kg CFC-11-egyenértéket mértek, Lima et al. [18] $9,6 \cdot 10^{-7}$ kg CFC-11-egyenértéket, Ramedani et al. [19] pedig 0,00204 kg CFC-11-egyenértéket tapasztaltak.

A POP és FAETP hatáskategóriáknál is 90% körüli volt a takarmányozási folyamatok hozzájárulása az adott hatáskategóriákhoz. A fennmaradó kb. 10%-ot a POP-nál a szállítási folyamatok és a földgázfogyasztás képviseli, a FAETP-nél pedig az elektromosáram-fogyasztás. A POP-nál tapasztalt 1,27 kg C₂H₄-egyenérték Payandeh et al. [26] és Lima et al. [18] által feljegyzett 1,237 és 1,34 kg C₂H₄-egyenértékhez állnak közel, míg Giannenas et al. [17] 5,4 kg C₂H₄-egyenértéket, Ramedani et al. [19] 7,21 kg C₂H₄-egyenértéket, Kalhor et al. [28] 3,22 és 4,39 kg C₂H₄-egyenértéket mértek 1 tonna élősúlyra vetítve.

A HTP hatáskategória esetében mintegy 60%-ot képvisel a takarmányozás, a fennmaradó hányadot pedig legfőképp a szállítási folyamatok és az elektromosáram-fogyasztás. A jelen tanulmányban mért nyári 630,8 kg 1,4-DB-egyenértékhez legközelebb a Kalhor et al. [28] által mért 655,33 kg 1,4-DB-egyenérték áll. Más szerzőknél a HTP 1080 és 6300 kg 1,4-DB-egyenérték körül alakultak [18] [19].

Az ADPf és ODP hatáskategóriák mellett a MAETP a harmadik hatáskategória, ahol nem a takarmányozási folyamatok a legnagyobb hozzájárulók a környezeti terheléshez. A MAETP-nél a legnagyobb hozzájáruló az elektromosáram-fogyasztás, majd a második a takarmányozás és az ahhoz köthető folyamatok. A MAETP más szerzőknél 100 440 és 955 000 kg 1,4-DB-egyenérték között alakult [18] [19] [28], összehasonlítva az általunk mért 667 572 (nyári) és 649 257 (téli) kg 1,4-DB-egyenértékkel.

A TETP hatáskategóriához teljes egészében a takarmányozáshoz, azon belül a földhasználatához, növénytermesztéshez köthető folyamatok járulnak hozzá. A 516,85 kg 1,4-DB-egyenérték a Ramedani et al. [19] által mért 598 kg 1,4-DB-egyenértékhez áll a legközelebb. Lima et al. [18] 800 kg 1,4-DB-egyenértéket, Payandeh et al. [26] pedig 1952,126 kg 1,4-DB-egyenértéket tapasztalt.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Következtetésként elmondható, hogy tizenegyből nyolc hatáskategóriánál (ADPe, AP, EP, GWP, POP, FAETP, HTP, TETP) a takarmányozás és az ahhoz köthető folyamatok járulnak hozzá leginkább a kibocsátáshoz. Ebből a nyolc hatáskategóriából pedig ötnél, a savasodási, eutrofizációs, fotokémiai oxidációs, édesvízi és szárazföldi ökotoxicitási potenciáloknál több mint 80%-os a takarmányozási folyamatok hozzájárulása. Ezt alátámasztja Da Silva et al. [22] éleciklus-értékelése is, mely során egy francia és egy brazil brojlercsirketelepet vizsgáltak. Egy másik, Bengtsson és Seddon [29] által végzett tanulmánynak szintén az a fő következtetése, hogy a takarmány termelése és feldolgozása járul leginkább hozzá a brojlercsirketartás környezeti terheléséhez. Pelletier [20] tanulmányában pedig arról számol be, hogy a takarmánytermelés 45, de akár 82,4%-os arányban járul hozzá az üvegházhatású gázok kibocsátásához. González-García et al. [30] tanulmánya alapján a brojlercsirketartás során a takarmány termeléséhez kapcsolódó folyamatok és a gazdaságban végzett tevékenységekből származó kibocsátások domináltak.

A környezeti terhelésen a takarmányozás oldaláról jelentősen lehetne javítani a növényvédő szerek és műtrágyák mennyiségének csökkentésével. A műtrágyák esetében főleg a N-műtrágyák azok, amelyek nagyobb mértékben járulnak hozzá a növények teljes szénlábnymához. Jelentősen csökkenhetne a kibocsátás, ha minél korszerűbb munkagépeket és eszközöket alkalmaznának a szántóföldi műveletekhez. Megoldást jelenthet még a csökkentett talajművelési rendszerek bevezetése, a szántóföldi műveletek egy menetben történő elvégzése, ami által csökkenne a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása és az üvegházhatású gázok kibocsátása [31]. A brojlercsirketartás oldaláról a környezetterhelést szintén lehetne javítani a rendszerek modernizálásával, főként a levegőztető rendszerek felújításával. Továbbá megfelelő alternatívát jelenthet a megújuló energiaforrások alkalmazása az istállókban, illetve a korszerű trágyakezelési technológiák alkalmazása.

Köszönetnyilvánítás

A kutatásokat az RRF-2.3.1-21-2022-00008 azonosítójú Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium támogatta.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] <https://www.statista.com/statistics/237597/leading-10-countries-worldwide-in-poultry-meat-production-in-2007/>
- [2] S.Y. Chia, C.M. Tanga, J.J. Van Loon, M. Dicke, "Insects for sustainable animal feed: inclusive business models involving smallholder farmers", *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 41, pp. 23–30, 2019.
- [3] A. Nalunga, A.J. Komakech, J. Jjagwe, H. Magala, J. Lederer, "Growth characteristics and meat quality of broiler chickens fed earthworm meal from *Eudrilus eugeniae* as a protein source", *Livestock Science*, 245, 104394, 2021.
- [4] W. Lutz, K.C. Samir, "Dimensions of global population projections: what do we know about future population trends and structures?", *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 27, 365(1554), pp. 2779–2791, 2010
- [5] <https://www.un.org/en/desa/world-population-projected-reach-98-billion-2050-and-112-billion-2100>
- [6] <https://sdg.iisd.org/news/world-population-to-reach-9-9-billion-by-2050/>
- [7] N. Pelletier, P. Tyedmers, "Forecasting potential global environmental costs of livestock production 2000–2050. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America" 107, 43, pp. 18371–18374, 2010.

- [8] E. Starme, "Environmental and Health Problems in Livestock Production: Pollution in the Food System", *American Journal of Public Health*, 94 (10), pp. 1703–1709, 2011.
- [9] E.Y. Arima, P. Richards, R. Walker, M.M. Caldas, "Statistical confirmation of indirect land use change in the Brazilian Amazon", *Environmental Research Letters*, 6, pp. 10–17, 2011.
- [10] S.R. Carpenter, E.M. Bennett, "Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus", *Environmental Research Letters*, 6:014009, 2011.
- [11] J. Bellarby, R. Tirado, A. Leip, F. Weiss, J.P. Lesschen, P. Smith, "Livestock greenhouse gas emissions and mitigation potential in Europe" *Global Change Biology*, 2012.
- [12] R. Tirado, K.F. Thompson, K.A. Miller, P. Johnston, "Less is more: Reducing meat and dairy for a healthier life and planet – Scientific background on the Greenpeace vision of the meat and dairy system towards 2050" *Greenpeace Research Laboratories Technical Report (Review) 3*, 2018.
- [13] P. Koch, T. Salou, "AGRIBALYSE®: Methodology, Agricultural stage – Version 3.0. Ed ADAME", Angers, France, 2020.
- [14] A. Asselin-Balençon, R. Broekema, H. Teulon, G. Gastaldi, J. Houssier, A. Moutia, V. Rousseau, A. Wermeille, V. Colomb, "AGRIBALYSE v3.0: the French agricultural and food LCI database. Methodology for the food products" Ed. ADEME, 2020.
- [15] H. Gabathuler, "The CML Story: How Environmental Sciences Entered the Debate on LCA", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, pp. 127–132, 2006.
- [16] J.B. Guinée, M. Gorree, R. Heijungs, G. Huppes, Renekleijn, A. De Koning, L. Van Oers, A.W. Sleeswijk, S. Suh, H.A. Udo de Haes, H. De Bruijn, R. Van Duin, M.A.J. Huijbregts, E. Lindeijer, A.A.H. Roorda, B.L. Van Der Ven, B.P. Weidema, "Handbook on Life Cycle Assessment – Operational Guide to the ISO Standards", Kluwer Academic Publisher, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2002.
- [17] I. Giannenas, E. Bonos, V. Anestis, G. Filioussis, D. K. Papanastasiou, T. Bartzanas, N. Papaioannou, A. Tzora, I. Skoufos, "Effects of Protease Addition and Replacement of Soybean Meal by Corn Gluten Meal on the Growth of Broilers and on the Environmental Performances of a Broiler Production System in Greece", *PLoS ONE*, 12(1), e0169511, 2017.
- [18] N.D.D.S. Lima, I.D.A. Nääs, R.G. Garcia, D.J. de Moura, "Environmental impact of Brazilian broiler production process: Evaluation using life cycle assessment", *Journal of Cleaner Production*, 117752, 2019.
- [19] Z. Ramedani, L. Alimohammadian, K. Kheialipour, P. Delpisheh, Z. Abbasi, "Comparing energy state and environmental impacts in ostrich and chicken production systems", *Environmental Science and Pollution Research*, 26, pp. 28284–28293, 2019.
- [20] N. Pelletier, "Environmental performance in the US broiler poultry sector: Life cycle energy use and greenhouse gas, ozone depleting, acidifying and eutrophying emission", *Journal of Agricultural System*, 98, pp. 67–73, 2008.
- [21] G. Martinelli, E. Vogel, M. Decian, M.J. Ulisses, S. Farinha, L.V.M. Bernardo, J.A.R. Borges, R.M.T. Gimenes, R.G. Garcia, C.F. Ruviaro, "Assessing the eco-efficiency of different poultry production systems: an approach using life cycle assessment and economic value added" *Sustainable Production and Consumption*, 24, pp. 181–193, 2020.
- [22] P.V. Da Silva, H.M.G. Van Der Werf, S.R. Soares, M.S. Corson, "Environmental impacts of French and Brazilian broiler chicken production scenarios: An LCA approach", *Journal of Environmental Management*, 133, pp. 222–231, 2014.
- [23] J.M. Katajajuuri, J. Grönroos, K. Usva, "Environmental impacts and related improvement options of supply chain of chicken meat", 6th International Conference on LCA in the Agri-food Sector. Zürich, Switzerland, 2008.
- [24] A.G. Williams, E. Audsley, D.L. Sandars, "A lifecycle approach to reducing the environmental impacts of poultry production", 17th European Symposium on Poultry Nutrition. Edinburgh, UK, 2009.
- [25] I. Leinonen, A.G. Williams, J. Wiseman, J. Guy, I. Kyriazakis, "Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Broiler production systems". *Poultry Sciences*, 91, pp. 8–25, 2012.
- [26] Z. Payandeh, K. Kheiralipour, M. Karimi, B. Khoshnevisan, "Joint data envelopment analysis and life cycle assessment for environmental impact reduction in broiler production systems", *Energy*, 127, pp. 768–774, 2017.
- [27] B. Putman, G. Thoma, J. Burek, M. Matlock, "A retrospective analysis of the United States poultry industry: 1965 compared with 2010", *Agricultural Systems*. 157, pp.107–117, 2017.
- [28] T. Kalhor, A. Rajabipour, A. Akram, M. Sharifi, "Environmental impact assessment of chicken meat production using life cycle assessment". *Information Processing in Agriculture*. 3, 4, 2016.
- [29] J. Bengtsson, J. Seddon, "Cradle to retailer or quick service restaurant gate life cycle assessment of chicken products in Australia", *Journal of Cleaner Production*, 41, pp. 291–300, 2013.
- [30] S. González-García, S. Belo, A.C. Dias, J.V. Rodrigues, R.R. Da Costa, A. Ferreira, L.P. De Andrade, L. Arroja, "Life cycle assessment of pigmeat production: Portuguese case study and proposal of improvement options" *Journal of Cleaner Production*, 100, pp. 126–139, 2015.
- [31] N. Szöllösi, Cs. Juhász, G. Kovács, J. Zsembeli, „A növényborítás hatása a talaj CO₂-emissziójának napi dinamikájára" *Agrártudományi közlemények*, 42, pp. 97–102, 2010.

Fitoremediációs kutatások a Nyíregyházi Egyetemen

Phytoremediation research at the University of Nyíregyháza

Simon László

Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, Agrártudományi és Környezetgazdálkodási Intézeti Tanszék,
4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b. simon.laszlo@nye.hu

Összefoglaló: A fitoremediáció során növények és mikrobák segítségével tisztítják meg a talajt, a talajvizet, a vizet a különféle szennyező anyagoktól. A Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézetében 2017–2021 között (a Debreceni Egyetem kutatóival együttműködve) „A Pannon régió növényeinek genetikai hasznosítása” c. GINOP-pályázat keretén belül tanulmányoztuk a különféle toxikus elemeket (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb és Zn) tartalmazó szennyezett közegek (talaj, szennyvízüledék, szennyvíziszap, fahamu) növényekkel történő tisztítását, fitoextrakcióját és fitostabilizációját. Öt tenyészedényes modellkísérletet állítottunk be lágy szárú (szudánifű, silócirok, tönkölybúza) és fás szárú (mezei szil, turkesztáni szil) növények különféle fajtaival. Négy szabadföldi kísérletünk és egy tartamkísérletünk olasz nád, cirokfélékkel, fehér fűzrel, mezei szillel és turkesztáni szillel, illetve energiafűzrel folyt. A teszt növények növényfiziológiai válaszreakcióit, illetve a talajok és a növényi szervek táp- és toxikus elem-összetételét tanulmányoztuk. Tudományos eredményeink alapján fitoremediációs technológiai ajánlásokat állítottunk össze.

Kulcsszavak: fitoremediáció, toxikus elemek, szennyvízüledék, fahamu, fitoextrakció, fitostabilizáció

Abstract: During phytoremediation the soil, groundwater or water are cleaned from various contaminants with the help of plants and microbes. At the Institute of Technology and Agricultural Sciences of the University of Nyíregyháza the phytoextraction and phytostabilization were studied from media (soil, sewage sludge, sewage sediment, wood ash) contaminated with various toxic elements (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, and Zn). The investigations were done in collaboration with researchers from the University of Debrecen between 2017-2021 in the framework of a GINOP project called “Genetic utilization of plants in the Pannon region”. Five pot model experiments were set up with different varieties of herbaceous (Sudan grass, silage sorghum, spelt) or woody (small-leaved elm, Turkestan elm) plants. Four open-field experiments and one long-term experiment were set up with Italian reed, white willow, small-leaved elm, Turkestan elm, and energy willow. The plant physiological responses of the test plants and the nutrient and toxic element composition of the soils and plant organs were studied. Based on our scientific results, phytoremediation technology recommendations were compiled.

Keywords: phytoremediation, toxic elements, sewage sediment, wood ash, phytoextraction, phytostabilization

1. BEVEZETÉS

A fitoremediáció során a természetben előforduló vagy géntechnológiai úton előállított növények (illetve a velük társult mikrobák) segítségével tisztítják meg a környezeti elemeket (talajt, talajvizet, felszíni vizet, ipari szennyvizet, levegőt) a szervetlen vagy szerves kémiai szennyező anyagoktól. A kifejezés előtagja a görög *fito*=növény szóból ered. A remediáció kifejezés a szennyezett terület megjavítását, helyrehozatalát, „meggyógyítását” jelenti a latin *remedium* = orvoslás, gyógyszer, orvosság kifejezés alapján. Ezt a szakkifejezést használjuk arra a tevékenységre, amikor a talajt szennyező vegyi anyagok koncentrációját olyan kis értékre csökkentjük, amelynek a kockázata már elfogadható [1] [2]. A növények természetes módon képesek szennyező anyagokat (pl. toxikus elemeket) felvenni a talajból és az üledékekből, és felhalmozni azokat a föld alatti vagy föld feletti szövetekben. Az ún. *fitoextrakció* során magasabb rendű növényeket alkalmaznak a fémekkel (illetve egyes szerves szennyező anyagokkal) szennyezett talajok megtisztítására [1] [2]. A szennyeződések (fémek, szerves vegyületek) a talajból (talajvízből) a növények könnyen betakarítható föld feletti szerveibe (hajtásába), illetve gyökereibe helyeződnek át. A szennyezett biomasszát ellenőrzött körülmények között feldolgozzák.

A *fitostabilizáció* során először különféle adalékanyagokkal (pl. mésszel, fahamuval, agyagásványokkal) kezelik a szennyezett közeget (pl. talajt, bányameddőt, ipari mellékterméket), majd az ily módon stabilizált területet növénytakaróval fedik le [1] [2]. A szennyező anyagokat (elsősorban a fémeket, egyes szerves szennyező anyagokat) az adalékanyagokkal oldhatatlan, kevésbé felvehető formájúvá alakítják át, a növénytakaró pedig megakadályozza, hogy a szennyezett közegből a szennyező anyagok a talajvízbe, levegőbe, szennyezetlen területre kerüljenek át, illetve a mikrobákban, növényekben, állati és emberi szervezetben halmozódjanak fel. A növénytakaró intenzív evapotranszpirációja megakadályozza, hogy a csapadék hatására a szennyező anyagok (nehézfémek) a mélyebb rétegekbe vándorolva elszennyezzék a talajvizet. Az erózió, defláció gátlásával a növények csökkentik a szennyezett közeg elhordásának veszélyét [1] [2].

A Nyíregyházi Egyetemen, illetve annak jogelődjénél 1997 óta tanulmányozzuk a talajt szennyező toxikus elemek fitoextrakcióját, fitostabilizációját, illetve fitofiltrációját különféle magasabb rendű növényekkel beállított tápoldatos, tenyészedényes és szabadföldi kísérletekben. Kutatómunkánkat az elmúlt 25 évben számos tudományos projekt (pl. 1997-ben az Alapítvány a Magyar Felsőoktatásért és Kutatásért [MKM]) „Nehézfémekkel szennyezett talaj remediációjának

vizsgálata” című AMFK 681/96 programja, 1999–2001 között az Országos Tudományos Kutatási Alap „Nehézfémekkel szennyezett talajok remediációja fitoextrakcióval, fitostabilizációval és rizofiltrációval” c. OTKA T030230 programja, 2003–2007 között az Országos Tudományos Kutatási Alap „A rizoszférában lezajló folyamatok tanulmányozása a fitoremediáció során” c. OTKA T043479 programja, illetve 2002-ben, 2009-ben és 2010-ben az egyetem Tudományos Tanácsának kiemelt projektjei) támogatta.

2017–2021 között valósult meg a „A Pannon régió növényeinek genetikai hasznosítása” c. GINOP 2.2.1-15-2017-00042 („K+F versenyképességi és kiválósági együttműködések”) c. pályázat, melyben a konzorciumvezető a Törökszentmiklósi Mezőgazdasági ZRt. volt. Konzorciumtag volt a pályázatban a Szent István Egyetem (Gödöllő), a NAIK ERTI (Püspökladány), a Gabonakutató Nonprofit Kft. (Szeged) és a Debreceni Egyetem (Ökológiai Tanszék). A Nyíregyházi Egyetem a Debreceni Egyetem kutatásfejlesztési szolgáltatási alvállalkozójaként vett részt a pályázatban. A „Fitoremediáció 2” jelzésű *kutatócsoport* vezetője prof. dr. habil. Simon László volt, a szakmai megvalósításban közreműködő kutató-fejlesztők dr. Csabai Judit (2017. december – 2020. február), dr. Irinyiné Oláh Katalin, dr. Uri Zsuzsanna, dr. Vigh Szabolcs, dr. Vincze György és dr. Tóth Csilla kollégáink voltak. Részt vett a pályázatban továbbá dr. Szabó Miklós, Dobróné dr. Tóth Márta és dr. Halász Judit, 2017. december – 2019. február között pedig Kosztyuné Krajnyák Edit. A pályázati célok megvalósítását két technikus, egy laboráns és egy adminisztratív feladatokat ellátó kollégánk segítette. Kutatómunkánkat a Debreceni Egyetem Nyíregyházi Kutatóintézetében működő „Talajmikrobiológia” kutatócsoporttal együttműködve végeztük, melynek vezetője dr. Makádi Marianna volt, a szakmai megvalósításban közreműködő kutató-fejlesztő Tomócsik Attila (2018. január–március), dr. Aranyos Tibor József (2018. április–2021. szeptember), dr. Demeter Ibolya (2018. január – 2020. június), Orosz Viktória (2020. július – 2021. szeptember) és Medve Attila (2018. január –2021. szeptember) volt, illetve két laboráns is részt vett a pályázatban.

Pályázati célkitűzésünk az volt, hogy a toxikus elemekkel (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb és Zn) enyhén szennyezett talajok fitoremediációjára, azon belül fitoextrakciójára és fitostabilizációjára, illetve a betakarított növényzet hasznosítására vonatkozóan komplex technológiákat, fitoremediációs ajánlásokat dolgozzunk ki.

2. KÍSÉRLETI ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

Kísérleti munkánk során öt tenyészedenyes modellkísérletet állítottunk be lágyszárú (3 faj 6 fajta) és faszárú (2 faj 4 fajta) teszt növényekkel, továbbá négy szabadföldi kísérletet és egy szabadföldi tartamkísérletet bonyolítottunk le 4 növényfaj 8 fajtájával, illetve 3 vonalával.

2.1. Tenyészedenyes kísérletek lágyszárú teszt növényekkel

2018-ban három *tenyészedenyes kísérletet* (1. ábra) állítottunk be a Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézetének növénynevelő fényszobájában. Az 1–2. *kísérletben* a teszt növény *szudánifű* (GK Csaba – cirok × szudánifű hibrid – *Sorghum bicolor* (L.) Moench × *Sorghum sudanense* (piper) Stapf.; Akklimat – szudánifűfajta – *Sorghum sudanense* (piper) Stapf., illetve *cirok* (GK Balázs – silócirok hibrid – *Sorghum bicolor* (L.) Moench; Róna 1 – silócirokhibrid, *Sorghum bicolor* (L.) Moench) volt. A 3. *kísérletet* tönkölybúza (*Triticum spelta*) két vonalával (GK Fehér „A” szenzitív és GK Fehér „B” toleráns vonal) állítottuk be. A kísérletbe vont termesztőközeg a Debrecen-Lovász-zugban található, korábban szennyvíz-utóülepítőként működő, majd rekultivált törendszert fedőtalaja volt (2. ábra), melyben 32 mg/kg nikkelt, 173 mg/kg cinket és 120 mg/kg krómot mértünk. Ezt a fedőtalajt 10 m/m%, illetve 20 m/m% szennyvíz-üledékkel kevertük össze, mely szintén Debrecen-Lovász-zugból származott, és a fedőtalaj alatt, 70-110 cm-es mélységben helyezkedett el (2. ábra). A szennyvíz-üledék különféle toxikus elemekkel (As-12; Cd-1,3; Cu-189; Ni -50; Pb-287; Zn-888; Cr-1027 mg/kg) volt többé-kevésbé elszennyezve. Kilenchetes talajinkubálás („talajérlelés”) után a fenti közegen hat hétig szudánifű, illetve silócirok teszt növényeket, illetve 7 hétig tönkölybúzát termesztettünk. A *mért paraméterek* az alábbiak voltak: 1. *növényi válaszreakciók* (növényi szövetek zöldtömege és szárazanyag-tartalma, illetve táp- és toxikus elem-felvétele, növény morfológiai paraméterek, levelek klorofill-fluoreszcenciája, levél-mikroanatómia, levélzsim-aktivitás), 2. *talajok* táp- és toxikus elem-összetétele, talajzsim-aktivitás, talajmikrobiológiai (aerob és anaerob összcsíraszám) vizsgálatok [3] [4] [5] [6] [7] [8].



1. ábra. Tenyészedenyes kísérletek cirokfélékkel és tönkölybúzával (Nyíregyházi Egyetem)



2. ábra. A Debrecen-lovász-zugi szennyvíz-utóülepítő, rekultivált medence a feltalajjal, eltemetett szennyvízüledék

2.2. Tenyészedényes kísérletek fűs szárú tesztnövényekkel

2018-ban és 2019-ben két *tenyészedényes kísérletet* állítottunk be a Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézetének növénynevelő fényszobájában (3. ábra balra), illetve a Nyíregyházi Egyetem Botanikus Kertjében (3. ábra jobbra). A 1. kísérletben a tesztnövény *fehér fűz* (*Salix alba* L. – cv. Pörbölyi, Naperti 82 klón) volt. A Debrecen-Lovász-zugból származó fedőtalaajt 10 m/m% Debrecen-lovász-zugi szennyvízüledékkel kezeltük. Három és fél hetes talajinkubálás után a fenti közegen három hétig fehér fűzet neveltünk. A 2. kísérletet *szilfélékkel* (mezei szil – *Ulmus minor* L., turkesztáni szil – *Ulmus pumila* L. 'Pusztá') állítottuk be, a Debrecen-lovász-zugi szennyvízüledékkel szennyezett feltalajhoz a kísérleti területen termesztett, felapritott cirokhajtást kevertünk 2,3 m/m%-ban. Tizenegy hetes talajinkubálás után a fenti közegen tizenhét hétig szilfákat neveltünk. A *mért paraméterek* az alábbiak voltak: 1. *növényi válaszreakciók* (növényi szervek zöldtömege és szárazanyag-tartalma, illetve táp- és toxikusanyag-felvétele, növénymorfológiai paraméterek, levelek klorofill-fluoreszcenciája), 2. *talajok* táp- és toxikusanyag-összetétele, talajenzim-aktivitás, talajmikrobiológiai (aerob és anaerob összesírászám) vizsgálatok [9] [10].



3. ábra. Tenyészedényes kísérletek fehér fűzzel és szilfélékkel (Nyíregyházi Egyetem)

2.3. Szabadföldi kísérletek lágú és fűs szárú tesztnövényekkel

2019–2021 között négy szabadföldi mikroparcellás kísérletet (4. ábra) állítottunk be Debrecen-Lovász-zugban, szennyvízüledékkel (toxikus elemekkel) szennyezett feltalajon. Tesztnövényeink az alábbiak voltak: 1. kísérlet: *szudánifű* (GK Csaba, Akklimat) és *silócirok* (GK Balázs, Róna 1), 2. kísérlet: *olasznád* (*Arundo donax* L. – 3 vonal: SC Blossom, BFT Indianai és STM Hajdúsági), 3. kísérlet: *fehér fűz* (*Salix alba* L. – cv. I-4/59, Naperti 82 klón), 4. kísérlet: *szilfélék* (mezei szil, turkesztáni szil). *Talajkezelések*: a területen termesztett cirok gyökérmaradványaira fehér fűz, a talajba dolgozott cirokszárra (40 t/ha) szilfélék telepítése. Mért paraméterek: 1. *növényi válaszreakciók* (növényi szervek táp- és toxikusanyag-felvétele, növénymorfológia, levél-mikroanatómia), 2. *talajok* táp- és toxikusanyag-összetétele, talajenzim-aktivitás [11].



4. ábra. Debrecen-Lovász-zugban termesztett cirokfélék betakarítása, a feltalaj kezelése cirokszárral, szilfák a kezelt területen, olasz nád

2.4. Szabadföldi tartamkísérlet energiafűz-tesztnövényvel

2011–2021 között tartamkísérletet (5. ábra) állítottunk be energetikai célra termesztett fűzzel (*Salix triandra* × *S. viminalis* 'Inger') [12] [13] [14] [15]. Talajkezelések: 2011-ben, 2013-ban és 2016-ban a kísérleti talajt települési szennyvíziszap komposzttal és fűzhamuval [12] [13], majd 2018-ban a barna erdőtalajt 7,5 t/ha Debrecen-Lovász-zugból származó szennyvíziszapkomposzttal, illetve fűzvevesszők elégetésével előállított 300 kg/ha fűzhamuval [14] [15] kezeltük. Mért paraméterek: 1. növényi válaszreakciók (növényi szervek táp- és toxikusanyag-felvétele, növényfarmológia, levél-mikroanatómia), 2. talajok táp- és toxikusanyag-összetétele, talajenzim-aktivitás.

Salix triandra x S. viminalis 'Inger' tartamkísérlet, 2018-os kezelések (Nyíregyháza)

II/1 KONTROLL	III/1	III/1	IV/1 D-L SZENNYVÍZISZAP 7,5 t/ha	V/1
VI/1 FÜZHAMU 0,3 t/ha	VII/1	VIII/1 SZENNYVÍZISZAP+ FÜZHAMU	IX/1	X/1
IX/2	VII/2	X/2	V/2	VII/2 SZENNYVÍZISZAP+ FÜZHAMU
III/2	VI/2 FÜZHAMU 0,3 t/ha	II/2 KONTROLL	IV/2 D-L SZENNYVÍZISZAP 7,5 t/ha	II/2
X/3	IX/3	VIII/3 SZENNYVÍZISZAP+ FÜZHAMU	VII/3	VI/3 FÜZHAMU 0,3 t/ha
V/3	IV/3 D-L SZENNYVÍZISZAP 7,5 t/ha	III/3	III/3	II/3 KONTROLL
VII/4	VI/4	IX/4	III/4	X/4
II/4 KONTROLL	VIII/4 SZENNYVÍZISZAP+ FÜZHAMU	II/4	VI/4 FÜZHAMU 0,3 t/ha	IV/4 D-L SZENNYVÍZISZAP 7,5 t/ha



5. ábra. Energiafűzzel beállított tartamkísérlet sémája, talajkezelés 2018-ban, levélmintavétel 2019-ben (Debreceni Egyetem Nyíregyházi Kutatóintézet, Nyíregyháza)

3. TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

3.1. Tenyészedényes, fényszobás kísérleteink alapján megállapítottuk, hogy a szudánifű (GK Csaba, Akklimat) és silócirok (GK Balázs, Róna 1) egyaránt jól tűri a toxikus elemeket a Debrecen-lovász-zugi szennyvízüledékben. Szabadföldi körülmények között történő tesztelésre elsősorban a GK Csaba cirok × szudánifű hibridet javasoltuk, másodsorban pedig a GK Balázs silócirokhibridet. E két hibrid esetén feltételezhető egy toxikus elemekkel szennyezett talajon vagy más szennyezett növénynevelő közegen a legnagyobb mértékű tolerancia az abiotikus és biotikus stressz-faktorok iránt.

3.2. Szabadföldi mikroparcellás kísérletünk alapján megállapítottuk, hogy a Debrecen-Lovász-zugban toxikus elemekkel, szennyvízüledékkel szennyezett talajon természetett szudánifű (cv. GK Csaba és Akklimat) és silócirok (cv. GK Balázs és Róna 1) jól tűrte a csapadékszegény időjárási körülményeket. Megállapítottuk, hogy a legintenzívebb ásványianyag-cserével a GK Balázs silócirokfajta rendelkezett, mivel az összes megvizsgált táp- és toxikus elemből ez a növény vett fel legtöbbet a gyökér+levél+szár+szemtermés szerveiben. Megállapítottuk, hogy a fitoremediációs szempontból könnyen betakarítható föld feletti szervekbe (levél+szár+szemtermés) a potenciálisan toxikus mikroelemekből (As+Ba+Cd+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Zn) a legtöbb a GK Balázs silócirokfajta (Σ415,3 mg/kg sz.a.) került be. Számításaink szerint a GK Balázs silócirokfajta föld feletti szerveinek (levél+szár+szemtermés) egyszeri betakarításával hektáronként összesen 18,99 kg potenciálisan toxikus elemet lehet eltávolítani a szennyezett talajból.

3.3. Szabadföldi mikroparcellás kísérletünk alapján megállapítottuk, hogy a Debrecen-Lovász-zugban toxikus elemekkel, szennyvízüledékkel szennyezett talajon természetett olasz nád 3 különféle vonala (SC Blossom, BFT Indianai és STM Hajdúsági) közül a növények szára a potenciálisan toxikus mikroelemekből (As+Ba+Cd+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Zn) a legtöbbet a BFT indianai vonalban (Σ92,2 mg/kg) halmozott fel, hasonlóan a leveleihez (Σ326 mg/kg). Jelentős eltéréseket figyeltünk meg a 3 olasz nád vonal szárának és levelének cinkfelvételében. A BFT indianai vonal a szárában 117 mg/kg cinket halmozott fel, mely 67%-kal nagyobb, mint az SC Blossom-ban vagy 95%-kal nagyobb, mint a STM hajdúsági vonalban mért mennyiségek. Toxikus elemekkel szennyezett talajokon a BFT indianai vonal olasz nádtermesztését javasoljuk, mellyel 1 kg szárazanyagra számítva a legtöbb toxikus elemet (7,15 kg/ha) lehet eltávolítani a föld feletti szervek (szár+levél) egyszeri betakarításával.

3.4. Tenyészedényes, fényszobás kísérletünk alapján megállapítottuk, hogy a fehér fűz (*Salix alba* L., cv. Pörbölyi és Naperti-82 klón) a Debrecen-Lovász-zugból származó szennyvízüledékkel kezelt Debrecen-lovász-zugi feltalajból több táp- és toxikus elemet vesz fel, mint a kezelést nem kapott feltalajból. A toxikus elemek (As+Ba+Cd+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Zn) 9,8–13,7% közötti koncentrációnövekedést mutattak a növények hajtásaiban. A Pörbölyi fajta nagyobb száraz összbiomasszát képzett egy növényre vetítve, mint a Naperti-82 klón, és a szennyvízüledék-kijuttatás csak kismértékben gátolta mindkét fűzfajta szerveinek szárazanyag-felhalmozását. A megvizsgált növényi válaszreakciók (növényi szervek zöldtömege, szárazanyag-tartalma és elemfelvétele, klorofill-fluoreszcencia, növény morfológia, levél-mikroanatómia, levélzsim-aktivitás), valamint a talajenzimaktivitás-vizsgálatok alapján szabadföldi körülmények között történő tesztelésre elsősorban a fehér fűz „Pörbölyi” fajtáját javasoltuk, másodsorban pedig a Naperti-82 fajtaelismerés előtt álló klónt.

3.5. Szabadföldi mikroparcellás kísérletet állítottunk be Debrecen-Lovász-zugban toxikus elemekkel, szennyvízüledékkel szennyezett talajon fehér fűz (*Salix alba* L., cv. I-4/59 és Naperti-82 klón) teszt növényekkel. A kezelt növényeket a szudánifű (cv. GK Csaba és Akklimat) parcellák helyére telepítettük, a szudánifű szárának betakarítás után a talajban maradt gyökereire, míg a kontrollparcellák talaja nem kapott ilyen kezelést. Megállapítottuk, hogy az I-4/59 fehér fűz intenzívebb ásványi anyagcserével rendelkezik, mint a Naperti-82 klón, mivel a kontrollkultúrák leveleiben az összes megvizsgált táp- és toxikus elemből (As+Ba+Ca+Cd+Cr+Cu+Fe+K+Mg+Mn+Na+Ni+P+Pb+Zn) 39 109 mg/kg sz.a.-ot vett fel, míg a Naperti-82 klón csak 29 422 mg/kg-ot. A kezelt kultúrák leveleiben ez az érték 48 874 mg/kg (I-4/59 fajta), illetve 36 778 mg/kg sz.a. (Naperti-82 klón) volt. Kimagasló volt a fehér fűz-levelek cinkfelvétele a szennyvízüledékkel szennyezett talajból (I-4/59 fajta kontroll: 765 mg/kg, I-4/59 fajta kezelt: 970 mg/kg, Naperti-82 klónkontroll: 481 mg/kg, Naperti-82 klón kezelt: 760 mg/kg), illetve a többi általunk tanulmányozott növényfajhoz képest figyelemre méltóan nagy a fehér fűz-levelek kadmiumakkumulációja is (I-4/59 fajta kontroll: 1,5 mg/kg, I-4/59 fajta kezelt: 3,1 mg/kg, Naperti-82 klón kontroll: 0,88 mg/kg, Naperti-82 klón kezelt: 2,17 mg/kg). A potenciálisan toxikus mikroelemekből (As+Ba+Cd+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Zn) az I-4/59 fajta kezelt (Σ1124 mg/kg), illetve kontroll (Σ887 mg/kg) leveleiben mértünk a legtöbbet, melyet a Naperti-82 klón kezelt (Σ858 mg/kg), illetve kontroll (Σ560 mg/kg) levelei követtek. Fentiek alapján kijelenthető, hogy szennyezett talajon természetve az I-4/59 fehér fűz-fajta több toxikus elem fitoextrakciójára képes leveleivel, mint a Naperti-82 klón, és mindkét megvizsgált fajta leveleinek toxikus elemfitoextrakciója 27-53%-kal megemelhető, ha a parcellák talajában benne hagyjuk a korábban ott természetett szudánifű gyökereit.

3.6. A szilfélékkel (mezei szil – *Ulmus minor* L. és turkesztáni szil – *Ulmus pumila* L. 'Pusztá') beállított tenyészedényes, szabadföldi kísérletben a Debrecen-lovász-zugi toxikus elemekkel szennyezett talajba ugyanott természetett, felaprított cirokhajtást (szár+levél) is kijuttattunk adalékanyagként. A tenyészedényes kísérlet talajának „összes” tápelem- és toxikus elem-tartalmát elemezve megállapítható, hogy a vizsgált elemkoncentrációk (As, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Zn) a kísérlet befejezésekor a turkesztáni szil esetében, a cirokszalmával kezelt Debrecen-Lovász-zugból származó talajban voltak legnagyobb koncentrációban kimutathatók. A növénynevelő közeg

„felvehető” (Lakanen-Erviö-oldható) elemtartalmát tanulmányozva megállapítottuk, hogy a talajba kevert cirokszalma hatására viszonylagos nitrogénhiány alakul ki. Valószínűleg szintén a cirokszalma feltáródásának következményeként a cirokszalmával kezelt talajban jelentősen megemelkedett „felvehető” káliumkoncentrációt mértünk. A megvizsgált szilfajok válaszreakcióit (növényi szervek zöldtömege, szárazanyag-tartalma és elemfelvétele, növénymorfológia, levél-mikroanatómia), valamint a talajenzim-aktivitás vizsgálatainak eredményeit komplexen értékelve kijelenthetjük, hogy a Debrecen-lovász-zugi, korábban szennyvízülepítőként üzemelő terület toxikus elemekkel szennyezett fedőtálatára turkesztáni szilt célszerű telepíteni, mely a környezeti stresszfaktorok iránt toleránsabb, mint a mezei szil.

3.7. A szilfélékkel (mezei szil – *Ulmus minor* L. és turkesztáni szil – *Ulmus pumila* L. 'Pusztá') beállított szabadföldi mikroparcellás kísérletben a Debrecen-lovász-zugi toxikus elemekkel szennyezett talajba ugyanott természetű, felaprított cirokhajtást (szár+levél) is kijuttattunk adalékanyagként. Méréseink alapján beigazolódt, hogy a Debrecen-lovász-zugi feltalajba kijuttatott cirokhajtás-apriték feltáródott, és a talaj visszamerítendő humusztartalmát megnövelte. A toleránsabb fajnak tekintett turkesztáni szil leveleiben és vesszőiben több toxikus elem (As, Ba, Cd, Cr, Ni, Pb), illetve esszenciális mikroelem (Cu, Mn, Zn) halmozódott fel, mint a mezei szilben. A kezelt növények réztartalma 10-14 %-kal nőtt a kezelés hatására, a mangántartalom 21-34 %-kal emelkedett meg, a cink mennyisége pedig 66-70%-kal volt több a cirokpriték kijuttatásának köszönhetően. A toxikus elemek koncentrációja a kezelt növények levélmintáiban volt magasabb, a bárium- és kadmiumkoncentráció 20-35%-kal emelkedett meg, az arzén 30-50%-kal, az ólom mennyisége mindkét szilfajnál 70%-os többletet mutatott. A mezei szil kezelt növényeinek króm tartalma 80%-kal magasabb, mint a kontrollnövényekben mért érték, a turkesztáni szil esetében 40%-os eltérést lehetett megfigyelni a kontrollhoz képest. A nikkel esetén mennyisége a kezelt mezei szil levélmintáiban kétszerese volt a kontrolléknak, a turkesztáni szilnél 80%-os volt a megfigyelt növekedés. Hasonló jelenséget figyeltünk meg mezei szil és a turkesztáni szil vesszőinek toxikuselem-akkumulációját illetően is; a turkesztáni szil valamennyi toxikus elemet magasabb koncentrációban halmozta fel, mint a mezei szil, és a talajban feltáródó cirokszalma jelentősen megnövelte a turkesztáni szil vesszőinek króm- (+77,9%), nikkel- (+44,9%), ólom- (+44,5%), arzén- (+22,3%), és nikkelakkumulációját (+20,1%) a kontrollhoz képest. A turkesztáni szil levelei összességében kisebb mértékben mutattak szövettani, mikroanatómiai eltéréseket, mint a mezei szilé, előbbi faj tehát jobban adaptálódik a megemelkedett toxikuselem-szinthez. Eredményeink alapján kijelenthetjük, hogy a szennyvízüledékből származó toxikus elemekkel szennyezett talajon turkesztáni szilt célszerű termesztetni, melynek toxikuselem-fitoextrakciós képessége a talajba kijuttatott lágy szárúakkal, esetünkben cirokhajtás-apritékkal megemelhető.

3.8. Energetikai célra nemesített fűzzel (*Salix triandra* x *S. viminalis* 'Inger') barna erdőtalajon beállított szabadföldi kisparcellás tartamkísérletünk alapján megállapítottuk, hogy a talajba 3 alkalommal kijuttatott, toxikus elemekkel szennyezett települési szennyvíziszap komposzt (TSZK), szennyvízüledék (SZÜ), illetve fűzhamu (FH) hét év alatt jelentősen megemelte a feltalaj toxikuselem-, elsősorban As- és Cd-tartalmát, valamint az esszenciális mikroelem-, elsősorban cinktartalmát. A levél nélküli vesszőkben a TSZK+SZÜ, az FH vagy a TSZK+SZÜ+FH kezelést kapott kultúrákban 421–593% -kal több As-t, 36–138%-kal több Cd-ot, 116–190%-kal több Cr-ot, 45–79%-kal több Mn-t, 34–153%-kal több Ni-t és 50–59%-kal több Zn-t mértünk, mint a talajkezelést nem kapott kontrollban. A kezelt levelekben ez a többlet 78–124%-os (As), 30–125%-os (Cr), 29–44%-os (Mn), 202–695%-os (Pb), illetve 11–35%-os (Zn) volt a kontrollhoz képest. A szennyvízüledék és fűzhamu együttes kijuttatása során az energiazöld-levelek kevesebb toxikus elemet (As, Cr, Pb) vettek fel a talajból, mint amikor a szennyvízüledéket csak önmagában juttattuk ki, azaz a szennyvízüledékhez kevert fűzhamu mérsékelte a növények toxikuselem-felvételét, vagyis fitostabilizáló hatása volt. Mindezt a talajlégzés, talajenzim-aktivitás, növénymorfológiai és mikroanatómiai vizsgálataink is alátámasztották.

4. FITOREMEDIÁCIÓS TECHNOLÓGIAI AJÁNLÁSOK

Tudományos eredményeink alapján 3 technológiai ajánlást fogalmaztunk meg a fitoremediációt a gyakorlatban alkalmazó szakemberek számára.

4.1. Szennyvízüledékből származó, toxikus elemekkel (elsősorban krómmal, nikkellel és cinkkel) szennyezett talajon az első évben lágy szárúakat; cirokféléket, silócirot és szudáni fűvet célszerű termesztetni. A GK Balázs silócirofajta föld feletti szerveinek (szár+levél+szemtermés) egyszeri betakarításával hektáronként 19 kg potenciálisan toxikus mikroelemet (As+Ba+Cd+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Zn) lehet eltávolítani a szennyezett talajból ún. fitoextrakcióval. A szudáni fű vagy silócirok gyökereit a talajban hagyva, arra a második évben fehér fűzet (cv. Pörbolyi, I-4/59 fehér fűz, Naperti-82 klón) célszerű telepíteni, melyek leveleivel jelentős mennyiségű toxikus elem, főleg cink és kadmium távolítható el a talajból. A talajban feltáródó cirokgyökerek a fehér fűz leveleinek toxikuselem-fitoextrakcióját 27-53%-kal megemelhetik. Amennyiben a cirokfajták föld feletti szerveit, szárát és leveleit a fenti toxikus elemekkel szennyezett talajba dolgozzuk be a betakarításuk után, akkor a területre telepített mezei szil és turkesztáni szil (Pusztaszil) fafajok leveleinek és vesszőinek potenciálisan toxikus elem (As+Ba+Cd+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Zn) akkumulációja, és ezzel fitoextrakciós képessége jelentős mértékben, elemtől függően 20-78%-kal megemelhető.

4.2. Szennyvízüledékből származó toxikus elemekkel (Cr, Ni, Zn) szennyezett talajon mikroszaporítással előállított olasz nád növények termesztendők, melyek föld feletti szerveinek légszáraz hozama a 3. évi (márciusi) betakarításkor elérheti a 22 tonnát hektáronként. A toxikus elemek (As+Ba+Cd+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Zn) kétszer-háromszor nagyobb mértékben akkumulálódnak a levélben, mint a szárban, ezért a fitoremediációs célból történő hajtások betakarítását úgy kell időzíteni a növények téliesedése után, hogy az elszáradó szárazon minél több ép, száraz levél legyen

jelen. A toxikus elemek közül a legtöbbet a cinkből vesz fel az olasz nád, mely a levelekben elérheti a 326 mg/kg sz.a. értéket, a szárazban pedig a 93 mg/kg sz.a.-t. A kísérletbe vont 3 olasz nádsvonal (SC Blossom dél-karolinai, BFT indianai és STM hajdúsági) közül a toxikus elemekkel enyhén szennyezett talajokon a BFT indianai vonal termesztését javasoljuk, mellyel 1 kg szárazanyagra számítva a legtöbb toxikus elemet (6,32-7,15 kg/év) lehet eltávolítani a 19-22 t/ha/év hozamú légszáraz föld feletti szervek évenkénti betakarításával.

4.3. Fűzzel beállított, rövid vágásfordulóú energetikai faültvényekbe 2-3 évente juttatható ki települési szennyvíziszap komposzt, a korábbi szennyvízülepítő tavakból származó üledék vagy bioerőművekből származó fahamu (pl. fűzhamu) hozamcsökkenés nélkül. Elsősorban a makrotápanyagokban, nitrogénben és foszforban gazdag biohulladékok (szennyvíziszap komposzt és szennyvízüledék) serkentik az energiafűz hajtásainak növekedését, emelik meg a betakarítható vesszőhozamot. Javasoljuk a fenti biohulladékok és a fűz saját hamujának egyidejű kijuttatását is a talajba a betakarításokat követően. Tapasztalataink szerint a fenti anyagok rendszeres talajba juttatása visszamérhetően megemeli azonban a feltalaj toxikuselem-, elsősorban As- és Cd-tartalmát, illetve esszenciális mikroelem-, elsősorban cinktartalmát. A levél nélküli vesszőkben azonban a kezelések hatására jelentős, 421–593%-kal több As, 36–138%-kal több Cd, 116–190%-kal több Cr, 45–79%-kal több Mn, 34–153%-kal több Ni-t, és 50–59%-kal több Zn halmozódik fel a talajból, vagyis a fűzveszők rendszeres levágásával jelentős mennyiségű toxikus elemet lehet eltávolítani a rendszeresen szennyvíziszap komposzttal, szennyvízüledékkel vagy fűzhamuval kezelt talajból. A szennyvízüledék és fűzhamu együttes kijuttatása során az energiafűz-levelek kevesebb toxikus elemet (As, Cr, Pb) vettek fel a talajból, mint amikor a szennyvízüledéket csak önmagában juttattuk ki, azaz a szennyvízüledékhez kevert fűzhamu mérsékelte a növények toxikuselem-felvételét, vagyis fitostabilizáló hatása volt. Tartamkísérletünk alapján bebizonyosodott, hogy az egyébként hulladékként (fűzhamu, szennyvíziszap, szennyvízüledék) kezelt anyagok energianövény-ültvények talajába történő rendszeres kijuttatásával – a hulladékciklus zárásával – megoldható azok eliminálása, hasznosítása, és ezzel elérhető egy hatékonyabb, egyben gazdaságosabb toxikuselem-fitoremediáció.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkát a GINOP 2.2.1-15-2017-00042 „K+F versenyképességi és kiválósági együttműködések” program keretén belül „A Pannon régió növényeinek genetikai hasznosítása” c. pályázat támogatta. Köszönjük dr. Pusztahelyi Tündének és munkatársainak (Debreceni Egyetem Agrárműszerközpont), hogy a minták kémiai analizisét elvégezték. Köszönjük dr. Magura Tibornak és munkatársainak (Debreceni Egyetem Ökológiai Tanszék), hogy a Debrecen-lovasz-zugi kísérleti helyszínt biztosították, és kísérleti munkánkban közreműködtek.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Simon L. Fitoremediáció. Környezetvédelmi Füzetek. Azonosító: 2318. Budapest, BMKE OMIKK, 2004.
- [2] Arthur, E.L., P.J. Rice, P.J. Rice, T.A. Anderson, S.M. Baladi, K.L.D. Henderson, J.R. Coast. Phytoremediation – an overview. *Crit. Rev. Plant. Sci.* 24. pp. 109–122, 2005.
- [3] Irinyiné Oláh K., Csabai J., Kosztyuné Krajnyák E., Tóth Cs., Uri Zs., Vigh Sz., Vincze Gy., Simon L. Toxikus elemekkel szennyezett szennyvízüledék hatása egy szudánifű hibrid növénymorfológiai paramétereire tenyészedényes kísérletben. *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok XIV. évf., 3. szám, 103–112. old., 2019.*
- [4] Irinyiné Oláh, K., T. Aranyos T., J. Csabai, E. Kosztyuné Krajnyák, M. Szabó, Cs. Tóth, Zs. Uri, Sz. Vigh, Gy. Vincze, L. Simon. The effect of toxic elements on the morphological parameters of the *Ulmus minor*. In: Páy, G.L. (ed.) *International Multidisciplinary Conference. 14th edition. 25–26 November, 2021. Nyíregyháza – Baia Mare, Hungary – Romania. Publisher: University of Nyíregyháza. pp. 43–47., 2022. (ISBN 978-615-6032-49-2).*
- [5] Uri Zs., Simon L., Vigh Sz., Vincze Gy., Irinyiné Oláh K. A tönkölybúza (*Triticum spelta* L.) elemfelvétele szennyvízüledékből. *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok XIV. évfolyam, 2. szám, 109–118. old., 2019.*
- [6] Tóth Cs., Simon L. Toxikuselem-terhelés detektálására alkalmas mikromorfometriai paraméterek vizsgálata néhány *Sorghum* genusba tartozó faj esetében. In: Bíró I., Beszédes S., Deák D., Gál J., Hampel Gy., Imre-Fodor G., Kiss M., László Zs., Mihalkó J., Pappné Sziládi K. (szerk.). *Műszaki, technológiai és gazdasági kihívások a 21. században (konferencia). Szegedi Tudományegyetem. Mernői Kar, 2019. május 31. Előadások és posztterek összefoglalói. 56. old., 2019. (ISBN: 978-963-306-654-6)*
- [7] Tóth, Cs., K. Irinyiné Oláh, L. Simon. The effect of sewage sediment containing toxic elements on the microanatomy of the leaf of *Sorghum* species In: Páy, G.L. (ed.) *International Multidisciplinary Conference. 14th edition. 25–26 November, 2021. Nyíregyháza– Baia Mare, Hungary – Romania. Publisher: University of Nyíregyháza. pp. 124–133, 2022. (ISBN 978-615-6032-49-2)*
- [8] Vincze Gy., Simon L., Uri Zs., Irinyiné Oláh K., Vigh Sz. Szudánifű-fajták elemfelvételének és enzimaktivitásának vizsgálata szennyvízüledékkel szennyezett közegben. In: Bíró I., Beszédes S., Deák D., Gál J., Hampel Gy., Imre-Fodor G., Kiss M., László Zs., Mihalkó J., Pappné Sziládi K. (szerk.): *Műszaki, technológiai és gazdasági kihívások a 21. században (konferencia). Szegedi Tudományegyetem. Mernői Kar, 2019. május 31. Előadások és posztterek összefoglalói. 59. old., 2019. (ISBN: 978-963-306-654-6)*
- [9] Simon L., Uri Zs., Vigh Sz., Vincze Gy., Irinyiné Oláh K. Szilfélék passzív és indukált toxikuselem-felvételének vizsgálata szennyvízüledékkel szennyezett talajból tenyészedényes kísérletben. *Talajtani Vándorgyűlés, Hódmezővásárhely, 2022. szeptember 1–3. (előkészületben).*

- [10] Tóth Cs., K. Irinyiné Oláh, Zs. Uri, Sz. Vigh, Gy. Vincze, L. Simon. The effect of toxic elements on the microanatomy of the leaves of the *Salix alba* L. 19th Wellmann International Scientific Conference. University of Szeged Faculty of Agriculture. Hódmezővásárhely, 28 April, 2022. Book of Abstracts. p. 87., 2022 (ISBN 2978-963-306-860-1)
- [11] Uri Zs., Simon L., Irinyiné Oláh K., Makádi M., Tóth Cs., Vigh Sz., Vincze Gy. Szennyvízüledékkel szennyezett talajba kijutatott cirokhajtás hatásának vizsgálata a turkesztáni szil toxikuselem-felvételére szabadföldi kísérletben. Talajtani Vándorgyűlés, Hódmezővásárhely, 2022. szeptember 1–3. (előkészületben).
- [12] Simon L., Vincze Gy., Uri Zs., Irinyiné Oláh K., Vigh Sz., Makádi M., Aranyos T., Zsombik L. Energiafűzettel (*Salix* sp.) beállított tápanyag-utánpótlási szabadföldi tartamkísérlet első 5 évének tapasztalatai. Növénytermelés 65. évf., 3. szám, 59–76. old., 2016.
- [13] Simon, L., M. Makádi, Gy. Vincze, Zs. Uri, K. Irinyiné Oláh, L. Zsombik, Sz. Vigh, B. Szabó. Long-term field fertilization experiment with energy willow (*Salix* sp.) – Elemental composition and chlorophyll fluorescence in the leaves. *Agrokémia és Talajtan (Agrochemistry and Soil Science)* Vol. 67., Issue 1., pp.91–103., 2018.
- [14] Simon, L., Zs. Uri, Sz. Vigh, K. Irinyiné Oláh, M. Makádi, Gy. Vincze. Phytoextraction of Potentially Toxic Elements from Wastewater Solids and Willow Ash – Experiences with Energy Willow (*Salix triandra* x *S. viminalis* 'Inger'). Chapter 13. In: J.T. Puthur, O.P. Dhankher (eds.), *Bioenergy Crops: A Sustainable Means of Phytoremediation*. CRC Press/Taylor & Francis Group. pp. 227–245., 2022. (ISBN: 9781003043522)
- [15] Simon, L., M. Makádi, Zs. Uri, Sz. Vigh, K. Irinyiné Oláh, Gy. Vincze, Cs. Tóth. Phytoextraction of toxic elements and chlorophyll fluorescence in the leaves of energy willow (*Salix* sp.), treated with wastewater solids and wood ash. *Agrokémia és Talajtan (Agrochemistry and Soil Science)* Vol. 71., Issue 1., pp. 77–99., 2022.

A Bükk előterében lévő, felhagyott szénhidrogénkutak értékelése geotermikus hővisszanyerés alkalmazására

Evaluation of abandoned hydrocarbon wells in the Bükk foothills for geothermal heat recovery

Zákányi Balázs^{1*} – Móricz Ferenc¹ – Turai Endre^{1,2} – Márai Viktor¹ – Szűcs Péter^{1,2}

¹ Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, 3515, Miskolc-Egyetemváros, hgzb@uni-miskolc.hu

² MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport

Összefoglaló: A különböző céllal mélyített fúrások (bányászati, földtani kutatási, építésföldtani geotermikus stb.) mindegyike meghatározható geotermikus potenciállal rendelkezik. Egy projektben kidolgozásra került két új módszer, amelyekkel a mélyfúrások geotermikusenergia-potenciálja határozható meg:

1) Az első módszer egy matematikailag pontosan meghatározható energiaszámítást követ. Ennek a módszernek a gyakorlati alkalmazásához nagyon sok és részletes, sőt sok esetben költségesen beszerezhető információ szükséges.

2) Arra az esetre, ha nem lenne meg minden adat az előző módszernél, kidolgozásra kerül egy másik, ami egy ún. szakértői becslést alkalmaz. Ehhez a szakértői becsléshez a pontos paraméter meghatározása nem szükséges, így minden kút estében alkalmazható.

Kulcsszavak: felhagyott kút, Észak-Magyarország, geotermia

Abstract: All of the wells drilled for different purposes (mining, geological exploration, civil engineering, geothermal purposes, etc.) have a definable geothermal potential. A project has developed two new methods to determine the geothermal energy potential of deep boreholes:

1) The first method follows a mathematically precise energy calculation. The practical application of this method requires a lot of detailed information, which in many cases can be obtained expensively.

2) In the case that the previous method does not have all the data, another method has been developed which uses a so-called expert estimate. This expert estimate does not require the definition of an exact parameter and can be applied to all wells.

Keywords: abandoned well, North Hungary, geotermics

1. BEVEZETÉS

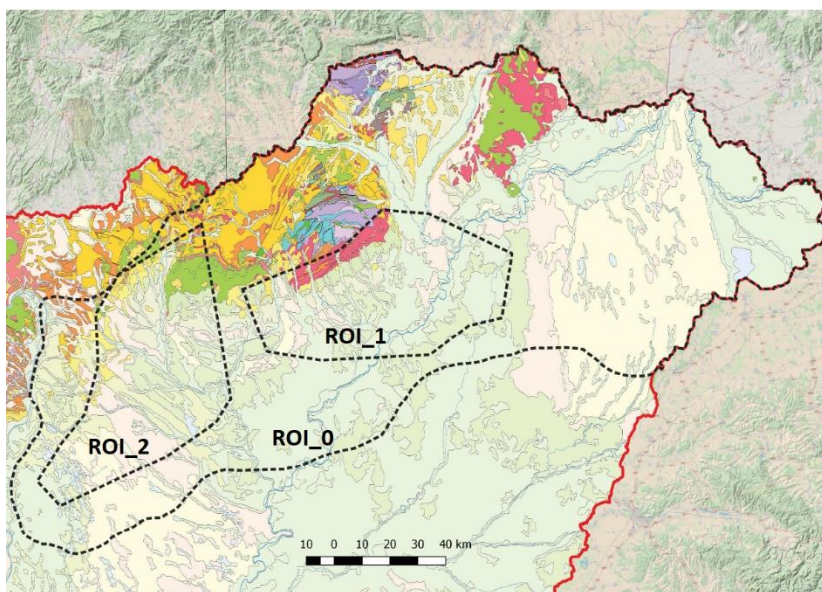
A Miskolci Egyetem 2016-ban indította el az úgynevezett PULSE kutatási projektet. A projekt fő célkitűzései megfelelnek a Nemzeti Energiastratégia által adott céloknak. A három kutatási modul közül az egyik a nem termelő és felhagyott kutak energetikai hasznosításával foglalkozik. A munka kezdetén a magyarországi meddő és felhagyott szénhidrogén-kitermelő kutak speciális adatbázisát építették fel, és egy speciális módszertant hoztak létre, hogy megtalálják ezen kutak lehetséges új felhasználási lehetőségeit a geotermikusenergia-hasznosítás területén. A szénhidrogén-kutak geotermikus hasznosításának általános koncepciója egyértelműnek tűnik, mivel az olajmezőkön a kitermelt folyadékot általánosan 65–150 °C közötti hőmérsékleti tartomány jellemzi [1]. E világos cél ellenére csak kevés jó példa ismert ezen a területen. Világszerte számos geotermikus erőművet telepítettek olajmezőkre segédkezőes rendszerekkel. A kőolajkutakból származó geotermikus energia közvetlen hasznosítása nagyon ígéretes kutatási téma. Wang et al. [2] és Liu et al. [1] két közelmúltbeli cikke számos példát hoz a már működő megvalósításokról.

Magyarországon az első, felhagyott olajkutak hasznosításával foglalkozó kutatási programot 1995-ben indította el a MOL magyar olajipari vállalat [3]. Ennek a projektnek a folytatásaként Iklódbördőcén (Zala megye) kívánták üzembe helyezni az első geotermikus erőművet. Ez a fontos kísérleti projekt két felhagyott szénhidrogén-kitermelő kút átalakítását foglalta magában [4], az egyiket a termásvíz-kitermeléshez, a másikat pedig a visszasajtolási folyamathoz. Sajnos az alacsony termásvízhozam alapján a beruházás nem valósult meg [5].

2. GEOTERMIKUS TERMÉSZETI ADOTTSÁGOK ÉSZAK-MAGYARORSZÁGON

Északkelet-Magyarország két nagy földrajzi egysége az Északi-középhegység és az Alföld. A nagy síksági régió, valamint a hegyvidéki terület geológiája meglehetősen összetett. Az alapképződmények között különféle mezozoikumi (karbonátok, sekély és mélytengeri üledékek), paleozoikumi (sziliklasztos és metamorf kőzetek) és idősebb (főként metamorf) kőzetek találhatók. Sajnos az alapkőzet nagy területeken még mindig nem azonosítható. E területek délkeleti határvonala átfed a közép-magyarországi főegységgel, amely az Alcapa- és a Tisza-főegységet választja el. Egy másik jelentős tektonikai elem, a Darnó-zóna (ÉNY-DK) a Bükk-hegység északnyugati határán halad át a területen. Az alapkőzetre települt kainozoikumi üledékek vastagsága szintén széles skálán mozog. Az alapkőzet legmélyebb része a

vizsgált területen a több mint 5000 m-t is elérheti. Az előzetes értékelések alapján kijelölésre került egy vizsgálati terület (ROI 1, lásd az 1. ábrát). A vizsgált terület északi felszínén miocén savanyú tufák (riolit, dácit és riodácit kőzetek) vannak jelen. A neogén üledékek vastagsága a kísérleti területen (ROI 1) északnyugatról délkelet felé haladva jelentősen növekszik, egészen 4400-5100 m-ig. A központi területet egy sor mélyedés jellemzi (3000-3500 m mélységben). A neogén üledékek főként folyami üledékekből (kavics, homok, agyag, lösz) állnak.



1. ábra. Északkelet-Magyarország geológiai térképe, amely a kiválasztott vizsgálati területet mutatja

Általánosságban elmondható, hogy Magyarországot az ország alatti, viszonylag vékony kéreg miatt természetesen magas geotermikus gradiens jellemzi (kb. 50 °C/km). A geotermikus gradiens értékek területi eloszlása tükrözi Magyarország geológiai szerkezetét. A vizsgált projektterületet magas, 55 és 70 °C/km közötti geotermikus gradiens értékek jellemzik. A hőáramértékek a vizsgált területen 75 és 105 mW/m² között változnak. A kőzet hőmérséklete ilyen körülmények között 1000 m mélységben 60–75 °C, 2000 m mélységben 100–125 °C között változhat [6]. Bár a 20. század elején már fúrtak néhány kutat, a nagyszabású feltárási tevékenység az 1950-es években kezdődött. A befejezett kutak többsége szénhidrogén-kutató fúrás. A kifejezetten termálvízkészletre irányuló kutatás a múlt század közepére nyúlik vissza, de az utóbbi két évtizedben bővült.

3. A GEOADATOK ÖSSZEGYÚJTÉSE A VIZSGÁLT TERÜLET ADATBÁZISÁNAK LÉTREHOZÁSÁHOZ

A célzott kutatómunka egyik fő eredménye a vizsgálati területen található felhagyott és nem termelő szénhidrogénkutak adatbázisának létrehozása, amelyek elméleti geotermikus energetikai felhasználási potenciállal rendelkeznek. Az adatbázis létrehozása három fő forrást foglalt magában, nevezetesen:

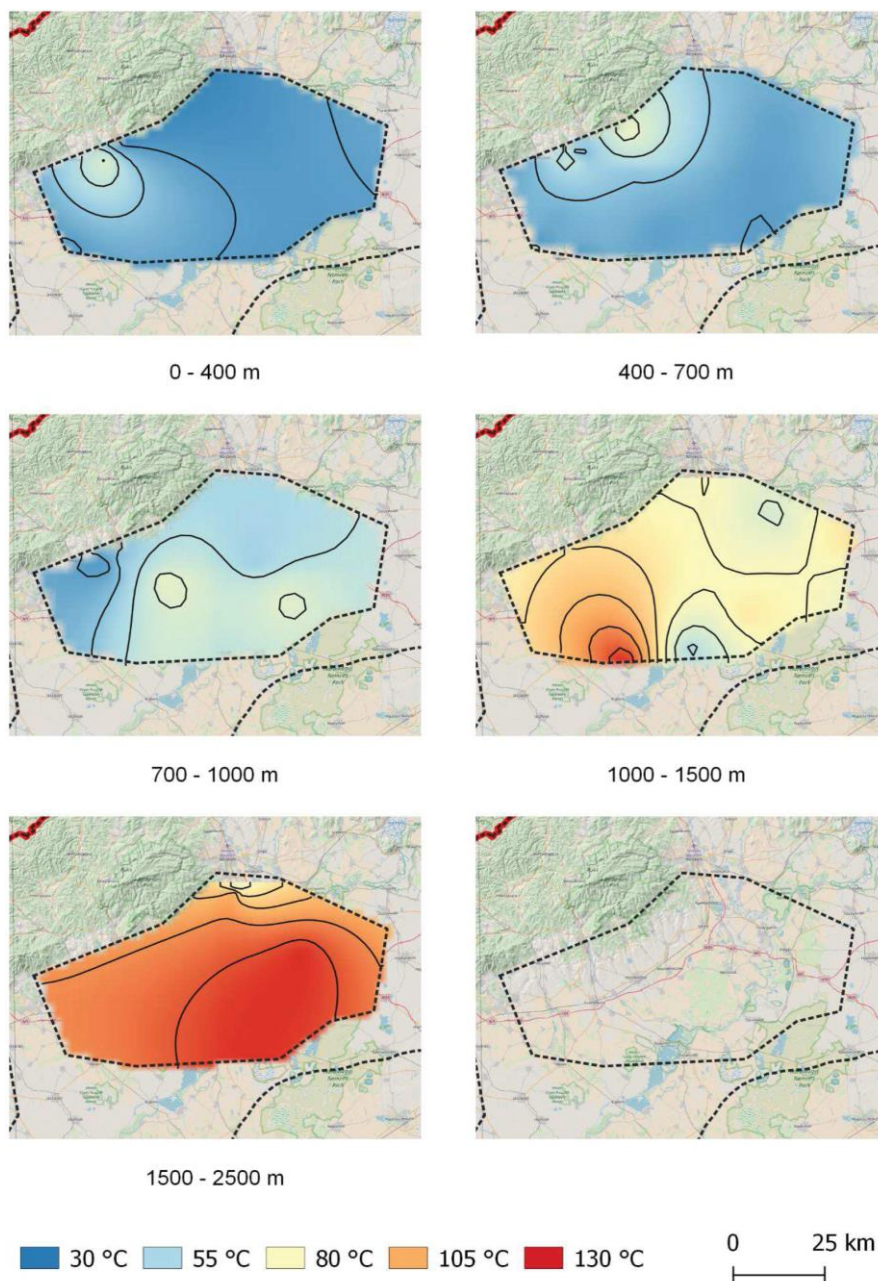
- Magyarország geotermikus felmérése [7],
- A Bükk régió nem termelő szénhidrogénkutainak adatbázisa,
- A magyarországi termálvízkutak katasztere [8], [9].

A Magyarország geotermikus felmérése [7] Magyarország minden tájáról közel 2000 termálvízkút alapadatait (név, azonosító kód, koordináták, mélység és építési év, talphőmérséklet és a kútfej hőmérséklete) foglalja össze. Mintegy 1500 kutat eredetileg a geotermikus energia hasznosítására fúrtak, a többit a szénhidrogén-kutatás vagy -kitermelés céljából végezték. Ezek mindegyike potenciálisan geotermikus funkcióval hasznosíthatónak tekinthető. E kutak adatbázisa részletes leírásokat tartalmaz (pl. geológiai profil, szűrőzés, áramlási sebesség és vízszint). A Magyar termálvízkutak katasztere a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (régibben MBFSZ) által szerkesztett egyfajta könyvsorozat. Számos fontos adatot tartalmaz minden Magyarországon fúrt termálvízkútról. Az egyes köteteket a kútnaplók egészítik ki.

Az adatbázissal szemben támasztott követelmény, hogy minden hasznos adatot tartalmazzon a kút szerkezetéről, a geológiai környezetről, a hidrogeológiai tulajdonságokról, a vizsgálati eredményekről és a hőmérsékleti viszonyokról. Az adatbázis rendkívül részletes adatokat tartalmaz a kiválasztott északkelet-magyarországi vizsgálati területre vonatkozóan. A vizsgált terület lehatárolása geológiai megfontolásokon és a geotermikus energia iránti igények korábbi elemzésén alapult. A projekt részeként kidolgozott módszertan más területek vizsgálatára is alkalmazható lesz. Az

adatbázis-építés első szakaszát követően a már rendelkezésre álló információkat felhasználjuk a vizsgált terület részletes geotermikus jellemzésére.

Elkészült a geológiai képződmények mélység- és vastagságtérképe. A legfontosabb eredmények a különböző mélységekre és különböző geológiai egységekre vonatkozó hőmérséklet-eloszlási térképek. A vizsgált területre vonatkozó adatok a 2. ábrán láthatók.



2. ábra. Hőmérséklet-eloszlás a vizsgált területen belül különböző mélységi intervallumokban

4. EGY ADOTT TERÜLET GEOTERMİKUS POTENCIÁLJÁNAK BECSLÉSÉRE JAVASOLT MÓDSZER

A nagy felbontású geológiai feltárás teljes költsége igen drága [10] egy 10 km x 10 km x 5 km-es blokkprofil esetében 1 milliárd forint körüli összeg. Sok esetben azonban a szükséges geológiai feltárások költség- és időigénye nem becsülhető meg könnyen. A befektetők számára is nehéz egy-egy vizsgált terület geotermikus potenciálját számokban kifejezni.

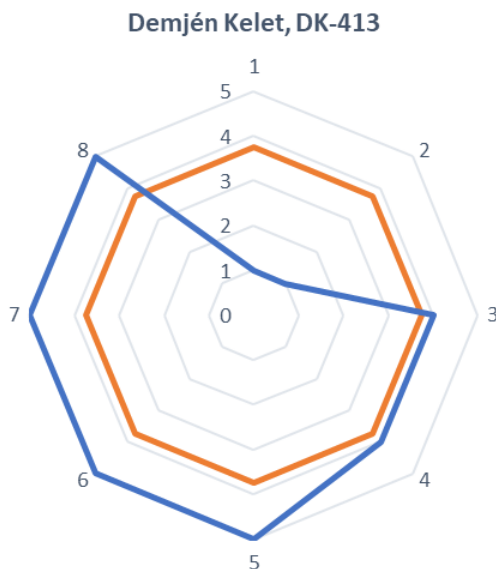
A következőkben egy sokkal olcsóbb becslési módszert mutatunk be, amely csak a meglévő infrastruktúrát és geológiai információkat használja. A vizsgált kutak geotermikusenergia-termelésre való potenciális felhasználásának értékelésére a területen egy speciális szakértői módszert dolgoztunk ki, ahol minden egyes érintett paramétert 1–5 ponttal

értékelünk (1 pont: gyenge, 5 pont: kiváló). A javasolt értékelési rendszerben vizsgált geológiai és infrastrukturális paraméterek megnevezését és a DK-413 (Demjén Kelet) kút minősítését az 1. táblázat tartalmazza. Megállapítható, hogy a nyolc vizsgált minősítési paraméter származtatott számtani átlaga (3,75) az adott kútra vonatkozó, feltételes ajánlasként értelmezhető. Az általános geotermikus paraméterek viszonylag jók, de a vizsgált kút műszaki állapota rossz.

1. táblázat. A Demjén DK-413 kúthoz javasolt értékelési rendszerek
2.

A kút részletes geotermikus energetikai minősítése			
	Vizsgált paraméter	Érték	Eredmény (pont)
1.	Fúrás éve (skála: 1970 - 1; 1971–1980 -2; 1981–1990 - 3; 1991–2000 - 4; 2001– 5)	1971	1
2.	Kútfunkció (skála: műszakilag felszámolt, rekultivált - 1; műszakilag felszámolt - 2; cementdugóval biztonságba helyezett - 3; olajtermelésre kialakított - 4; víztermelő, vízvisszasajtoló, gáztermelő - 5)	műszak. felszámolt, rekultivált	1
3.	A fluidum mennyisége (m³/nap) [Mért - Becsült] (skála: 1–20 - 1; 21–40 - 2; 41–100 - 3; 101–500 - 4; 501 < - 5)	440	4
4.	A fluidum kifolyó hőmérséklete (°C) [Mért - Becsült] (skála: 4–20 - 1; 21–40 - 2; 41–60 - 3; 61–85 - 4; 86 < - 5)	65	4
5.	A fluidumból kinyerhető geotermikus energia (MJ/nap): (skála: 0–500 - 1; 501–1e - 2; 1e–5e - 3; 5e–10e - 4; 10e < - 5)	117418	5
6.	A kút 1m-es környezetéből maximálisan kinyerhető fajlagos (átlagos) geotermikus energia (MJ) (skála: 0–100 - 1; 101–200 - 2; 201–400 - 3; 401–800 - 4; 801 - 5)	688.9e	5
7.	A szűrőzött szakasz összes hossza (m)? (skála: 1–5 - 1; 6–10 - 2; 11–20 - 3; 21–40 - 4; 41 - 5)	207	5
8.	Az infrastruktúra összesített távolsága (km)? (skála: 0–5 - 5; 5–10 - 4; 10–20 - 3; 20–30 - 2; 30 - 1)	2,31	5
Átlag:			3,75

Az értékelés során vizsgált 8 különböző paraméter eloszlása a 3. ábrán látható. Az ábrán az egyes paraméterek sorszáma és értéke mellett a paraméterek átlaga is szerepel.

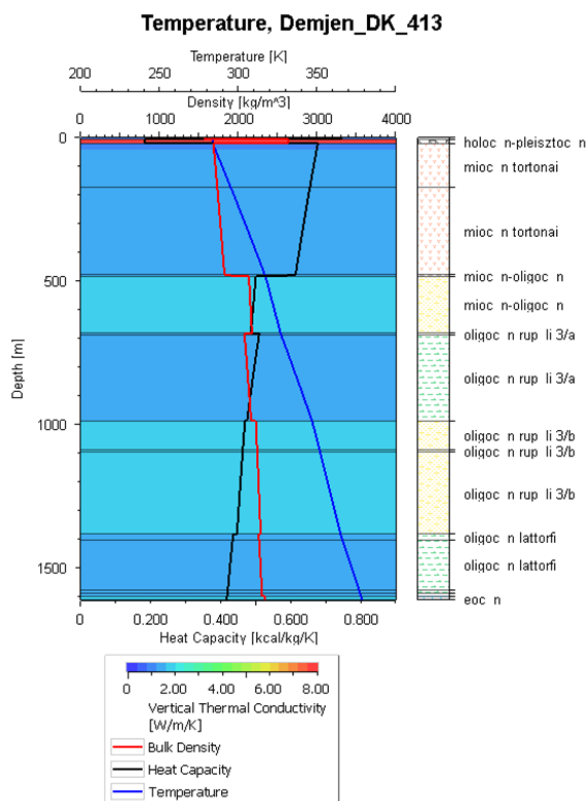


3. ábra. Az értékeléshez vizsgált paraméterek eloszlása és a paraméterek átlaga

A medencemodellezés segítségével pontosan meghatározható a kőzetmátrixból (6. paraméter) és a pórusfolyadékból (5. paraméter) kinyerhető geotermikus energia mennyisége. A geológiai medencemodellézést a szénhidrogén-kutatásban az üledékképződési medencék időbeli és térbeli modellezésére használják, de ez a megközelítés

a geotermikus feltárás során a geotermikus történelem rekonstruálására is jól alkalmazható. A medencemodellzés alkalmas a vizsgált terület 3D-s geotermikus modelljének létrehozására, feltéve, hogy az előzetes geológiai-földtani felmérések alkalmasak a modell felépítéséhez szükséges bemeneti paraméterek értékeinek meghatározására.

Ha egy adott kútnál a próbafúrásokból ismert a folyadékból kinyerhető geotermikus energia mennyisége (5. paraméter), akkor ezt levonjuk a medencemodellezéssel meghatározott összes energiából, hogy a kőzetmátrixból származó geotermikus energiát kapjuk (6. paraméter). A geotermikus modellezés szimulációs eredménye a PetroMod szoftterrel a DK-413 fúrás esetében a 4. ábrán látható.



4. ábra. A kőzet sűrűségének (fekete), hőkapacitásának (piros) és hőmérsékletének (kék) mélységi eloszlása a DK-413-as kútban

Következő lépésként a terület minden egyes kútjára ki kell számítani az átlagos minősítési eredményt (E_i), és az alábbi összefüggés segítségével meg kell konstruálni a területértéket (A_v) a következő képlettel:

$$A_v = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N} \quad (1)$$

A kapott területérték (TÉ) alapján a terület geotermikusenergia-termelésre való potenciális felhasználása a következő három csoportba sorolható:

- $TÉ < 3,0$ – a terület geotermikus hasznosítása nem javasolt,
- $3,0 < TÉ < 4,0$ – a terület geotermikus hasznosítása ajánlott,
- $4,0 < TÉ \leq 5,0$ – a terület geotermikus hasznosítása erősen ajánlott.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS TOVÁBBI MUNKA

Számos, potenciálisan geotermikusan hasznosítható kutat tartalmazó új, nagy adatbázis készült, amelyet a közeljövőben bővíteni fognak. Az adatbázis tartalmaz felhagyott és nem termelőkény szénhidrogén-kutakat, valamint számos már használt geotermikus és vízkutat. Az adatbázisban a geológiai képződményekre és rétegekre, a hőmérsékletekre, az áramlási sebességre, a víz kémijára, valamint a szűrésre és a burkolatra vonatkozó információk találhatóak. Az adatkészlet alapul szolgál néhány kiválasztott terület geotermikus potenciáljának értékeléséhez. Kétféle elemzés végezhető, lokális, kútszintű és regionális, ami végül további geotermikus fejlesztésekhez vezethet.

Az adatbázis elemzése és értelmezése betekintést nyújtott az érdeklődésre számot tartó régiók geotermikus viszonyaiba. Mivel az adatbázis további részletekkel fog kiegészülni, lehetővé teszi a lehetséges geotermikus fejlesztések megfelelő geológiai, műszaki és gazdasági értékelését.

Azokra az esetekre, amikor a részletes geológiai modell nem ismert, és a modell kidolgozásához szükséges költség és idő sem biztosítható, a cikk egy szakértői módszert mutat be. A vizsgált terület geotermikusenergia-termelésre való alkalmassága ezzel megbecsülhető.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] X. Liu, G. Falcone, C. Alimonti, "A systematic study of harnessing low temperature geothermal energy from oil and gas reservoirs", *Energy*, 142, pp. 346–355, 2018.
- [2] K. Wang, B. Yuan, B. Ji, X. Wu, "A comprehensive review of geothermal energy extraction and utilization in oilfields", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168, pp. 465–477, 2018.
- [3] M. Árpási, Gy. Póta, A. Andristyaká, "Geothermal pilot projects on utilization of low-temperature reserves in Hungary", *Geothermal Resources Council Transactions*, 21, pp. 327–330, 1997.
- [4] E. Bobok, A. Tóth, "First geothermal pilot power plant in Hungary", *Acta Montanistica Slovaca*, 12(1), pp. 176–180, 2007.
- [5] Tóth A.: „Zala megye geotermikus viszonyai”, *Műszaki Földtudományi Közlemények*, 86(2), pp. 180–187, 2017.
- [6] P. Dövényi, F. Horváth, P. Liebe, J. Gálfí, I. Erki, "Geothermal conditions of Hungary", *Geophysical Transactions*, 29(1), pp. 3–114., 1983.
- [7] A. Tóth: *Geothermal survey of Hungary*, Hungarian Energy and Public Utility Regulatory Authority, ISBN 978-963-12-7712-8 2016
- [8] VITUKI, Magyarország hévízkútjai VI. kötet. Budapest : Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Rt. (VITUKI Rt.), 1994
- [9] MFGI, Magyarország hévízkútjai VII. kötet kiegészítése javításokkal. Budapest : Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, 2015.
- [10] Turai E., Vurom B. 2013: Az IP módszer alkalmazási lehetőségei a vízbázisvédelem területén. IX. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Miskolc, pp. 237–242.

A hulladékhő-tárolás lehetőségének vizsgálata porózus rendszerekben

Investigation of waste heat storage in porous systems

Dr. Zákányi Balázs^{1*} – Nyíri Gábor¹ – Dr. Szűcs Péter^{1,2}

¹ Miskolci Egyetem, Környezetgazdálkodási Intézet, 3515, Miskolc-Egyetemváros, hgzb@uni-miskolc

² MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport

Összefoglaló: Kutatásunk során a hőtárolás lehetőségeit vizsgáltuk sekély porózus körülmények között. A hőenergia tárolását ebben az esetben egy vízádó végzi (Aquifer Thermal Energy Storage – ATES), amely egy felszín alatti, telített természetes közetréteg. Ez a fajta hőtárolótípus különböző hatásokat gyakorolhat a felszín alatti vizekre és a mélyen fekvő víztartó rétegekre egyaránt, ezért ismernünk kell az ATES-rendszerek viselkedését. A hulladékhő-tárolás szimulációs vizsgálataink legfőbb célja az volt, hogy nagy mennyiségű hulladékhővel rendelkező ipari létesítmények számára alternatívát tudjunk felállítani az ilyen típusú hőtárolással.

Kulcsszavak: hulladékhő, ATES, porózus rendszer

Abstract: We investigated the potential of heat storage in shallow porous conditions. The thermal energy storage is provided by an aquifer thermal energy storage (ATES), which is a saturated natural rock layer below the surface. This type of thermal storage can have different effects on the groundwater as well as deep aquifers, so it is important to be familiar with the ATES systems. The main objective of our waste heat storage simulation studies was to investigate the industrial plants with large amounts of waste heat to provide an alternative to the this type of heat storage.

Keywords: waste heat, ATES, porous systems

1. BEVEZETÉS

Az energiaigények általában nem állandóak, ahogyan az energiaellátás sem (például a napenergia), ezek a tények arra ösztönöznek minket, hogy hatékonyabb és gazdaságosabb energiafelhasználási módot találjunk nemcsak az energiatermelés, -átvitel, -elosztás és -fogyasztás területén, hanem az energiatárolás (Energy Storage, ES) terén is [1].

A probléma megoldásának egyik lehetősége a hőtárolás, amely puffert tud biztosítani az energia iránti kereslet és kínálat ingadozásának kiegyenlítésére. Ez a technológia csökkentheti a megújuló energiát hasznosító technológiák különböző hiányosságait azáltal, hogy a magas termelési intervallumokban a megújuló energia többletét tárolja, hogy az alacsony termelési intervallumokban fellépő esetleges hiányt ellensúlyozza, különösen a szél- és napenergia esetében, amelyek rendelkezésre álló energiatermelése változó a különböző órákban. Ehhez az energiatároló rendszereknek tükrözniük kell az energiaigény ciklusait, rövid, közép- vagy hosszú távú (szezónális) tárolási kapacitással [2]. A termikus energiatárolás (TES) szezonális tárolórendszerként képes tárolni a nyári többlet-hőenergiát, hogy télen felhasználható legyen, jelentősen hozzájárulva az energiafelhasználás hatékonyságának javításához. Fő előnye, hogy kihasználja azt a hőenergiát (hőt és hideget), amely egyébként elveszne, mert rossz időben, rossz helyen állt rendelkezésre. Ezen energiatárolási módszer révén a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása, valamint az üvegházhatású gázok és a légszennyező anyagok (például CO₂, SO_x és NO_x) kibocsátása is jelentősen csökkenthető.

2. HŐTÁROLÁSI LEHETŐSÉGEK

Napjainkban a megújuló energiaforrások használata döntő szerepet játszik a globális klímaváltozás és az energiaválság tekintetében. 2021-ben a túlfogyasztás napja július 29-ére esett, vagyis nagyjából hét hónap alatt éltük fel a Föld erőforrásait, ami cselekvésre késztet bennünket az energia hatékony felhasználásával, tárolásával, elosztásával kapcsolatban.

Az energiaigényről és a megújuló esetében az energiatermelésről elmondható, hogy nem egy időben állandó, konstans számértékről beszélhetünk, hanem egy időben változó energiamennyiségről. Egy lehetőség lehet ezen probléma megoldására a hőenergia-tárolás, mely puffert biztosíthat az energiafelhasználás és -termelés közötti fluktuáció áthidalására, így követni tudja a ciklikus energiafelhasználási folyamatokat mind rövid, mind közép-, mind hosszú távon [3].

2.1. Hőenergia-tárolás

Ez az energiatárolási forma a magas és alacsony hőmérsékletű hőenergia ideiglenes tárolását jelenti a későbbi felhasználásra vonatkozóan (1. ábra). A későbbi felhasználás vonatkozhat fűtésre, hűtésre, olvasztásra, cseppfolyósításra, valamint párologtatásra.

A hőenergia-tárolás (termikus energiatárolás) fajtái:

- Tárolt energia a hőmérséklete szerint
 - Alacsony hőmérsékletű energia tárolása
 - Magas hőmérsékletű energia tárolása
 - Tárolási idő szerint
 - Rövid távú
 - Hosszú távú
 - Az energiavivő anyag állapota szerint
- Látens hőtárolás
- Termokémiai hőtárolás
- Szenzibilis hőtárolás



1. ábra. Az energiatároló módszerek osztályozása [4] alapján

A termokémiai hőtárolás esetén olyan kémiai anyagokat alkalmaznak, amikor az adott kémiai anyag nagy mennyiségű hőt képes felvenni vagy leadni, miközben kémiai kötések bomlanak fel vagy alakulnak ki.

A szenzibilis (jó hővezető anyagokhoz kötődő) hőtárolás esetén a tároló anyag hőmérsékletét változtatjuk meg, és a közeg belső energiájában idézünk elő változást, fázisátalakulás nélkül.

A látens hőtárolás azt használja ki, hogy az anyagok fázisátalakulásuk során energiát vesznek fel vagy adnak le anélkül, hogy a hőmérsékletük változna, így nagy mennyiségű hőt tudnak tárolni.

2.2. Felszín alatti hőtárolás

Felszín alatti hőtárolást a természet is biztosít számunkra, hiszen a felszín alatti közeg passzívan hőt tárol az évszakok váltakozása miatt. 10-15 méteres mélységben a talaj, valamint a talajvíz hőmérsékletét nem befolyásolja az időjárásból adódó hőmérséklet-változás, ezért télen magasabb, nyáron pedig alacsonyabb hőmérsékletű a felszín alatti közeg, mint amit a felszínen tapasztalunk. Ebből kifolyólag a talaj és a talajvíz hőtárolásra alkalmas közegnek tekinthető.

A különböző hőkinyerő rendszereket gyakran hűtésre és fűtésre is alkalmazzák az évszaktól függően. Ez azt jelenti, hogy a kitermelt hőt nyáron visszajuttatják a felszín alatti közegbe, ezáltal a talaj és talajvíz egy hőtároló rendszert alkot, melyben optimális esetben hőegyensúly alakul ki. Ha ez a hőegyensúly felborul (tehát a fűtési igény alacsonyabb vagy magasabb, mint a hűtési igény), akkor kiegészítő hőtároló rendszerre van szükség. Azon rendszereket, amelyek a hőtárolást természetes felszín alatti közegben teljesítik, felszín alatti hőtároló rendszereknek (Underground Thermal Energy Storage – UTES) nevezzük.

Föld alatti hőenergia-tároló rendszerek	Tárolási hőmérséklet	
		* Alacsony hőmérsékletű rendszer * Magas hőmérsékletű rendszer
	Tárolási cél	* Fűtés * Hűtés * Kombinált
	Felhasználás	* Lakossági * Kereskedelmi * Ipari
	Tárolási technológia	* Víz tározóban termikus energiatárolás (ATES) * Fűtőlukakban történő hőenergia-tárolás (BTES) * Barlangi hőenergia-tárolás (CTES) * Bányagödörben történő tárolás * Felszín alatti tartályokban történő tárolás

2. ábra. Az UTES-rendszerek osztályozása [1] alapján

Ezen rendszerek előnyeit a következőkben foglalhatjuk össze:

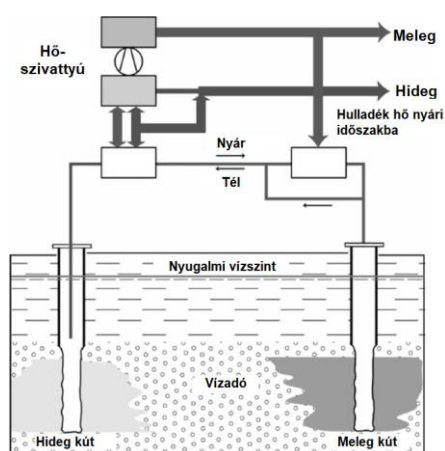
- nagy energiataralékok tárolhatók természetes módon, melyek később többféleképpen felhasználhatók (hűtés, fűtés),
- alacsony üzemeltetési költségek, amelyek hosszú távon profitot hoznak,
- környezetbarát technológia,
- lehetőséget ad a felhagyott, valamint a termelésből kivont kutak további hasznosítására.

A felszín alatti hőtároló rendszerek az alábbi szempontok szerint osztályozhatók (2. ábra):

- tárolt hőmérséklet (alacsony, magas),
- a hőtárolás célja (hűtés, fűtés, kombinált),
- hőtárolási technológia (nyitott, zárt, egyéb),
- az alkalmazás, felhasználás helye (lakóépület, közintézmény, ipari felhasználás).

2.3. Aquifer thermal energy storage (ATES) rendszer

A felszín alatti nyílt hőtároló rendszerek sematikus ábráját mutatja a 3. ábra. Ezen rendszerek alkalmazhatóságát alapvetően a területi kiterjedés, valamint a rétegvastagság határozza meg, azonban a tárolókapacitás nagyságrendekkel kisebb térfogat, mint a vízáadó térfogata. További fontos paraméterek a vízáadó tekintetében a porozitás és a szivárgási tényező.



3. ábra. Vízáadóhoz köthető hőenergia-tárolás sematikus ábrája [1] alapján

A vízáadó termikus viszonyai szintén befolyásoló tényezők a hőraktározás tekintetében. Fontos paraméter a fajhő, ami befolyásolja a tárolható hő mennyiségét adott hőmérséklet-változás mellett. A porózus vízáadó rendszerek hővezető képessége nem változik széles skálán, a felszín alatti közegek inkább szigetelőnek tekinthetők. Ebből kifolyólag a hőtároló kapacitás meghatározásánál a hővezető képesség egy másodlagos paraméter.

A helyspecifikus hidrogeológiai paraméterek fúrásokkal, valamint próbaszivattyúzási vizsgálatokkal határozhatók meg.

Egyéb meghatározandó paraméterek:

- sztratigráfia,
- szemeloszlás,
- repedezett zónák eloszlása,
- a vízáadó mélysége, peremfeltételek, a vízáadó határai,
- tárolási tényező,
- vertikális vízmozgás mértéke,
- konszolidációs fok,
- geotermikus gradiens,
- nyugalmi vízszint,
- a természetes vízáramlás iránya, mértéke,
- vízkémiai tulajdonságok.

3. MODELLEZÉSI VIZSGÁLATOK

Modellezést sokféle okból kifolyólag alkalmazhatunk, azonban a hőtárolás esetében a fő szempont, hogy megvizsgáljuk egy adott rendszer működőképességét. Különböző kútelrendezés-, hőmérséklet-, valamint hozamadatokat megvizsgálva megállapíthatjuk azokat az optimális paramétereket, melyeknél egy adott rendszer gazdaságosan működik [5].

A modellezések alapvetően kétféle eredményt adnak:

- a hőtároló rendszer felszín alatti vizekre gyakorolt hatása (vízszintemelkedések, és vízszintesökkenések meghatározása);
- hőhatással érintett zóna lehatárolása.

Az alkalmazott modellezési környezet a Groundwater Modeling System 10.3. programcsomagja, mely tartalmazza az MT3DMS modult, ami képes a hőtranszport-modellezésre.

Munkánk során vizsgáltunk olyan hőtárolási lehetőségeket, ahol feltételezésünk szerint erre igény lenne. A választott mintaterületünk Tiszaújváros környéke, ahol az ott található ipari parkban nagy mennyiségű hulladék hő keletkezik. A területre jellemző, hogy az ipari park területén képződő hulladék hő a Tiszába vezetik, ezáltal a folyó ökoszisztémájában változásokat idéznek elő. Célunk megvizsgálni, hogy ezen nagy mennyiségű hő tárolása lehetséges-e a Tiszaújváros térségére jellemző földtani környezetben. Vizsgálatunk számítógépes szimulációra támaszkodik, mely során modellezzük, hogy a hulladék hő felszín alatti közegbe való besajtolása, majd annak kitermelése milyen mértékben változtatja meg a természetes vízáramlási rendszereket, valamint ezen hőtárolás milyen hatásfokkal működhet.

A földtani felépítés jellemzője, hogy üledékes, porózus rendszer található, mely alkalmas lehet a hő közvetítő közeggel (víz) történő bejuttatására. Az üledékes környezet jelenlétét a környéken található termálkútak vízföldtani naplója is igazolja. A kapott vízföldtani naplók a Tiszaújváros területén található K-50, K-75, K-77, és K-123 jelű kutakra vonatkoznak. A vízföldtani naplók alapján egy földtani modellt építünk fel. A földtani modell felépítése után a nyugalmi vízszinteket, vízkivételeket – figyelembe véve a felszín alatti vízáramlást – fogjuk szimulálni. Kutatásunk célja megállapítani, hogy milyen vízszintváltozásokat okoz a tervezett vízkivétel, valamint a visszasajtolás. A hidrogeológiai modell felépítése után célunk egy hőtranszportmodell felállítása, ami megmutatja, hogy milyen hőmérsékletviszonyok alakulnak ki ezen hőtárolás hatására a vízáadó rétegben. Ezen vizsgálatok kiegészülnek szcenárióvizsgálatokkal, melyeket különböző hozam- és hőmérsékletviszonyokra kívánunk elvégezni.

A MODFLOW képes a térben változó víztartó tulajdonságok, a geológiai rétegződés és a termelő-/injektáló kutak több intervallumon átívelő szűrőzésnek beépítésére, állandó folyadéksűrűség és teljes telítettség feltételezése mellett. Az MT3DMS-szimuláció beállítása előtt léteznie kell egy MODFLOW-megoldásnak a területre jellemző hidrodinamikai tulajdonságokkal, ami az alapja a transzportszimuláció áramlási mezőjének.

Az injektálási és termelési ciklus 25 évig ismétlődik. A szimulációk során a hidraulikus nyomás és a hőmérséklet nyomon követése érdekében 10 méterenként megfigyelési pontok kerülnek bevitelre a termelő- és a monitoringkutak helyére.

A következő kísérleti szimulációs forgatókönyveket végeztük el:

- Minden kútnál a kettős funkciót alkalmazzuk, ahol félevenként váltakozik az injektálás és a termelés. 6 hónapon keresztül 333,15 K (60 °C) kezdeti hőmérsékletű vizet injektál 1500 m³/nap hozammal, és 2000 m³/nap hozamú kúttal évente 6 hónapon keresztül termel.
- A kútrendszer alkalmazása, ahol 2 db kútnál állandó 1500 m³/nap hozammal 333,15 K (60 °C) hőmérsékletű vizet injektálnak a rétegbe 6 hónapon keresztül, majd 2 db másik kútnál 2000 m³/nap hozammal termelnek évente 6 hónapon keresztül.

4. MODELLEZÉSI EREDMÉNYEK

Első szcenárió

A 4. ábra a szezonális ATES kettős funkciójú kutak 25 éves működéséből származó vízszintváltozásokat mutatja. A változó hidraulikus nyomásmagasságok az injektálási időszak alatt a kút melletti területen növekednek, és együttesen mintegy 400 méteres közvetlen hatósugarat hoznak létre, a nyugalmi vízszinttől való maximális vízszintemelkedés körülbelül 11,35 méter, a legmagasabb megfigyelt vízszint pedig 95,95 mBf felett van.

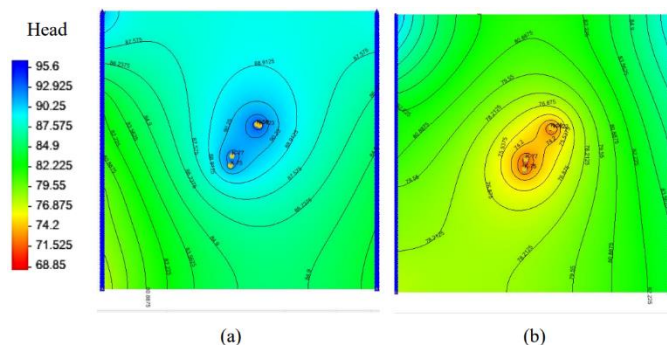
Ezután az áramlási irány megváltozik a termelőkutak felé, létrehozva egy közvetlen hatásterületet, amely körülbelül 450 méter, a maximális különbség a kezdeti és a termelési vízszintek között 15,13 méter, és a legalacsonyabb megfigyelt vízszint 69,13 mBf-re adódott.

A hőtranszportmodell eredménye a 5. ábrán látható. A hőbeinjektálás a K-50 és K-123 kutaknál együttesen mintegy 90 méter átmérőjű hőcsóvát hoz létre, míg a K-75 és a K-77 kutaknál külön-külön egy-egy 60 m átmérőjű alakul ki. Miután a kitermelési időszak megkezdődött, a hőcsóvák visszahúzódnak a kutakba. A K-50 és a K-123 környéki területen a hővisszahúzás gyorsabban megy végbe. Másrészt a K-75 és K-77 injektálási időszakából származó meleg víz mindig összegyűlik a kutak körül, ami azt jelenti, hogy a K-75 és K-77 kutak körül mindig adódik maradék hőmennyiség a vízáadó rétegben.

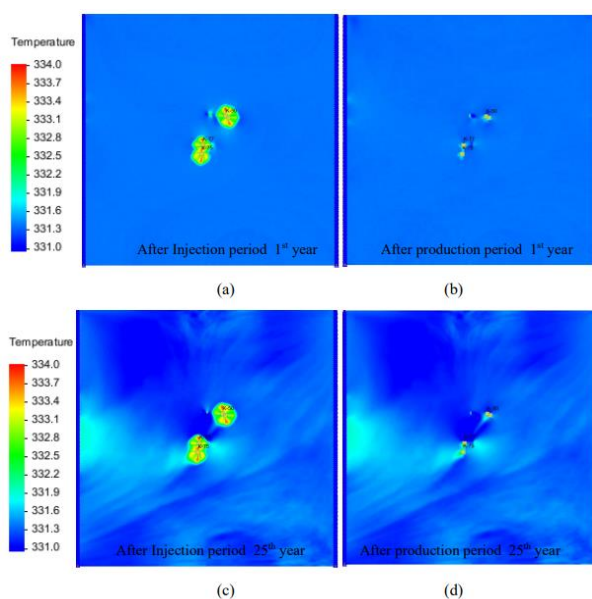
Második szcenárió

A második esettanulmány esetében a 25 éves működéséből származó megfigyelt hidraulikus nyomáseredmények változásait a 6. ábra mutatja. A K-50 és a K-123 injektáló kutakat 1500 m³/nap, míg a K-75 és a K-77 termelőkutakat 2000 m³/nap állandó hozammal működtetik, évi 6-6 hónapon keresztül. A betermelési időszak alatt a megfigyelt hidraulikus nyomásmagasságok megemelkednek, és körülbelül 190 méteres közvetlen hatósugarat eredményez. Ezt

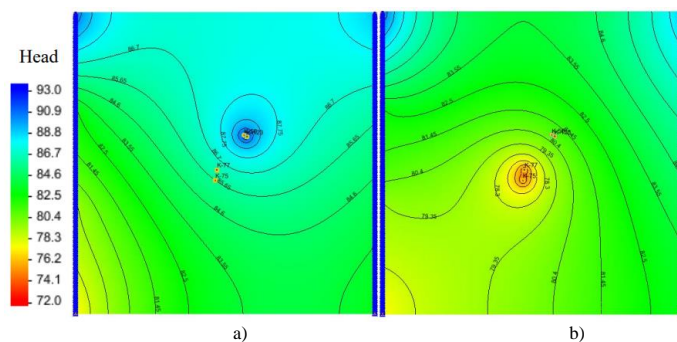
követően a termelési időszak megkezdődik, és mintegy 170 méteres közvetlen hatósugarat hozva létre, továbbá a vízszintekre gyakorolt hatás a K-50 és K-123 kutaktól a K-75 és K-50 termelőkutak felé haladva csökken.



4. ábra. Az első forgatókönyv alapján kialakuló vízszintváltozások a) az injektálási időszak, és b) a termelési időszak után (a 25. év végén)

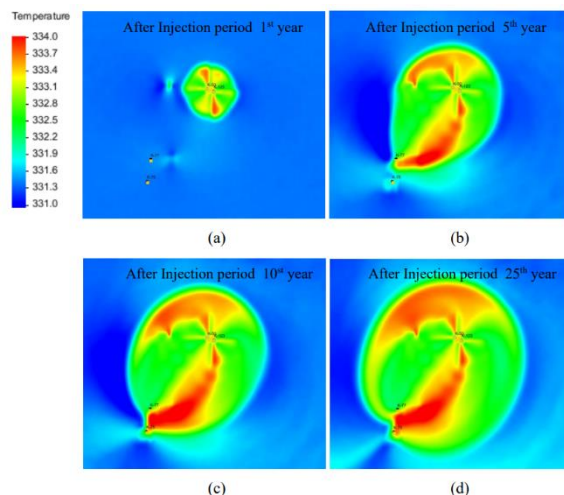


5. ábra. Az első scenárió esetén különböző időpontokban kialakuló hőmérséklet-eloszlások láthatóak a) az első injektálási időszak utolsó napján, b) az első termelési időszak utolsó napján, c) a 25. év injektálási időszak utolsó napján, és d) az utolsó éves termelési időszak utolsó napján



6. ábra. Az második forgatókönyv alapján kialakuló vízszintváltozások a) az injektálási időszak, és b) a termelési időszak után (a 25. év végén)

A hőtranszportmodell eredménye láthatók a 7. ábrán. A hőeloszlás a K-50 és a K-123 injektáló kutaknál az első injektálási ciklus végén körülbelül 90 méter átmérőjű, majd a 4. évben láthatóan eléri a K-77, és a 6. évben a K-75 termelőkutakat. Ezután mindkét kútnál a hőmérséklete évről évre növekszik.



7. ábra. Az második szcenárió esetén különböző időpontokban kialakuló hőmérséklet-eloszlások láthatóak az injektálás során a) az első év b) az 5. év c) a 10. év és d) a 25. év utolsó napján.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Háromdimenziós hőtranszport-szimulációs vizsgálatok segítségével azonosítottuk azokat a paramétereket, amelyek a legjobban befolyásolják az ATES-rendszer termikus viselkedését, ezek a következők:

1. az injektáló kút és a termelőkutak közötti távolság;
2. a terület tulajdonságai, ahol a termelőkut(ak)at elhelyezik;
3. az injektáló és termelési hozam az egyes kutaknál, valamint a hidraulikai és termikus paraméterek.

A szimulációs vizsgálati eredmények azt mutatják, hogy a hőtranszport-modellek viszonylag érzékenyek a szivárgási tényező értékére, amit a későbbiekben paraméter-érzékenységi vizsgálatokkal is alá fogunk támasztani. Az olyan paraméterek, mint az effektív porozitás és a hidrodinamikai diszperzivitás valószínűleg mérsékelt hatással bírnak. A szimulációkból úgy tűnik, hogy a nagyobb befecskendezési térfogat és a magasabb hőmérséklet, valamint a hosszabb ideig tartó befecskendezés azok a paraméterek, amelyek hozzájárulhatnak a rétegben a magasabb hőmérséklethez és a nagyobb hőtárolási kapacitásokhoz.

A tanulmányban szereplő szimulációs kísérletek azt mutatják, hogy a két szimulált hőtranszportmodell megfelelően meg tudja jósolni a hőszállítás és -tárolás hatásait az ATES-rendszerekben, még akkor is, ha a befecskendezett termásvíz és a környezet hőmérséklete közötti különbségek kismértékűek. Mindazonáltal a szimulációs modellek felhasználhatók az ATES-rendszerek hatékonyságának és hőtermelésének vizsgálatára különböző hidrogeológiai környezetek esetében, ami nagy segítség lehet a jövőben egy rendszer tervezésének és kivitelezésének folyamatában.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] K. S. Lee, *Underground Thermal Energy Storage*. Green Energy and Technology series, London : Springer-Verlag, 2013.
- [2] K. Nielsen, *Thermal Energy Storage A State-of-the-Art*. Trondheim : NTNU, pp. 4–15.
- [3] Miklós R., „Potenciális termálkarsztvíz áramlási pályák lehatárolási lehetősége a Bükk dél-keleti előterében”, In: Tometz, L; Tometzova, D; Dirnerová, D (szerk.) *Lectures of 14th International Scientific Conference on Mineral Waters of the Carpathian Basin*, Technical University of Kosice, pp. 46–56.
- [4] I. Dinc, M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage - Systems and Applications*, second edition, John Wiley and Sons Ltd., pp. 51–186, 2011.
- [5] J. Hecht-Méndez, N. Molina-Giraldo. P. Blum, P. Bayer, „Use of MT3DMS for Heat Transport Simulation of Shallow Geothermal Systems”, *Proceedings World Geothermal Congress 2010*.

MECHATRONIKA SEKCIÓ

Frekvenciaváltóval hajtott háromfázisú aszinkronmotorok távoli vezérlési lehetősége NI MyRIO eszközzel

Remote control of three-phase asynchronous motors driven by a frequency converter with NI MyRIO device

Dr. Ferenczi István^{1} – Ferenczi Ildikó²*

*1 Nyíregyházi Egyetem, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b, ferenczi.istvan@nye.hu
2 Nyíregyházi Egyetem, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b, ferenczi.ildiko@nye.hu*

Összefoglaló: Napjaink korszerű gyártásautomatizálási megoldásainak nélkülözhetetlen szereplői a frekvenciaváltóval táplált háromfázisú aszinkronmotorok. A frekvenciaváltó segítségével akár a nagy teljesítményű, háromfázisú aszinkronmotorok fordulatszáma bármikor a megmunkálási feladathoz szükséges technológiai fordulatszámra állítható be viszonylag egyszerű módon. A National Instruments cég által támogatott felületek pedig lehetőséget biztosítanak olyan korszerű virtuális HMI-felületről (operátori munkaállomás) történő irányításokra, amelyek akár távoli beavatkozást is lehetővé tesznek. Ebben a cikkben egy olyan megoldást mutatunk be, amely egy szintén általunk korábban készített, klasszikus, NI-eszközzel történő irányítást egy korszerű, kompakt felépítésű MyRIO vezérlővel helyettesítettük. A MyRIO vezérlők képesek vezeték nélküli WiFi-kapcsolaton keresztül, akár távoli irányítás megvalósítására is.

Kulcsszavak: frekvenciaváltó, MyRIO, LabView, motorvezérlés, interfész, WiFi

Abstract: Three-phase asynchronous motors driven by frequency converters have almost become indispensable in modern-day factory automation. With the help of the frequency converter, the speed of the high-performance three-phase asynchronous motor can be easily configured and adjusted to the speed requirements of the manufacturing task at hand. In addition, the interfaces provided by the National Instruments Corporation allow for control operations to be carried completely remotely from modern virtual HMI or operator workstations. In this article, we are going to present a control solution whereby a classic NI device control setup, which we had developed in earlier work, gets replaced by a compactly structured MyRIO device. MyRIO devices are capable to control remotely simply through WiFi connection.

Keywords: frequency converter, MyRIO, LabView, motor control, interface, WiFi

1. BEVEZETÉS

Az iparban a legelterjedtebben, nagy darabszámban telepített villamos forgógép, a háromfázisú, rövidre zárt forgó részű aszinkronmotor. Felépítésük egyszerű, működésük üzembiztos, beszerzési áruk alacsony, és ha olyan helyen kell használni, ahol nem kell a fordulatszámot tág határok között változtatni, akkor közvetlenül, egyéb berendezés nélkül is használhatók.

Egy nem túl régi, európai felmérés szerint a beépített motorok csak mintegy 10%-a rendelkezik fordulatszám-változtatással, de az előrejelzések szerint azonban ez az arány a nem túl távoli jövőben teljesen megfordul. A megoldást a frekvenciaváltók alkalmazása jelenti, ugyanis a háromfázisú aszinkronmotorok fokozatmentes és veszteségmentes fordulatszám-változtatási lehetőségét a táplálási feszültség frekvenciájának változtatása teszi lehetővé.

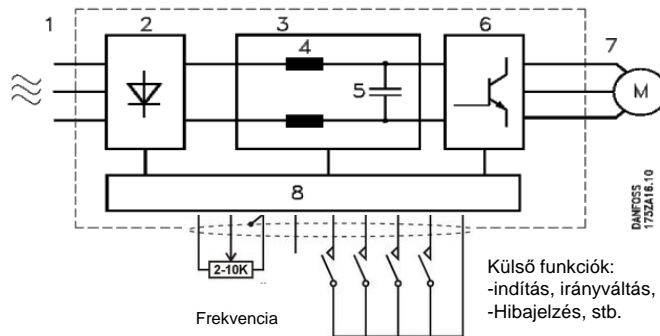
$$n = 60 \frac{f}{p} (1 - s) \quad (1)$$

A fenti (1) összefüggésben f a frekvenciát, p a póluspárok számát, s pedig a motor szlipjét jelöli. Könnyen belátható, hogy egyedül a frekvencia változtatása jelentheti a jó megoldást. A póluspárok száma a motor szerkezetéből adódik, és nem teszi lehetővé a fokozatmentes fordulatszám-változtatást, a szlip pedig a terheléstől függ. [1]

Egyedüli probléma, hogy amennyivel csökkentjük a frekvenciát, kénytelenek vagyunk a motorra jutó feszültséget is ugyanannyival csökkenteni, különben a motor fluxusa túl magas lenne, és a motor mágneses mezeje telítődne. A névleges frekvencia alatti tartományban tehát a feszültséget is csökkentenünk kell. Ha pedig a frekvenciát a hálózati frekvencia fölé növeljük, akkor magasabb feszültség kellene, mint a névleges, hogy a fluxus ebben a tartományban is állandó maradjon. [1]

2. A FREKVENCIAVÁLTÓ ELVI MŰKÖDÉSE

A frekvenciaváltók előbb egyenirányítják a hálózati feszültséget, majd a nyers egyenfeszültségből nagy teljesítményű félvezetős kapcsolásokkal általában $0-50\text{ Hz}$ között változtatható, háromfázisú feszültséget állítanak elő. A frekvencia változtatása $0-10\text{ V}$ közötti alapjel szerint egy feszültségfrekvencia-konverter segítségével valósul meg. Az 1. ábrán egy frekvenciaváltó elvi felépítési vázlatát látjuk.



1. Betáplálás. Jellemzően $3 \times 400\text{ V}$ AC vagy egyfázisú; 2. Három fázisú egyenirányító híd; 3. Közbenső kör; 4. Szűrőtekercsek; 5. Nagy kapacitású szűrőkondenzátor (kb 520 V -os egyenfeszültség); 6. Félvezetős kapcsoló üzemi teljesítmény fokozat. Három fázisú tranzisztor híd; 7. A meghajtott aszinkron motor 8. Vezérlő elektronika

1. ábra. A frekvenciaváltó elvi felépítése [2]

2.1. A frekvenciaváltó előnyei

A frekvenciaváltó használata a fokozatmentes fordulatszám-változtatás mellett még számos más előnyös megoldást is biztosít a motor számára:

- Nyomatékvezérlés;
- Zárt és nyílt hurkú sebesség vagy nyomaték szabályozása (PID-funkciók);
- A vezérlő ki- és bemenetek vagy azok egy részének funkciói programozhatóak (pl. forgásirányváltás);
- Kommunikációs lehetőség számítógéppel, diagnosztikai és beállítási céllal;
- Digitális kommunikáció szabványos terepi buszon;
- Paraméterezés a készülékbe épített kezelőfelülettel;
- Védelmi funkciók:
 - túláram, túlterhelés,
 - hőmérsékletvédelem,
 - fáziskimaradás,
 - zárlatvédelem.

A háromfázisú aszinkronmotoroknál, főleg a nagyobb teljesítményűeknél mindig problémát jelentett az indítási áram. Ezt a feladatot is megoldja a frekvenciaváltó a frekvencia fokozatos növelésének köszönhetően. Így akár a motort közvetlenül deltakapcsolásban használhatjuk [2].

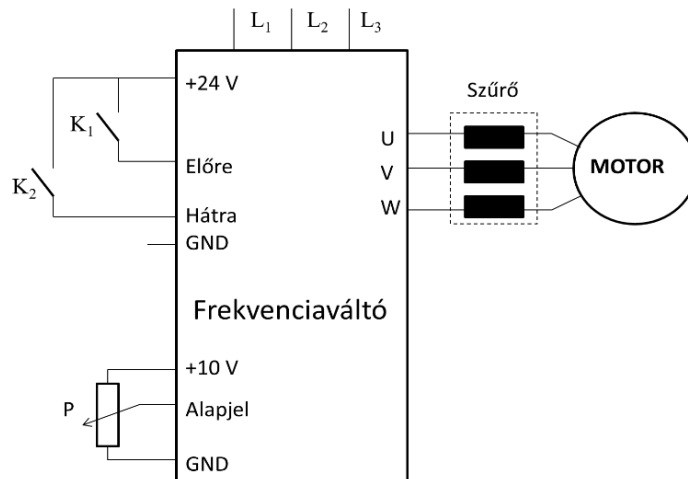
2.2. Egy egyszerű, klasszikus frekvenciaváltós kapcsolás [3]

A legegyszerűbb alkalmazási mód az, amikor a frekvenciaváltó forgásirányváltó bemenetén kiválasztjuk a kívánt irányt (K_1 , K_2 kapcsolók), egy potenciométerről (P) biztosítjuk a $0-10$ volt közötti alapjelet, a motort pedig az üzemmódnak megfelelően a háromfázisú kimenetre kötjük. Ez a megoldás látható a 2. ábrán.

Az indítási folyamat egyszerű: a P potenciométerrel beállítjuk a kívánt frekvenciát (ez ellenőrizhető a frekvenciaváltó kijelzőjén), a K_1 vagy K_2 kapcsolók egyikét zárjuk, és a motor már indul is a kiválasztott irányba, és fokozatosan felveszi a beállított fordulatszámot.

A frekvenciaváltó a táplálási feszültséget rendszerint a háromfázisú villamos hálózatról kapja, de kisebb teljesítményű berendezéseknél ez lehet akár az egyfázisú 230 V feszültség is. Vagyis minden probléma nélkül üzemeltethetünk háromfázisú motorokat egyfázisú feszültségről is.

A frekvenciaváltó kimenetére kötött villamos motor táplálási feszültsége viszont nem szinuszosan változó feszültség lesz, hanem úgynevezett PWM-feszültség [2]. Ez a motor számára nem jelent problémát, de az így keletkezett villamos zajokat szűrni kell, hogy ne zavarja a környezetet. Ezért rendszerint a motort egy szűrőn keresztül kapcsolják rá a frekvenciaváltó kimenetére.



2. ábra. A frekvenciaváltó alapbekötése (forrás: saját ábra)

3. SZÁMÍTÓGÉPES IRÁNYÍTÁSI LEHETŐSÉG

Napjaink korszerű gyártórendszerei egyre inkább a számítógépes folyamatirányítást helyezik előtérbe. A digitalizáció, az intelligens irányítások, az Ipar 4.0 célkitűzései nap mint nap olyan kihívások elé állítják a mérnököket, amelyeknek a minél energiahatékonyabb megoldásokat kell szolgáltatniuk. Ugyan a villamos motorokat még sokáig nem fogjuk tudni digitális eszközökkel helyettesíteni, de a működtetésük hatékonysága növelhető [2].

A kommunikációs hálózatok folyamatos fejlesztése, a determinisztikussá tett ipari Ethernet-rendszerek ma már lehetővé teszik a különböző ipari eszközök, gépek, berendezések összekapcsolását a virtuális térrel, ezek távoli elérését és működtetését. Mi is ezt a célt tűztük ki magunk elé, amikor a továbbiakban bemutatásra kerülő frekvenciaváltóval hajtott, háromfázisú aszinkronmotor távoli irányítási lehetőségeit vizsgáltuk.

3.1. Egy korábbi megoldás bemutatása

A számítógépes rendszerek összekapcsolása a vezérlésekkel különböző digitális interfészekon keresztül valósítható meg. Számos gyártó egyre több olyan intelligens érzékelőt, adatgyűjtő modult fejleszt, amelyek képesek a valóságos analóg világot összekapcsolni a digitális környezettel. Ezek közé tartozik az amerikai *National Instruments* cég is, amelynek legnagyobb európai gyára Debrecenben van. Egy általuk gyártott interfész segítségével már korábban kidolgoztuk és megvalósítottuk egy háromfázisú aszinkronmotor PC számítógépről történő működtetését. Nincsenek nyomógombok, nincsenek mágneskapcsolók, nincsenek hagyományos értelemben vett kijelzők, csak a motor a frekvenciaváltóval, egy NI-interfész és egy PC számítógép. Ennek a vázlatát láthatjuk a 3. ábrán.



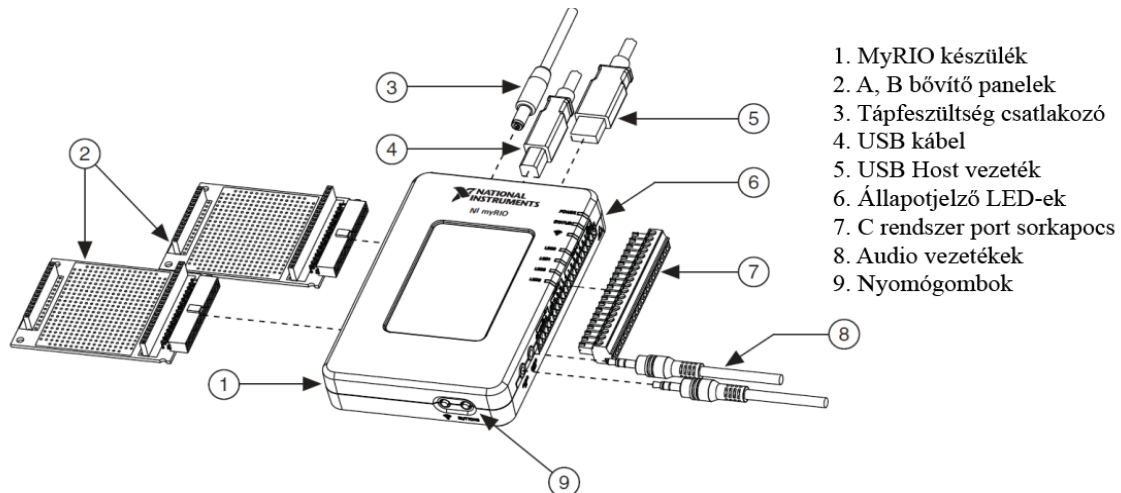
3. ábra. A frekvenciaváltó összekapcsolása a PC számítógéppel (forrás: saját ábra)

Az előző ábrán bemutatott vezérlés központi elemei a *Hitachi X200*-as frekvenciaváltó és az *NI 6221 interfész* [5]. Az interfész digitális kimenetein keresztül valósul meg az irányváltás, az analóg kimenet pedig biztosítja az alapjelet a

frekvenciaváltó számára. A kezelőfelület, a működtetés és a kijelzések a PC számítógépen futtatott *LabView* fejlesztő környezetben lettek programozott módon megvalósítva. Az *NI*-interfész, az *USB*-kapcsolaton kívül, nem rendelkezett semmilyen kommunikációs lehetőséggel. Így távoli működtetésre nem volt lehetőség. Ezt az interfészt cseréltük le egy sokkal korszerűbb és *WiFi*-kapcsolattal is rendelkező *MyRIO* eszközre.

3.2. Az *NI MyRIO* eszköz ismertetése [4]

A National Instruments *MyRIO-1900* egy olyan hordozható, újrakonfigurálható vezérlőkészülék, amelyet a gyártó mérési feladatok elvégzésére; vezérlések, robotok és egyéb mechatronikai rendszerek fejlesztésére optimalizált. A vezérlő és tartozékai a következő ábrán láthatók (4. ábra).

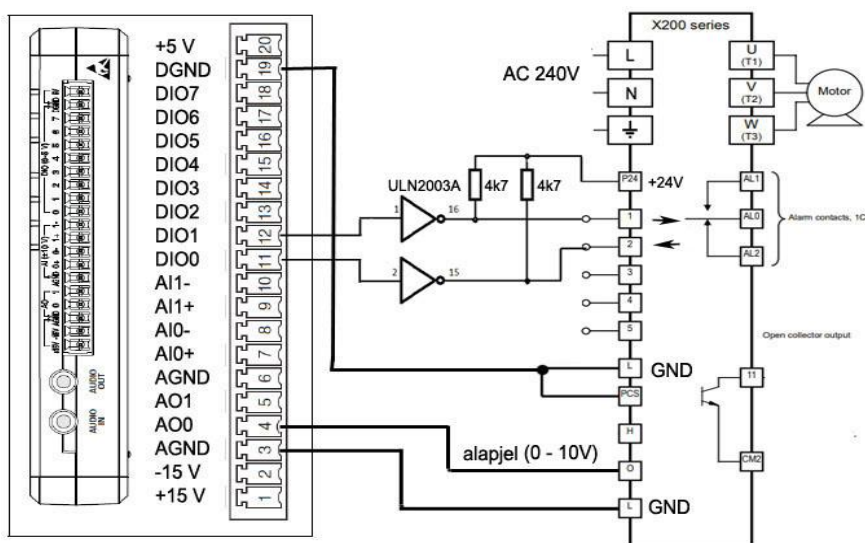


4. ábra. A *MyRIO 1900* és fontosabb kiegészítő elemei [4]

A vezérlő központi egységét a Xilinx Z-7010 667 MHz-es kétmagos processzor alkotja, amely egyben a beágyazott (FPGA) rendszerfunkciókat is ellátja. 512 MB programmemóriát (ROM) és 256 MB DDR3 RAM memóriát tartalmaz 16 bites adatsínnel. A kapcsolatot a külvilággal (a vezérelt rendszerrel) az A, B és C portokon keresztül biztosítja, a számítógéppel pedig *USB*-, illetve vezeték nélküli *Ethernet*-hálózaton keresztül kapcsolódhat. Mindhárom porton keresztül elérhetőek a digitális (DIO), illetve az analóg (AI, AO) bementi és kimeneti csatornák. Mi a C portot használtuk a frekvenciaváltóval történő kapcsolat megvalósítására.

3.2.1. A *MyRIO* összekapcsolása a frekvenciaváltóval

A különböző táplálási feszültségszintek (5 V, 24 V) illesztésére még használni kellett egy egyszerű *ULN2003A* típusú illesztő áramkört és összekapcsolni a megfelelő testpontokat (GND, DGND, AGND). Ezt láthatjuk az 5. ábrán.



5. ábra. A *MyRIO* összekapcsolása a frekvenciaváltóval (forrás: saját ábra)

A MyRIO vezérlő illesztése után a 3. ábrán látható megoldás most már olyan formában módosult, hogy vezeték nélküli irányításra is képes. Vagyis a háromfázisú aszinkronmotort távolról is lehet működtetni. Megfelelő jogosultságok birtokában egy ilyen formában kialakított vezérlés a világ bármely pontjáról elérhető és működtethető. Ez a megoldás a 6. ábrán látható.



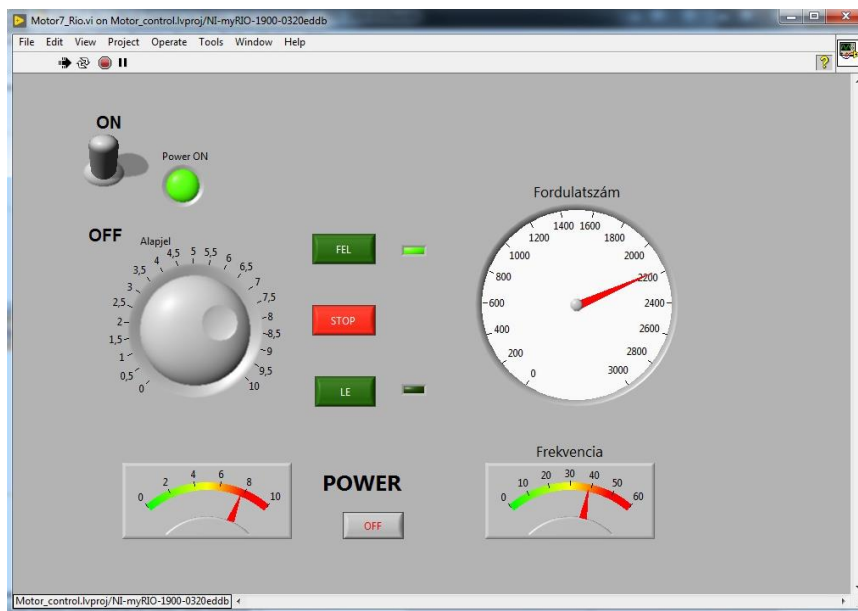
6. ábra. Távoli motorvezérlés MyRIO-val (forrás: saját ábra)

4. A MyRIO PROGRAMOZÁSA

A MyRIO programozása a National Instruments LabView fejlesztőkörnyezetében lehetséges. Ez a programozási mód egy teljesen grafikus megoldást biztosít a mérnökök számára, akik a cég által fejlesztett irányítóeszközöket használják. Használata nem követel feltétlenül magas szintű programozási ismereteket, hanem inkább technológiai és vezérléstechnikai ismereteket. Minden egyes új program (ezeket VI-knek nevezik; Virtual Instrumentation) létrehozásakor két felület generálódik: egy vezérlési felület (Front Panel) és egy programfelület (Block Diagram)

4.1. A vezérlési felület (Front Panel)

Ezen a felületen lehet létrehozni a különböző irányítóelemeket: kapcsolókat, nyomógombokat, menüket, numerikus vagy alfanumerikus beviteli elemeket stb. Ugyancsak itt lehet kialakítani a kijelzőket, műszereket és szöveges vagy grafikus megjelenítőket. Az általunk készített alkalmazás vezérlési felülete a 7. ábrán látható.



7. ábra. A motorvezérlő kezelőfelületet (forrás: saját ábra)

A kezelőfelület az alábbi elemeket tartalmazza:

- főkapcsoló és a hozzátartozó kijelző (LED),
- irányváltó nyomógombok (FEL, LE), STOP gomb,

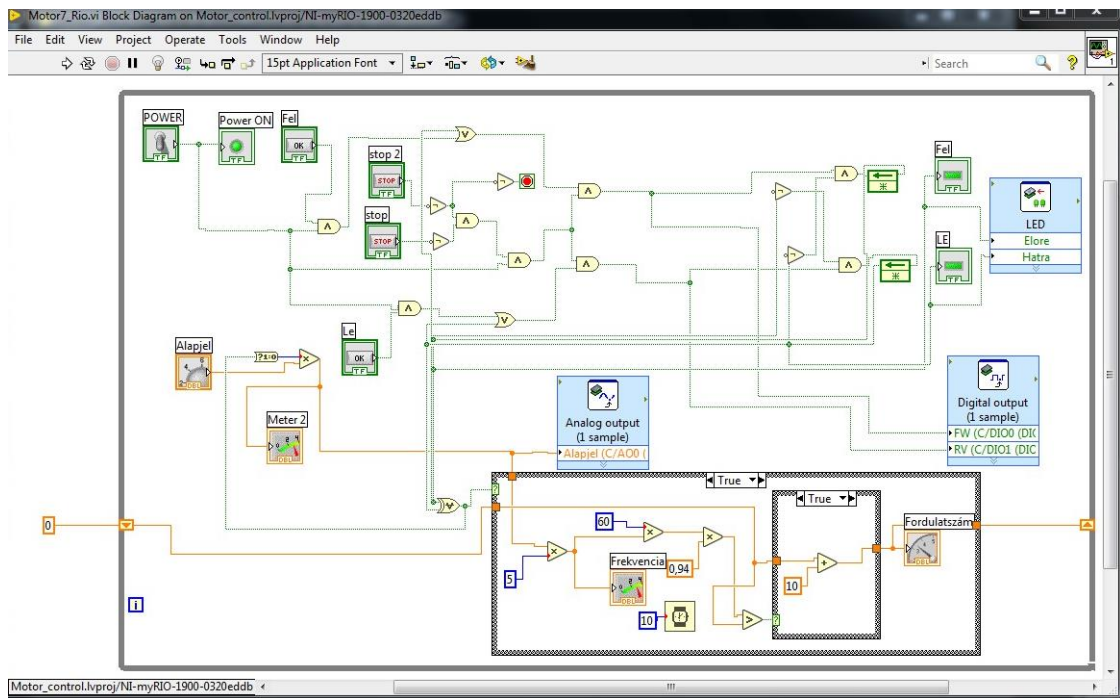
– alapjel-beállító potenciométer, frekvencia-, valamint fordulatszám-kijelző.

4.1.1. Működtetés

A főkapcsoló bekapcsolása után lehet kiválasztani a kívánt forgásirányt, majd a potenciométer segítségével lehet beállítani a kívánt fordulatszámot. A kijelzőkön láthatjuk az alapjelnek megfelelő feszültséget, az így kapott frekvenciát, valamint az ennek megfelelő fordulatszámot. A potenciométer változtatásával menet közben is változtathatjuk a fordulatszámot. A STOP gombból tudjuk leállítani a motort.

4.2. A programfelület

A programfelületen történik a tulajdonképpeni programozás. Itt a kívánt funkcionális elemek és függvények felhasználásával és ezeknek a megfelelő módon történő összehuzalozásával valósul meg a vezérlési program. Ez látható a következő, 8. ábrán.



8. ábra. Az alkalmazás programfelülete (forrás: saját ábra)

Az ábrán láthatjuk, hogy a vezérlőfelületen elhelyezett irányítóelemek és kijelzők ikonjai a programfelületen is megjelennek. A megfelelő logikai kapuk (AND, OR, NOT stb.) segítségével az irányváltás reteszkapcsolása is biztosított, vagyis az alapkövetelmény, hogy egy adott irány kiválasztása után a másik irány csak a STOP gomb lenyomása után lehetséges. A fordulatszám kiszámítása egypólusú ($p = 1$, lásd az (1) relációt) motorhoz lett meghatározva a névleges terheléskor fellépő szlip értékével ($s = 5\%$)

Megjegyzés: Névleges terheléskor a motor szlipje általában 4,5 és 6 százalék között változik.

Az itt bemutatott megoldás üzembiztos működést biztosít, bármikor továbbfejleszhető, egyéb funkciókkal is bővíthető, bármilyen programozott motorműködést is képes megvalósítani, akár automatikusan is, mert egyszerűen újraprogramozható.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Gulyas László, A frekvenciaváltókról alapfokon 1., 2. rész, Siemens Rt. 2017. (<https://pid.hu/index.php?module=KnowledgebasePost&ID=13>)
- [2] Ferenczi Ildikó, Automatizálási alapismeretek 1. rész, Vezérléstechnika, Nyíregyházi Egyetem, 2019.
- [3] Hitachi Industrial Equipment Systems co. Ltd, X200 Series Inverter Instruction Manual, 2007.
- [4] National Instruments Corporation, NI MyRIO - 1900, User Guide and Specifications, 2016.
- [5] National Instruments Corporation, USB 6221 User Manual, 2014.

Drónautomatizálás ipari vagyónvédelmi és mezőgazdasági célra való felhasználáshoz

Drone automation for industrial property protection and agricultural use

KIS Károly Árpád^{1} – SARVAJ CZ Kornél²*

¹Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Mechatronikai Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2–4.
e-mail: kiscarolku@mailbox.unideb.hu

²Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Mechatronikai Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2–4.
e-mail: sarvajcz@eng.unideb.hu

Összefoglaló: Kutatási munkánk célja egy működő prototípus drón létrehozása. Ennek megfelelő vezérléssel, programmal és szenzorokkal ellátva alkalmasnak kell lennie az adott napszakhoz igazodva vagyónvédelmi, illetve mezőgazdasági feladat ellátására. Emellett egy olyan összetett dokkoló-töltő prototípus berendezés létrehozása a drónhoz, mely emberi beavatkozás nélkül képes azt kiszolgálni.

Kulcsszavak: UAV, dokkolórendszer, automatizált működés, képfeldolgozás

Abstract: The purpose of our research is making a working prototype UAV. It needs to have proper controlling system and sensors to supply industrial property protection and agricultural missions. In addition, it needs to have a docking-charging station, which is suitable to serve our drone.

Keywords: UAV, docking system, automated operation, image processing

1. BEVEZETÉS

A kutatásban egy olyan komplex rendszer tervezését vizsgáljuk, amelyhez hasonló berendezések már egyre jobban elterjedőben vannak az iparban a legkülönbözőbb felhasználási területeken. Mi specifikusan 2 felhasználási területre koncentrálnak a munkát, ezek a vagyónvédelmi és mezőgazdasági felhasználás, azon belül is a kártevő madarak elleni védelem. Több nagy, a drónpiacon már régóta ismert cégnek van már hasonló dokkolórendszere, viszont ezek csak specifikus drónokhoz lettek kifejlesztve, általában csak hosszabb forduloidőkre képesek, és gazdaságilag nem feltétlen érdemes ezeket a kelet-európai és magyar fogyasztóknak megvenniük. Az egyik nemrég megjelent ilyen eszköz a DJI DOCK, mely több mint 26 000 dollár drónnal együtt [1]. Projektünkben ezért arra is nagy hangsúlyt fektetünk, hogy a felmerülő igényeket minél gazdaságosabban tudjuk kiszolgálni úgy, hogy az ne legyen negatív behatással a kidolgozott rendszerünk hatékonyságára.

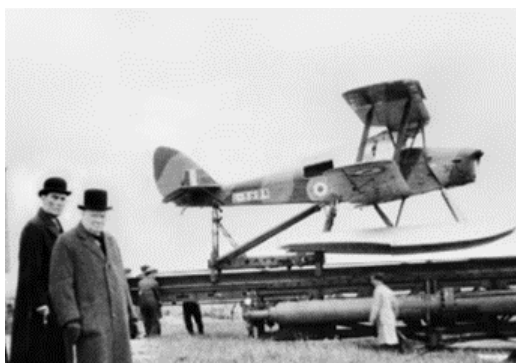
2. MI AZ A DRÓN?

A UAV (Unmanned Aerial Vehicle), közismertebb nevén drón¹, olyan pilóta nélküli légi jármű, amely fedélzetén dolgozó pilóta nélkül üzemel, vagy amelyet ilyen üzemmódra terveztek, és amely önálló vagy távirányítással történő irányításra képes [2]. A működésükhöz szükséges információkat a környezetükből gyűjtik, szenzorok segítségével érzékelik pozíciójukat, és egy döntési folyamat eredményeként működésüket, helyzetüket, mozgásukat a háromdimenziós térben korrigálják [3] [4].

Az UAV-k, mint sok más forradalmi eszköz a háborús konfliktusok eredményeképpen létrejött technikai fejlesztések egyike. Ezen katonai felhasználás során elsősorban olyan feladatok ellátására szánták őket, amelyek túl veszélyesnek bizonyultak a nehezen pótolható pilóták részére, és testi épségüket veszélyeztette volna a küldetés végrehajtása. Legkorábbi, írásos feljegyzés pilóta nélküli légi járműről a XIX. század közepéről származik, mely még hajtómű nélküli fejlesztéseket közölt. Ekkor kedvező szélirányba tudtak bombákkal felszerelt ballonokat indítani [5] [6].

Az I. világháború során már repülő torpedókat is teszteltek, melyeket egy- vagy kétfedeles repülőgépekből alakítottak ki. Ezekkel az eszközökkel az volt a legnagyobb probléma, hogy miután a célhelyen kiürítették a rakományukat, nem voltak képesek visszatérni indítási helyükre. Ennek a megoldására a brit fejlesztésű Queen Bee (1. ábra) pilóta nélküli célrepülőgép hozott óriási áttörést az iparban. Ez volt az első olyan eszköz, mely vissza tudott térni az indítási helyére, ezzel még olcsóbbá téve a légvédelmi feladatok elvégzését.

¹ Unmanned Aerial Vehicle (UAV)/Unmanned Aerial System (UAS)/Unmanned Aircraft (UA) – Pilóta nélküli légi jármű. ICAO Circular (2011) 328. 1–38.



1. ábra. Queen Bee – az első drónrepülőgép [7]

A brit mérnökök egy De Havilland DH 82-es „Tiger Mouth” kétfedeles, légszárnyas repülőgépbe építettek rádió-távvezérlést, mely a kor technikai fejlesztésének volt köszönhető. Először ennél a típusnál használták a drone kifejezést, így írta be magát a repülés történelmébe. Ezt követően a rádióvezérelt, emberi jelenlét nélkül repülő légi jármű elnevezésének szinonimája lett a drón kifejezés. Egészen a vietnámi háború 1973-as befejezéséig, legyen az cél- vagy gyakorlati drón, vagy akár felfegyverzett támadó légi jármű, ezzel a névvel illetve a szakzsargon vagy akár a sajtó híradása is. Ezt az időpontot követően lett „színesebb” az elnevezés, mivel először a távolról vezetett jármű (RPV²), majd pilóta nélküli légi jármű (UAV³), ezt követően a távolról irányított légi rendszer (RPAS⁴), majd napjainkban már a pilóta nélküli légi rendszer (UAS⁵), de egyre gyakrabban a légirobot-rendszer (RAS⁶) és az önálló légi rendszer (AAS⁷) kifejezésekkel is fogunk még találkozni, amelyek ennek a rohamosan fejlődő légi organizmusnak a csereszabatos leírását adják [8]. A XX. században további katonai drónok kifejlesztése zajlott a nagyhatalmak csatája során, néhány ismertebb típus a II. világháborús V-2-es rakéták, illetve a vietnámi háborúban szolgáló AQM-34 Firebee [9].

Tehát az UAV-k szerepe egyre jelentősebb a légi, földi, illetve a tengeri műveletekben is. A drónok a bombákat hatástalanító robotoktól a mini-tengeralattjáróig, a hajófedélzetről indítható felderítő helikopterektől a nagy magasságban tevékenykedő precíziós támadásokat végrehajtó légi eszközökig a legtöbb esetben a feladatuk végrehajtása, illetve az arra történő felkészítésük során igénylik az emberi beavatkozást [10] [11]. A jelenlegi kutatások középpontjában a „tűzelj és felejtse el” képesség fejlesztése áll, amely a drónokat olyan feladatok elvégzésére teszi alkalmassá, mint például sokáig, órákon át elhúzódóan legyenek a cél közelében elemelve és várva az alkalmat, hogy majd a másodperc törtrésze alatt döntsenek nemcsak a csapásról, hanem a lehetőségének bekövetkezéséről is [11].

A pilóta nélküli légi járművek fejlődéstörténetét a hasznosítás szemszögéből megfigyelve leszögezhető, hogy az eddigi életszakaszuk három részre osztható. Az első, amely során fegyverként alkalmazva különféle pusztító eszközöket szereltek rá, helyeztek el benne, és azok segítségével kívánták rombolni, pusztítani a szembenálló fél erőit és eszközeit. A következő felhasználási mód, ahol célrepülőgépként került bevetésre, és a légvédelmi erők békeidős kiképzését biztosította, életszerű körülményeket nyújtva számukra. A harmadik terület pedig, amikor különféle szenzorokat elhelyezve alkalmassá tették az eszközt a levegőből történő információszerzésre és -továbbításra, elősegítve ezzel a különböző vezetési szinteken, különböző felhasználási területeken a megalapozott döntések meghozatalát [12]. Az evolúció során a robotizált berendezések az egyén számára egyre több lehetőséget, kényelmi szolgáltatást és információs látókörbővülést fognak jelenteni, ami autonóm feladat-végrehajtást eredményez azáltal, hogy egy operátor egyidejűleg több légi eszköz manővereit koordinálja, mivel a „felnőtté vált, önálló” eszközünk „nem igényli” a folyamatos felügyeletet [13].

3. A DRÓN FELÉPÍTÉSE

A drón alapját a Hobbyking X650F quadcopter váz adja, melynek modularitása és teherbírása kielégíti a projekt során felhasználni kívánt eszközök hordozását (2. ábra) [14]. A drónt egy Copter Control 3D (CC3D) Revolution board vezérli mint flight controller (3. ábra) [15]. Ebben beépített gyorsulásmérő, giroszkóp és barométer található, amely a mért és kiértékelt adatokat 433 MHz-es jelen keresztül tudja sugározni egy földi vevőeszközhöz, az OPLink Mini vevőegységhez, amely számítógéppel összekötve alkalmas élő telemetriai adatok fogadására.

² Remotely Piloted Vehicle

³ Unmanned Aerial Vehicle

⁴ Remotely Piloted Aircraft System

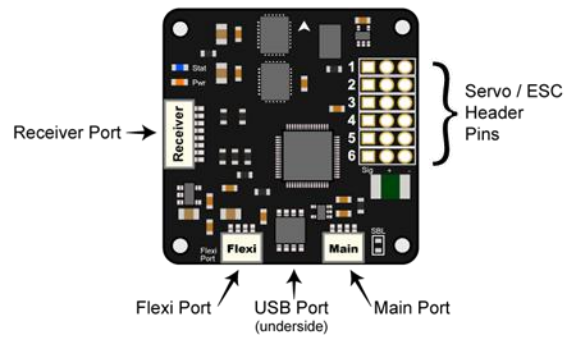
⁵ Unmanned Aerial/Aircraft System

⁶ Robotic Aerial System

⁷ Autonomous Aerial System



2. ábra. X650F quadcopter váz [14]



3. ábra. CC3D Revolution board [16]

A drón 5200 mAh-ás lítium-polimer (LiPo) akkumulátortól kapja az energiáját, mely a drón hasán egy moduláris gyorscsatlakozós rendszerben kap helyet, így a súlypontja alacsonyabbra tolódva segíti a stabilitást.

Vagyonvédelmi célra, főleg éjszakai üzemben lévő alkalmazásra hőkamera is könnyen felszerelhető a vázra (kamerastabilizátor). Ez képes a kamerát mindig egy adott szögben tartani a vonatkoztatási rendszerünkhöz, a földhöz képest, melynek nagy szerepe lesz a kép feldolgozásában.

3.1. A drón vezérlése, szoftver

A drónt a már említett CC3D Revolution board vezérli, melyet egy open-source LibrePilot Ground Control Station alkalmazással tudunk felprogramozni USB-soros porton vagy az OPLink Minin keresztül vezeték nélkül is. Ez alkalmas többek között a quadcopterünk irányítására, a repülés stabilizálására, UAV-k és egyéb robotok vezérlésére. Ez a nyílt és kollaboratív felület tökéletes teret biztosít innovatív ötletek kidolgozásához. Nyílt forráskódjának köszönhetően új funkciókkal is felprogramozható, többségében C és C++ nyelvek használatával, melyek több mint 92%-át teszik ki a kódjának [17].

A drónon a boardban alaphelyre kapó gyorsulásmérőn, giroszkópon és barométeren kívül még egy uBloxNeo-6M GPS és irányítómódul is fel van szerelve, mely nélkülözhetetlen a pontos helymeghatározáshoz, ami a felprogramozott út repüléséhez szükséges. Ez a CC3D main portján keresztül kommunikál 4 pinen, flexi porton pedig 2 pinen kapja a tápfeszültségét. Mindezt a LibrePilot földi irányítóállomásában (GCS⁸-ben) beállítva 38 400-as baud rate-tel lehet működtetni (4. ábra).

A drónt a LibrePilot programon kívül kézi távirányítóval is lehet működtetni, melyhez a Turnigy 9X 9 csatornás adót (transmitter) és a hozzá kapcsolt vevőt (reciever) használjuk. A vevőegység a drónra felszerelve a board reciever portján keresztül 10 pinen kommunikál, impulzusszélesség-modulációt (PWM⁹) használva, az 5 fő vezérlőcsatornához külön-külön vezetékkel rendelve. Ezek a throttle, yaw, pitch, rudder, flight mode.



4. ábra. LibrePilot GCS működés közben. Szerkesztette: a szerzők

A vevőből vagy a LibrePilot szoftverből érkező irányítást a CC3D ESC header pineken keresztül továbbítja a motorvezérlőkbe, melyek mind a négy motorhoz egyenként adnak vezérlőjelet. A jelek egymáshoz viszonyított különbségéből képes a propellereket más-más fordulatszámmal működtetni, ezáltal nemcsak függőleges, de horizontális mozgást is létrehozni.

⁸ Ground Control Station

⁹ Pulse Width Modulation

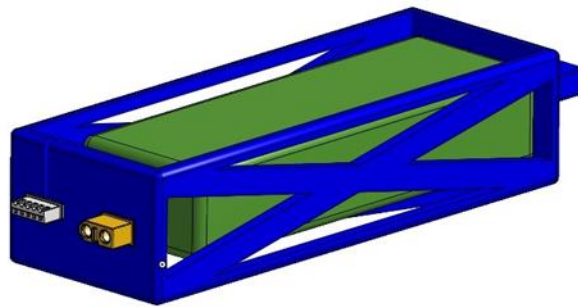
3.2. Dokkolórendszer

A drón ember nélküli automatikus működéséhez elengedhetetlen egy megbízható, stabil dokkolóberendezés kiépítése. Annak érdekében, hogy a drón fordulóideje minél kisebb legyen, ezáltal növelve a hasznos levegőben töltött időt, olyan megoldás szükséges, mellyel minimálisra tudjuk csökkenteni a töltési időt. A vezeték nélküli töltést ezen ok folytán elvetettük, így egy olyan rendszer kidolgozását céloztuk meg, amely több akkumulátort ciklikusan változtatva képes a drónt minél több ideig levegőben tartani.

Ez a megoldás pozitív hatással van környezetünk védelmére is, egyrészt olyan régebbi típusú drónvázakra is felszerelhető a mechanizmus, melyek helyett újat vásárolni hatalmas összegbe kerülne a felhasználóknak. Ez a moduláris rendszer a legtöbb drón hasára implementálható, a többi alkatrész pedig könnyen személyre szabható az adott eszközre. A kereslet növekedésével ez a megközelítés hozzájárulhat a remanufacturing ipar terjedéséhez is. A régi, de bevált, esetleg sérült alkatrészeket, áramköröket, akkumulátorokat ez az újragyártói ipar képes visszajuttatni a piacra hasonló minőségben, mint új korában, viszont sokkal kedvezőbb áron. Ez nemcsak a környezetvédelmet segíti elő, de az Európai Parlament által célként kitűzött „körkörös gazdaság” terjedését is.

3.3. Akkumulátorcsomag

A drónnak a leszállások során az akkupakkok cseréjét kell biztosítani. Ehhez a drón hasán egy gyorscsatlakozós keret és a földi kiszolgálóegységben egy megfogóberendezés létrehozása szükséges, mely a drónból képes kihúzni a használt LiPo pakkot és azt megcserélni a már feltöltött akkumulátorcsomaggal a töltőegységből. Mivel az akkumulátor töltéséhez és csatlakozásához adottak az XT60-as 2 pinos táp- és JST-XH 5 pinos töltésvezérlő csatlakozók, így ezek problémamentes csatlakozásának biztosítása érdekében az akkumulátorokat egy 3D nyomtatott keretbe rögzítve, a kimeneteket a keret oldalán fixálva tudjuk garantálni (5. ábra).

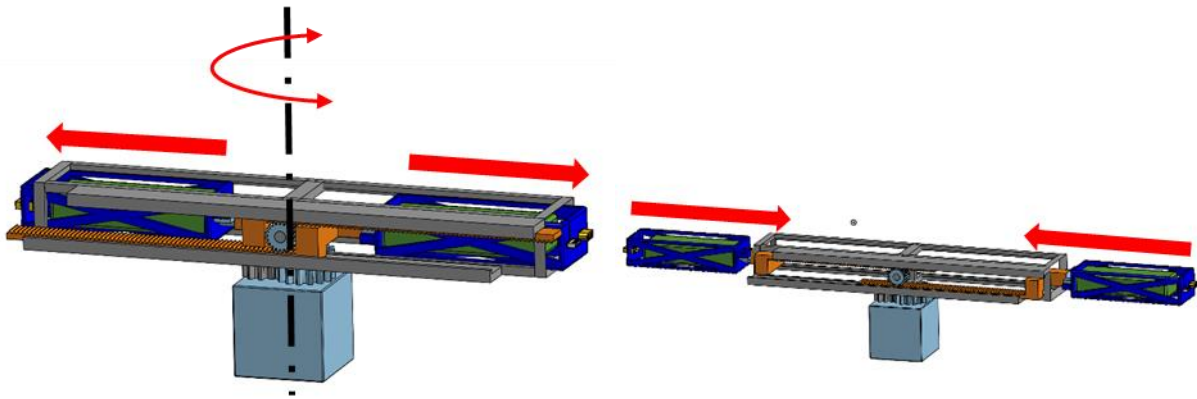


5. ábra. Akkumulátorkeret CAD prototípus fixált csatlakozókkal. Szerkesztették: a szerzők

Azért is előnyösebb akkumulátorcsomagot cserélni a drónban, mint vezeték nélkül tölteni, mert a vezeték nélküli töltéshez nehéz a sok különböző típusú drónnál megfelelő töltési, szabályozási vezérlést beépíteni. Mivel mi mindig vezetékes akkumulátortöltővel töltjük a csomagokat, így azok hosszú élettartamúak tudnak maradni a cellák szabályozásának köszönhetően, és még olyan funkciókat is elérhetünk, mint a merítés, a balanszolás.

3.4. Az akkumulátor cseréje

Az akkumulátor cseréjét egy fixen rögzített megfogóberendezés biztosítja. Az akkumulátor a kerettel együtt egy egységben mozog, a földön lévő megfogóberendezés egy szervóval megfogja a pakk hátulján lévő csatlakozást, melynek segítségével egy léptetőmotor (step) azt egy fogaskerék-fogasléc párral behúzza egy, a kerethez kívülről illeszkedő sínbe, amely így a keretnek csak 1 szabadságfokú mozgást engedve (csúszás egy tengely mentén hosszirányba) képes azt mindig ugyanoda visszapozicionálni. Ez a megfogó-behúzó mechanizmus a földi egységen szimmetrikusan 180 fokban elforgatva mind a két oldalán megtalálható, így az egyik csomagot a drónból, a másikat a töltőből kihúzva meg tudja őket cserélni. Ehhez az egész földiegyeség-mechanizmusnak a függőleges forgástengelye körül 180 fokot kell forognia, melyet egy léptetőmotor fogaskerekekkel működtet. Ezután a behúzás ellentétje történik, a fogaskerék-fogasléc pár kinyomja a már megcserélt csomagokat a drónban, ezzel egyidőben a töltőbe, majd a szervók elengedik azokat és a megfogókarokat visszahúzza a drón akadálytalanul tud felrepülni (6–7. ábrák).

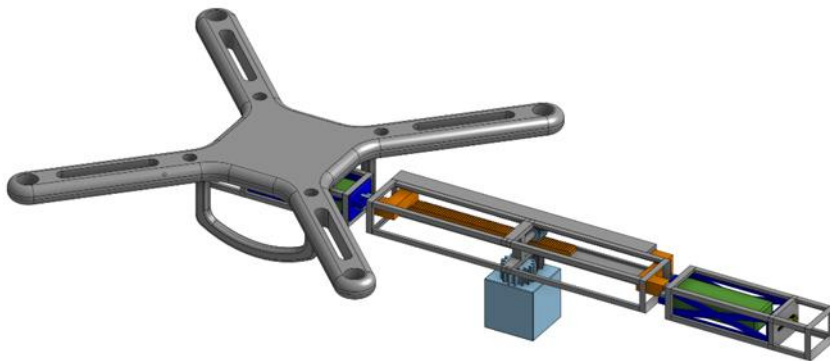


6. ábra. Földi dokkolóegység behúzott állapotban

7. ábra. Földi dokkolóegység kinyomott állapotban

Szerkesztették: a szerzők

A drón hasára és a töltőegységre is egy hasonló keret szükséges, melybe a földi egység bele tudja nyomni és ki tudja belőle húzni az akkumulátorcsomagot. Ugyanúgy ezekben is a megfelelően pozícionált 2 csatlakozónak a párja kell legyen, hogy egymásba tudjanak esüszni. A mechanizmust egy mikrokontroller működteti, ami képes hatékonyan és gazdaságosan vezérelni a két szervót és a két léptetőmotort.



8. ábra. Dokkolórendszer CAD-modellje drónnal (bal), töltőkerettel (jobb). Szerkesztették: a szerzők

3.5. A dokkolóegység háza

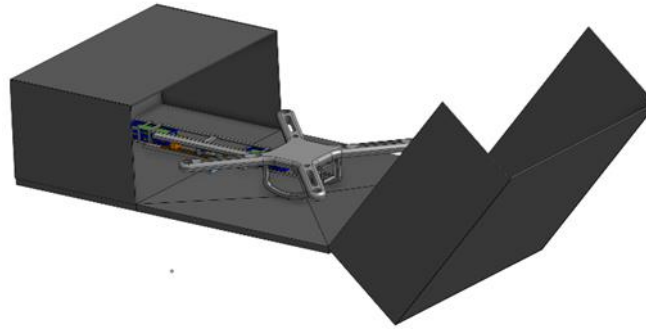
Ahhoz, hogy a drón esetleges rossz idő, eső esetén ne károsodjon, szükségünk van egy befogadóházra, melybe a drón képes leszállni, és az megvédi a járművet. Számtalan módot találunk arra nyilvános cikkekben és internetes portálokon, hogyan lehet megoldani az UAV precíziós landolását [18] [19]. A legtöbb ilyen tanulmány Aruco Markeres vizuális megközelítést, illetve infrakamerás landolást dolgoz fel. Számunkra a legmegfelelőbb egy egyszerű kamera felszerelése, mely a földet figyelve egy mikrokomputerrel képes a kihelyezett Aruco bélyeget észlelni (9. ábra), és úgy megkezdeni a süllyedést, hogy folyamatosan a bélyeg felé korrigálja repülönket. Erre azért van szükség, mert a GPS nem képes centiméteres pontossággal visszavinni a drónunkat a kiindulási bázisra.



9. ábra. Példa az Aruco Markerre [19]

A „dokkolóböröndünk” 2 részre bontható. Az első egy felnyitható tetejű rész, melynek alján az Aruco Markert elhelyezve pontosan és megfelelő irányba száll le a drón. A másik egy teljesen fedett rész, mely az akkumulátorcserélő

mechanizmust védi, illetve az akkumulátortöltőt a befoglaló kerettel. A drón le- és felszállása során a tető felnyílik, egyéb esetben zárva tartjuk azt (10. ábra).



10. ábra. „Dokkolóbőrönd” CAD-modellje. Szerkesztették: a szerzők

4. VAGYONVÉDELEMI FELHASZNÁLÁS

Vagyonvédelmi felhasználásra, mivel az általában éjszakai üzemben történik, a legmegfelelőbb érzékelő egy infravörös kamera, mellyel szürkeárnyalatos képet vagyunk képesek létrehozni. Ezt a drón elejére felhelyezett gimbal tartja mindig egy meghatározott szögben a földhöz képest, hogy adott állandó magasságon repülve a vett kép mindig egy méretarányú legyen. A kamera által szolgáltatott képet a földi kiszolgálóegységben elhelyezett vevőnek 5,8 GHz-es antennával küldjük le, ez bevált módszer az FPV-drónozás során.

A kapott jelet a földön egy laptop valós időben értékeli ki Python-programban megírt OpenCV könyvtárat használva. Lényege, hogy a folyton állandó magasságon repülő drón az ipari területre esetlegesen betévedő idegeneket mindig ugyanolyan távorról veszi észre a gimbalnak köszönhetően (állandó magasság, állandó megfigyelési szög), így a programban bekalibrálható az, hogy mekkora kiterjedésű (pixelben) és milyen kontrasztú céltárgyak esetén adjon le figyelmeztetést. Ezzel kiszűrhetőek a kerítésen könnyen átszökő kistestű állatok, amelyeknek felszíni hőmérséklete nagyon hasonló az emberéhez (11. ábra).



11. ábra. Drón infrakamerás képe emberről [20]

Az infra- és hőkamerák piacának egy kis szelete csak a UAV-re szánt érzékelők. Ennek köszönhetően földi üzemben használatos társaiknál akár nagyságrendekkel is drágábbak lehetnek. Projektünkhöz egy megfelelő és nagymértékben költséghatékony megoldás a Raspberry Pi 4 mikroszámítógép egy MLX90640 hőkameramodullal. Sajnos ennek felbontása elmarad az akár 15-20-szor drágább társainál, viszont arra tökéletes választás, hogy 5-10 méterről a különböző hőmérsékletű, így más kontrasztú objektumokat láthassunk vele. Igaz, ez a technológia, ahol a repülőszerkezetekre szerelt eszközök (mozgóképfelvévő kamera, fényképezőgép, hőszensor, infrakamera, GPS-jeladó, mozgásérzékelő, arcfelismerő, biometrikus szkennerek stb.) diverzifikált és kombinálható felhasználási módjaival találkozunk, számos lehetőséget nyit meg az átlagos hétköznapi felhasználáson túl katonai, ipari, mezőgazdasági és kereskedelmi területen, ami miatt az észszerű szabályozásuk szükségszerű lehet a magánszféra- és adatvédelmi kérdéskörben is [21]. A Raspberry Pi 4 modularitása okán is kiváló választás.

5. MEZŐGAZDASÁGI FELHASZNÁLÁS

A mezőgazdaságban, ezen belül is az vízimadarak tenyésztésében egyre nagyobb problémát okoznak a szakma számára kártevőnek számító madárfélék, például a vadon élő galambok. Ezek a madarak nemcsak óriási mennyiségű takarmányt esznek meg a gazdaságokban, de ürülékükkel képesek teljes haszonállat-állományokat megfertőzni betegségekkel, szalmonellával, madárinfluenzával, és ez nagy veszteségeket képes okozni (12. ábra).



12. ábra. Galambraj a nyírbátori takarmányüzem felett. Készítették: a szerzők

Mivel ezeket a kártevőket nem lehet mérgezni, sem irtani hatékonyan és legálisan, így egy olyan megoldás szükséges, amely elijeszti ugyan őket, de kárt nem tesz bennük. Erre a célra a drónra szerelhető hangszóró ideális megoldás, ami a tápfeszültségét a drón akkumulátorából kapná. A drón itt is egy előre, az ipartelephez meghatározott GPS-koordinátákkal határolt utat repülne, közben pedig olyan ragadozó madarak hangját játszaná, mely el tudja ijeszteni a károkozókat. A drón repülése során létrehozott és a hangszóróban játszott hangoknak köszönhetően ez egy aktív megoldást kínál a problémára. A különböző hangokat a Mezőgazdasági, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar hallgatóival együttműködve vennék fel, amelyeket a Raspberry Pi 4-ről lehet akár randomizálva lejátszani, hogy ne szokják meg a madarak.

6. ÖSSZEZÉS

A cikkben bemutatott szempontok nagyban hozzájárulnak a projekt eredményéhez, előrehaladásához. Összességében elmondható, hogy a felmerülő problémák, kérdések megoldása során törekedtünk mindig olyan megoldásokat találni, amelyek nemcsak kiszolgálják az igényeinket, de sok esetben jóval gazdaságosabbak a piacon elérhető társaiknál. Drónunk tervezése során az automata fel- és leszállás kérdésétől kezdve, az automatizált töltésen át az ipari felhasználáson keresztül, a képfeldolgozásig eljutva sok műszaki problémát érintettünk, melyeknek külön-külön megoldásából egy olyan működő prototípus létrehozása a végcél, amely minden feltételnek megfelel. Ebből látjuk, hogy milyen összetett is ez a projekt.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] DJI Dock, [Online]. Available: <https://www.dji.com/hu/dock>
- [2] Légtér.hu Tanácsadó Korlátolt Felelősségű Társaság, DRÓN TÖRVÉNY 2021 – ÉRTHETŐEN SZAKÉRTŐKTŐL [Online], Available: <https://legter.hu/blog/dron-torveny-2021-erthetoen-szakertoktol/>
- [3] Szegedi P., Békési B.: Az UAV-on alkalmazható szenzorok, in XIV. Természet-, Műszaki és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia. Szombathely, Nyugat-magyarországi Egyetem, 2015. pp. 175–182. [Online]. Available: http://publicatio.nyme.hu/613/1/TTK_14_Nemzetkozi_Konf_Eloadasok_201500516.pdf
- [4] Szegedi P., Békési B.: Sensors on board of the Unmanned Aerial Vehicles, In Proceedings of 19th International Scientific Conference Transport Means, Kaunas, 2015. pp. 219–222.
- [5] Dr. Palik Mátyás, Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek, pp. 25–63. Nemzeti Közszerzői Egyetem, 2013, ISBN: 978-615-5057-64-9, [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/UAV_handbook_Secon_edition.pdf
- [6] Csóré Attila, Major Gábor: A pilóta nélküli légi járművek (UAV) evolúciója. Repüléstudományi Közlemények, 33. évf. 1. sz. 2021. pp. 171–191. DOI: 10.32560/rk.2021.1.13
- [7] Winston Churchill és a hadügyért felelős külügyminiszter egy de Havilland Queen Bee rádióvezérelt drón kilövésére vár, 1941. június 6-án. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Winston_Churchill_and_the_Secretary_of_State_for_War_waiting_to_see_the_launch_of_a_de_Havilland_Queen_Bee_radio-controlled_target_drone,_6_June_1941._H10307.jpg
- [8] Ujjady A., Major G.: A civil drónszabályozáson innen, a katonain túl Repüléstudományi Közlemények, 33. évf. 2. sz. 167–180. 2021. DOI: 10.32560/rk.2021.2.12 [Online]. Available: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/5596/4738>
- [9] Britannica.com, John F. Guilmartin, AQM-34 Firebee military aircraft. [Online]. Elérhető: <https://www.britannica.com/technology/AQM-34-Firebee>
- [10] Békési Bertold, Szegedi Péter: Napjainkban fejlesztett fegyverrendszerek megjelenése a jövő hadszínterein, a tudásalkalmazás és fejlesztés szempontjából, Repüléstudományi Közlemények 2015/3. pp. 105–116. [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-08-0223_Bekesi_B-Szegedi_P.pdf

- [11] Dr. Békési Bertold, Dr. Szegedi Péter: Napjaink fegyverrendszer fejlesztési trendjei, *Economica* (Szolnok), 2015. 4/2. szám pp. 158–168. (ISSN: 1585-6216)
- [12] Major G.: A pilóta nélküli légi jármű rendszerek nemzetbiztonsági célú felhasználásával kapcsolatos kutatások, *Repüléstudományi közlemények* (2015), pp. 115–120., [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_1/2015-1-10-0181-Major_Gabor.pdf
- [13] Gajdács L., Major G.: Katonai célú drónok fejlesztése a jelenkorban, a jövőt vizionálva, *Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből III.* (2022) Budapest: Ludovika Egyetemi Kiadó, pp 101–120.
- [14] Bobbyking.com, Hobbyking X650F Glass Fiber Quadcopter Frame 550mm, [Online]. Available: https://hobbyking.com/en_us/hobbyking-x650f-glass-fiber-quadcopter-frame-550mm.html?__store=en_us
- [15] Ardupilot.org, Openpilot Revolution and RevoMini, [Online]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-openpilot-revo-mini.html>
- [16] CC3D Flight Controller Guide. [Online]. Available: <https://www.dronetrest.com/t/cc3d-flight-controller-guide/830>
- [17] Librepilot.org, [Online]. Available: <https://www.librepilot.org/site/index.html>
- [18] Flytbase.com, Precision Landing System, [Online]. Available: <https://flytbase.com/precision-landing/>
- [19] Detection of ArUco Markers. [Online]. Available: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html
- [20] SPI Corp Products. M1-D Gimbal PTZ Thermal imaging IR Camera for Ground, marine, airborne UAV / All Weather payload. [Online]. Available: <https://www.x20.org/product/m1-d-micro-ptz-infrared-camera/>
- [21] Kiss B., Major G., Légből kapott segítség a Covid-19 ellen, *Repüléstudományi tanulmányok, Repüléstudományi Szemelvények 2020*, 280-306. 2021. [Online]. Available: <http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem-2020.pdf>

MÉRNÖKPEDAGÓGIA SZEKCIÓ

Mérnökhallgatók online matematikaoktatásának tapasztalatai

Experiences of online mathematics education for engineering students

Árvai-Homolya Szilvia

Miskolci Egyetem, Matematikai Intézet, 3515, Miskolc-Egyetemváros, szilvia.homolya@uni-miskolc.hu

Összefoglaló: A járványhelyzet idején bevezetett digitális oktatás új kihívások elé állította az egyetemi hallgatókat is. Az ebben az időszakban érettségiző, majd tanulmányaikat a felsőoktatásban folytató mérnökhallgatók hagyományos és online keretek között is tanultak matematikát, össze tudják vetni a két képzési formát. Jelen cikk a 2020/2021. tanévben elsőéves, műszaki képzési területen tanuló hallgatók online matematikaoktatásának tapasztalatait mutatja be, felhasználva a témában készített felmérés eredményeit.

Kulcsszavak: digitális oktatás, matematikaoktatás, online tananyag

Abstract: Digital education introduced during the pandemic posed new challenges for university students, too. Prospective engineering students who passed their school-leaving exam during this period and then continued their studies in higher education also studied mathematics both with personal presence and in an online learning framework, and they are able to compare the two forms of education. In spring 2021 I completed a survey involving 1st year BSc engineering students. Using the results, this paper is devoted to show their experience gained during online mathematics education at high school and at university

Keywords: digital education, mathematics education, e-learning materials

1. BEVEZETÉS

A Covid–19-járványhelyzet az élet minden területére hatással volt, így kiemelten az oktatásra is. A lezárások miatt szükségessé váló digitális oktatás során mind a hallgatók, mind az oktatók új kihívásokkal kerültek szembe. „A bevezetett kényszerű intézkedés nem tette lehetővé a szisztematikus, az oktatási folyamat minden részletére kiterő tervezést, így a tantermen kívüli digitális oktatásra való azonnali átállás váratlanul érte az oktatási folyamat szereplőit. Nem álltak rendelkezésre azok a kommunikációs rutinok és rítusok, amelyek az oktatók és hallgatók közötti interakció során biztosították volna, hogy a tanári instruálás, a feladatok pontos egyeztetése vagy éppen a közösség formálása megtörténjen” [1].

A digitális oktatás során a hallgató önálló tanulásának szerepe felértékelődött, az oktatóknak ebben a folyamatban még hangsúlyosabban kellett a diákokat támogatniuk.

A váratlan átállás miatt a kezdeti időszakban, 2020 tavaszán az oktatási intézmények egy részében nem alakult ki olyan egységes online platform használata, amely keretet biztosított volna, átláthatóvá és követhetővé tette volna a tanulási folyamatot. A különböző online felületek igénybevétele, amely sok esetben a megfelelő digitális kompetenciák hiányával is társult, megnehezítette mind a diákok, mind a pedagógusok helyzetét [2]. Az online órák a személyes jelenléttel megvalósított kurzusoknál több előkészítést és felkészülést igényeltek, az oktatók az órátartás mellett elektronikus segédanyagokat készítettek, beadandó feladatokat adtak fel a diákoknak – ezek összeállítás, feldolgozása a megszokotthoz képest több időt vett igénybe. Sok egyetemen az írásbeli számonkérést felváltotta a szóbeli vizsgáztatás, ami nagyobb létszámú évfolyamok esetén szintén több időráfordítást igényelt az oktató részéről [3]. A matematikai kurzusok esetén kiemelten problematikus volt az alkalmas vizsgáztatási módszer megválasztása.

Bár ennek a dolgozatnak nem célja a társadalmi aspektusok vizsgálata, fontos azonban megemlíteni, hogy a 2020-ban bevezetett távolléti oktatás során a diákok szempontjából sok esetben a legnagyobb nehézséget a megfelelő infrastruktúra, eszköz hiánya okozta. A hátrányos helyzetből fakadó problémák nem csak Magyarországon jelentek meg, egy holland kutatás [4] azt elemezte, hogy az iskolabezárások következtében a diákokat tanulási veszteségek érték, mely veszteségek kiemelten a hátrányos helyzetű családokat érintették. A holland kutatás többek között arra a következtetésre jutott, hogy a világjárvány első hullámára jellemző rövid távoktatási időszak és a világban vezető szélessávú internet hozzáférési aránya ellenére az eredmények riasztóak voltak Hollandiában is. A diákok jelentős része alig vagy egyáltalán nem haladt előre, miközben otthon tanult, a problémák különösen a kevésbé iskolázott otthonból érkező diákok körében jelentek meg.

A nehézségek mellett azonban kiemelendő, hogy az online átállás olyan eredményeket is magával hozott, amely alapvetően meghatározza a jövő oktatását, így az egyetemi matematikaoktatás módszertanát is. A „Fokozatváltás a felsőoktatásban” dokumentumban [5] már 2016-ban célként jelölték meg, hogy szélesebb körben szükséges bevezetni olyan képzési formákat, amelyek rugalmasabb lehetőséget teremtenek meg a munka melletti tanuláshoz, ezek egyike a

távoktatás. A középtávú szakpolitikai stratégia értelmében az online elérhető tananyagok arányát, illetve az online (MOOC) kurzusok számát jelentősen növelni kell 2030-ig. A járványhelyzet miatt szükségessé vált tantermen kívüli digitális oktatás a katalizátora lett ezen paradigmaváltásnak.

A cikk célja, hogy az online matematikaoktatás hallgatói tapasztalatait elemezzük, felhasználva a témában készített felmérés eredményeit.

2. A FELMÉRÉSRŐL

A digitális és jelenléti oktatás összehasonlításában speciális szerep jut a 2020 májusában érettségiző, majd az év szeptemberében a felsőoktatásban továbbtanuló diákoknak. A Covid-világjárvány miatt ez a korosztály online keretek között készült fel az érettségire, személyes jelenléti formában kezdte meg egyetemi tanulmányait, majd a második és harmadik hullám idején szintén online keretek között tanult. A vizsgálatban ennek megfelelően a 2020/2021. tanévben I. évfolyamos hallgatókat céloztam meg. A Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának járműmérnöki, logisztikai mérnöki, villamosmérnöki alapképzési szakos hallgatói közül 59 főnek került kiküldésre a kérdőív, melyre 31 válasz érkezett, azaz a megkérdezettek több mint fele adott választ. A felmérés 2020/2021. tanév II. félév szorgalmi időszakának végén készült, az őszi szemeszterben a vizsgálatban részt vevő hallgatók mindegyike sikeresen abszolválta az Analízis I. kurzust, az Analízis II. tárgy ekkor még nem került lezárásra. A hallgatók az I. félévben 2 hónapot „hagyományos” jelenléti oktatásban töltöttek, majd a szemeszter második felében és a II. félévben ismét online keretek között tanultak.

A kérdőívet a hallgatók elektronikus úton kapták meg, a Google űrlap kitöltése önkéntesen és anonim módon történt, ezáltal biztosítva, hogy a hallgatókat ne befolyásolja semmilyen külső tényező a válaszadásban. A visszajelzésre 5 nap állt rendelkezésre, így a megkérdezetteknek elegendő idejük volt a tapasztalataik összegyűjtésére, az átgondolt válaszok megküldésére.

A kutatás során nyert adatok szemléltetéséhez elengedhetetlen a grafikus ábrázolás. Segítségével összefüggéseket, arányokat is szemléltethetünk. Egy jó diagramra ránézve, a kísérszöveg elolvasása nélkül tudjuk értelmezni azt [6]. A Google űrlapon érkezett válaszok alapján a program közvetlenül elkészíti a szemléltető kör-, illetve oszlopdigramákat, az összesítésen túl az egyéni válaszok is áttekinthető formában megjelennek.

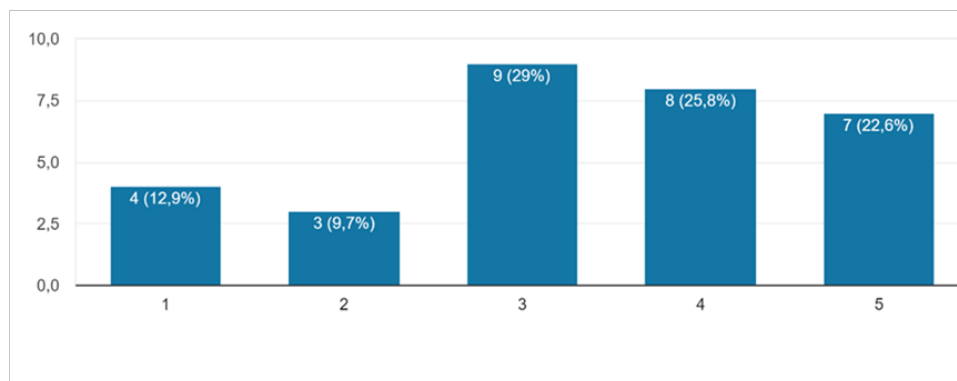
A felmérés 3 részből állt, az első részben négy kérdés tettünk fel, melyek célja statisztikai adatgyűjtés volt, nevezetesen milyen típusú középiskolában, milyen szinten és eredménnyel érettségizett a hallgató, továbbá hányas osztályzatot ért el Analízis I. tárgyból. A második szakasz nyolc kérdése a középiskolai online matematikatanulással kapcsolatos véleményekre vonatkozott. A kérdések közül négy esetben ötfokozatú Likert-skálán kellett értékelni a középiskolai online oktatást, a használt online platformra többszörös feleletválasztós kérdés vonatkozott, egy eldöntendő kérdést tettünk fel, továbbá a középiskolai matematikaoktatás során tapasztalt esetleges nehézségeket, illetve pozitívumokat szöveges válasz formájában adhatták meg a diákok. A harmadik szakasz huszonegy kérdése elsősorban az egyetemi online matematikaoktatással kapcsolatos észrevételekre, az online és személyes jelenléti forma, valamint a középiskolai és egyetemi matematikaoktatás összehasonlítására fókuszált. Nyilvánvalóan ez a rész tartalmazta a legtöbb kérdést, a kitöltők azonban ebben a szakaszban is gyorsan haladhattak, mivel az esetek többségében ötfokozatú skálán, egyszeres, illetve többszörös feleletválasztós módon kellett megadniuk a választ, de lehetőség nyílt öt kérdésnél az online analízisoktatással kapcsolatos vélemény részletes kifejtésére is.

A válaszadók 80,6%-a gimnáziumban érettségizett, csak 19,4% érkezett technikumból. Kevesebb mint egyharmaduk (29%) tett emelt szinten érettségi vizsgát matematikából, az érettségien 61,3% ért el jeles osztályzatot, 35,5% jó érdemjegyet szerzett, csak egyetlen diák kapott közepes osztályzatot. Ahogyan korábban kiemeltük, a felmérésben csak olyan hallgatók vettek részt, akik sikeresen abszolvták az Analízis I. tárgyat, közülük hárman (9,7%) jelest, egy hallgató jót, 35,5% közepest, továbbá a csoport több mint a fele (51,6%) elégséget kapott.

3. A KÖZÉPISKOLAI ONLINE MATEMATIKATANULÁS TAPASZTALATAI

Az érintett hallgatók az érettségi előtti két hónapot töltötték távolléti oktatásban, azaz ideális esetben a középiskolában előírt matematikai ismeretanyagot március elejére el kellett sajátítaniuk, erre az időszakra már az ismétlést kellett ütemezni. A válaszadók körülbelül negyede (25,8%) nyilatkozott úgy, hogy egyáltalán nem kerültek megtartásra online módon a matematikaórák. Mivel a járványhelyzet első hulláma, a márciusi lezárások váratlanul érték az iskolákat, gyakorlatilag egyetlen hétfőre alatt kellett átállni digitális oktatásra. A korszerű online oktatási módszerek ismeretének hiányában több intézményben elektronikus úton kiadták ugyan a feladatokat, tananyagot, azonban az órák sok esetben elmaradtak. Eközben a megkérdezettek 41,9%-a azt jelezte, hogy a középiskolában minden matematikaóráját online módon is lebonyolították.

Arra a kérdésre, hogy mennyire tartotta hatékonnak a középiskolai matematikaoktatást, a válaszadók kicsit kevesebb mint fele 4 vagy 5 pontot adott, míg a 12,9%-uk egyáltalán nem volt elégedett az online oktatás hatékonyságával.



1. ábra. A középiskolai online matematikaoktatás hatékonyságának értékelése

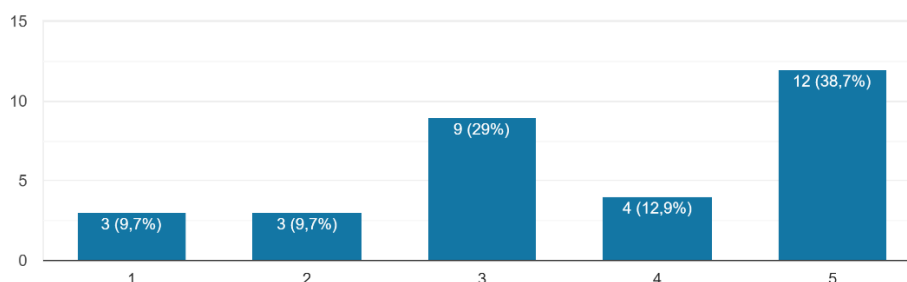
A bevezetőben is láthattuk, hogy a kezdeti időszakban a nem egységes platformválasztás volt a jellemző, amit a felmérés is megerősített. A legtöbb iskolában (a válaszadók 51,6%-a esetén) a Google Classroom volt az online kommunikáció egyik eszköze, a Zoomot, Google Meetet az esetek majdnem negyedében használták, illetve 12,9% megjelölte még a Skype-ot és a Discordot.

Arra a kérdésre, hogy mennyire tartotta hatékonynak a középiskolai matematikaoktatást, a válaszadók kicsit kevesebb mint fele 4 vagy 5 pontot adott, míg a 12,9%-uk egyáltalán nem volt elégedett az online oktatás hatékonyságával.

Az online formában történő érettségire felkészítéssel inkább elégedettek voltak a diákok, mint sem, a válaszadók több mint fele legalább 4 pontot adott erre a kérdésre.

Mennyire segítette a középiskolai online matematika oktatás a matematika érettségire felkészülést?

31 válasz



2. ábra. Az elégedettség mértéke a matematika érettségire online felkészülés esetén

A válaszadók túlnyomó többségének (83,9%) nem okozott gondot az online oktatási-tanulási forma a középiskolai matematika tanulás során. A kérdésre igennel válaszolók az alábbi nehézségeket jelölték meg:

- Gyakran csak önállóan megoldandó és visszaküldendő feladatot kaptak, így a tanulási folyamatban hiányzott a pedagógus ismeretátadása.
- Amennyiben egy példa megoldása során bizonytalanság lépett fel valamelyik diáknál, a tanár az online térben később tudott csak reagálni.
- A szokatlan környezet miatt néhányan úgy érezték, hogy összességében nehezebb volt koncentrálni az online órákon.

A középiskolai online oktatás pozitívumaiként a következőket emelték ki a válaszadók:

- A digitális oktatás – a megkérdezettek szerint – rugalmasabb időbeosztást biztosított.
- Az interneten sok hasznos oktató-, felkészítővideó elérhető matematika témakörben is, ezek egy része a távolléti oktatás bevezetése okán készült.
- Több esetben az online órákról felvételek készültek, amelyeket vissza lehetett nézni, így a szóbeli magyarázat többszöri megtekintése segítette az ismeretanyag elmélyülését, a problémásabb feladattípusok gyakorlását.

4. AZ EGYETEMI ONLINE MATEMATIKATANULÁS TAPASZTALATAI

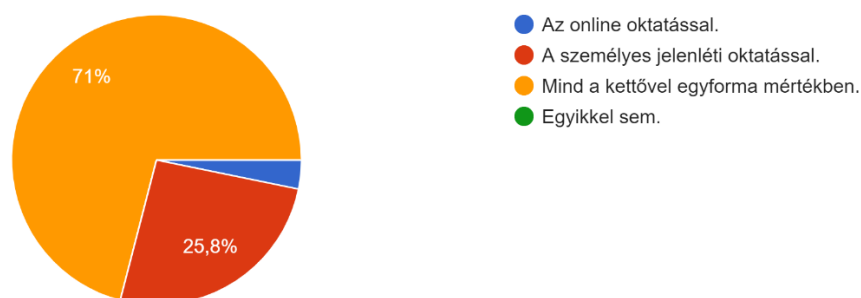
A felmérés harmadik részének első kérdése arra vonatkozott, hogy a középiskola utolsó félévének online oktatásbeli tapasztalatai alapján tartott-e az online egyetemi oktatástól. A válaszadók csaknem háromnegyede (74,2%) nem aggódott az egyetemi online oktatástól, az igennel válaszolók pedig a következő indokokat hozták fel:

- A jelenléti forma esetén gyorsabban képes reagálni az oktató, ha valamivel kapcsolatban nehézség merül fel, a hallgatók pedig „rákényszerülnek” arra, hogy figyeljenek.
- A diákok egy része attól tartott, hogy az oktatók a gyakorlati órákat nem tudják megtartani online módon. Továbbá azt feltételezték, hogy a visszaélések elkerülése miatt szigorodni fognak a vizsgakövetelmények.
- Miközben 2020 tavaszán az érettségire kellett felkészülniük online módon, melynek az volt az előnye, hogy „csak” át kellett ismételni a korábban megszerzett tudásanyagot, addig a felsőoktatásban új ismereteket kell elsajátítani, ráadásul rövidebb idő alatt nagyobb anyagot.
- Többen már eleve is tartottak az új közeg okozta kihívásoktól, amit úgy vélték, hogy az esetleges távolléti oktatás még fokozhat.

Mivel 2020 szeptemberében az egyetemi oktatás személyes jelenléttel kezdődött meg, és november elején tértünk át online oktatásra, így a hallgatók az Analízis I. tárgy kapcsán összehasonlíthatták a két képzési formát. A válaszadók preferenciáit szemlélteti a következő kördiagram:

Az Analízis I. tárgy melyik oktatási formájával volt elégedettebb?

31 válasz

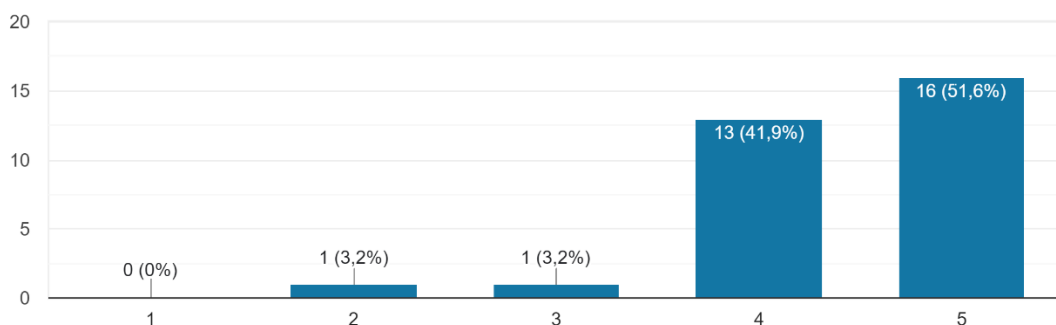


3. ábra. A különböző oktatási formák összehasonlítása az Analízis I. kurzus esetén

A 3. ábráról leolvasható, hogy egyetlen hallgató sem volt a válaszadók között, aki mindkét oktatási formával elégedetlen lett volna. Külön-külön is szerepelt a hagyományos, illetve online oktatás hatékonyságára vonatkozó kérdés, amely szintén megerősítette a 3. ábráról leolvasható tendenciát, azaz, hogy bár a többség (71%) mindkét képzési formával elégedett volt, a jelenléti oktatásra többen voksoltak.

Mennyire volt hatékony Ön szerint az Analízis I. tárgy hagyományos formában történő oktatása?
(2020. szeptember, október)

31 válasz



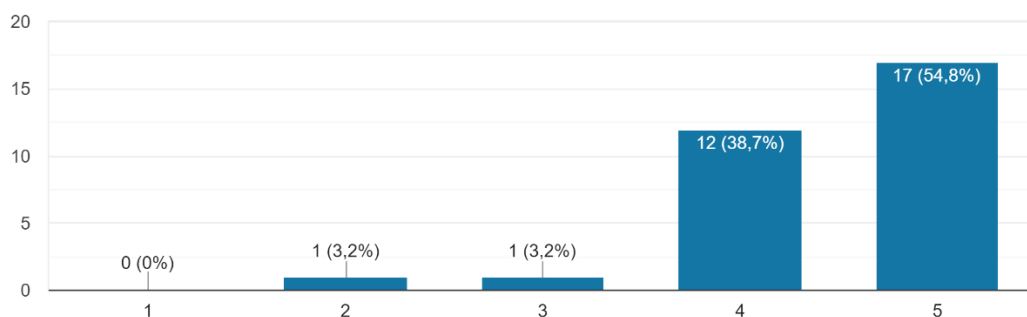
4. ábra. A hatékonyság értékelése az Analízis I. tárgy személyes jelenléttel történő oktatása esetén

A felmérésben részt vevő hallgatók döntő többsége (84%-a) az Analízis I. kurzus majdnem minden online óráján részt vett, csak 2 hallgató nyilatkozott úgy, hogy egyáltalán nem kapcsolódott be a tárgy online oktatásába. A megkérdezettek 90,3%-a az online oktatás hatékonyságával is elégedett volt, azaz 4 vagy 5 pontot adott az erre vonatkozó kérdésre. Emlékeztetünk rá, hogy a pozitív véleményt az is befolyásolja, hogy a válaszadók mindegyike sikeresen teljesítette az Analízis I. tárgy követelményeit. Válaszaik alapján (87,1%) mind a kurzushoz kapcsolódó elektronikus tananyag, mind az online órák nagymértékben segítettek a zárhelyi dolgozatra, illetve a vizsgára felkészülést, 93,5%-nak nem okozott problémát az Analízis I. tárgy teljesítése során az online oktatási-tanulási forma. Nehézségként a csoporttársakkal történő találkozás hiányát, a számítógép előtt – kényszerűen – töltött túlságosan hosszú időt jelölték meg.

A második félévben már kizárólag online oktatásra került sor. A következő oszlopdiagram mutatja, hogy a válaszadók több mint 90%-a elégedett volt az Analízis II. online oktatásával.

Mennyire volt elégedett az Analízis II. tárgy online oktatásával?

31 válasz

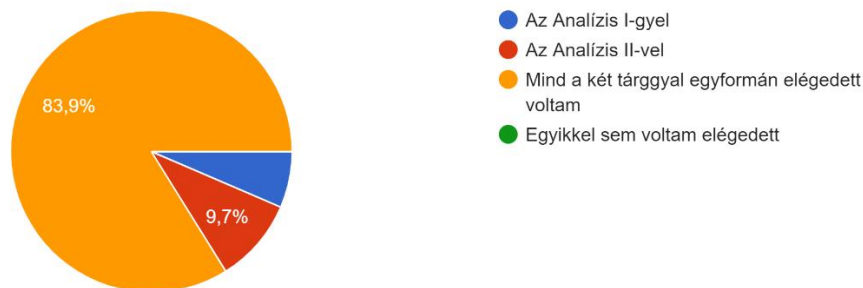


5. ábra. Az elégedettség mértéke az Analízis II. online oktatása esetén

A felmérés idején a szorgalmi időszak lezárása közeledett, így a hallgatók össze tudták vetni a két analízis tárgyat. Összességében (83,9 %) mind a két kurzus online oktatásával elégedettek voltak a diákok.

Melyik tárgy oktatásával volt elégedettebb?

31 válasz



6. ábra: Analízis I. és II. online oktatásának összehasonlítása

Az egyetemi online oktatás előnyeinel a következőket hangsúlyozták a kérdőív kitöltői:

- Rendelkezésre állt elektronikus tananyag, így nem kellett folyamatosan jegyzetelni, jobban lehetett figyelni a magyarázatokra.
- A részletesen kidolgozott elektronikus tananyag, a példák és a megoldások sokat segítettek a számonkérésekre történő felkészülésben.
- Az interaktív órák, játékos elemek motiválták a hallgatókat.
- A rugalmas időbeosztás, az utazási idő „megspórolása” könnyebbé teszi a munka melletti tanulást.

5. ÖSSZEGRÉS

A felmérésben részt vevő, a 2020/2021. tanévben elsőéves műszaki alapképzésben tanuló hallgatók túlnyomóan elégedettek voltak az egyetemi online analízis tanulási formával, ennek ellenére a jövőben csak a harmaduk választaná kizárólagosan ezt az oktatási formát. Abban azonban kivétel nélkül mindegyikük egyetértett, hogy az online tanítás során alkalmazott módszertant, eszközöket a személyes jelenléti oktatásba is célszerű áttemelni, mivel ezen módszerek, a különböző online játékos elemek (pl. Kahoot alkalmazása) segítik a tananyag elmélyítését, érdekesebbé tehető az óra.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Grajczjár I., Schottner K.; Szűts Z., „A digitális távoktatás felsőoktatási tapasztalatai: milyen tényezők magyarázzák a blended learning támogatottságát?”, OPUS ET EDUCATIO, Vol. 8., No. 2., pp. 116–128, 2021.
- [2] Czifra B., Nagy Zs., Tegzesné Czigler E., „Elemzés A digitális oktatás tapasztalatainak értékelése.” Állami Számvevőszék, 2021. <https://www.aszhirportal.hu/storage/files/files/elemezsek/2021/E2114.pdf?ctid=1259>
- [3] Benedek A., „Távoktatás másként!!! – A digitális kor pedagógiai kihívásaihoz”, OPUS ET EDUCATIO, Vol. 7., No. 3., pp. 185–192., 2020.
- [4] P. Engzell, A. Frey and M. D. Verhagen, ”The Collateral Damage to Children’s Education During Lockdown.” VoxEU, 2020. <https://voxeu.org/article/collateral-damage-children-s-education-during-lockdown>
- [5] Fokozatváltás a felsőoktatásban középtávú szakpolitikai stratégia 2016. https://2015-2019.kormany.hu/download/c/9c/e0000/Fokozatvaltas_Felsookatasban_HONLAPRA.PDF
- [6] Németh A., Adatelemzés statisztikai módszerekkel, Szeged, 2018., https://eta.bibl.u-szeged.hu/458/1/EFOP343_AP2ETSZK_jegyzet_N%C3%A9meth_Anik%C3%B3_Adatelemz%C3%A9s_statisztikai_m%C3%B3dszerekkel_20180620.pdf

Integration of robotics into education

Gergely Dezső¹

¹ University of Nyíregyháza, Institute of Engineering and Agriculture, Department of Physics and Production Engineering, Sóstói Road 31/B, H-4400 Nyíregyháza, Hungary, e-mail: dezso.gergely@nye.hu

Abstract: Robotics has surprisingly rich appearance in education today. This follows from rapid technological development, increasing demands of job market, intensive pedagogical research, high social interest, and opportunities for interacting with robots for people of all ages.

This paper gives a brief, not exhaustive survey of literature in order to bring into comprehension three topics: increase of scientific research of robotics in education, recent roles of robotics in education, skill development demand and opportunities regarding robotics.

Keywords: STEM, robotics, education, skills, methodology, pedagogy

1 INTRODUCTION

History of robotics can be rooted from ancient Greeks, but the story of modern robots started in 20th century [1]. Though there were previous robotic-like solutions, first invention called industrial robot was developed by George Devol. It was an industrial manipulator, called Unimate. Devol founded a company with Joseph Engelberger, who was able to develop this invention so that it was marketable. This very early narrative is highly characteristic to robotics till today: it is a teamwork. Robots are complex systems not only in engineering or scientific sense, but for a successful application it needs finding its feet in industry or society, which requires additional expertise.

Nowadays robots became integrating part of society. Beyond industry, households, medicine, communication, transportation, and many other fields of life are involved. This is valid also for education, which is one of the most important subsystem of our social life.

There is a stereotype of application of robotics in education, i.e. students interact with robots in the classroom, or build their own robots using robotic kits. There is something true in it. However, integration of robotics into education is much more than the previous facts.

Recently relation of robotics and education is subject of intensive scientific research.

In 2020 Lopez-Belmonte and coauthors [2] analyzed 926 scientific papers found in Web of Science database searching by keyword “robotics” related to education. Scientific paper production shows strong increasing trend since 2010. The main topics discussed are educational research, education of scientific disciplines, engineering, interdisciplinary computer science and other applications also occurred. More than half of the papers investigated appeared in conference proceedings. According to the themes of publications three periods can be distinguished. In 1975-2012 physics and engineering issues of robots, and basic concepts of education were in the focus of scientific publications. It changed in the period 2013-2016 when the leading keyword was “programming”, and research on education was more elaborated. In 2017-2019 most discussed topics were outcomes, like technologies supporting training, simulation techniques. In education students got more attention.

Dwivedi et al. [3] shared their experience gained in several robotics competition, and provided insight into the process of forming a curriculum of robotics education. This paper is a compilation of a research survey performed in three states of the USA. It introduces 15 robotics competition. The authors conclude that a need for a universally accepted curriculum for robotic education can be identified. They claim for further investigations for making robotic kits available for more children. Hyunjin and Tongjin [4] prognosticate that robotics will be taken seriously and popularized in schools. Research on robotics educational programs, and the possible role of teachers are required.

Valenzuela in his article on Edutopia [5] presents several opportunities for incorporating robotics into curricular education, not only into STEM subjects, but also into language learning and social studies.

In Hungary robotic education was limited to higher education for a long time. It started to spread in elementary and secondary schools in the beginning of 21th century [6].

In this paper we would like to give a comprehensive overview of group of issues of integration of robotics into education. We seek for main factors determining how robots can participate in the education of humans, what kind of usage it has, and what the challenges are today.

2 ROBOTICS AND EDUCATION

Since education itself and robotics itself separately are colorful, complicated topics, one can expect that joining these two results in ever so much complex multidisciplinary area.

It is enough to consider some questions to understand the peculiarity of the topic. What age people do we want to teach? What is the objective of education? What kind of robots do we apply? What is the role of robots in education? Do we want to create robots or indeed use those? This is why we have to start from basic questions.

Figure 1 illustrates connection of these two complex systems. Disciplinary components of robotics and the way how it is integrated into society can be connected to character and skills development of a student by appropriate pedagogical (methodological) solutions.

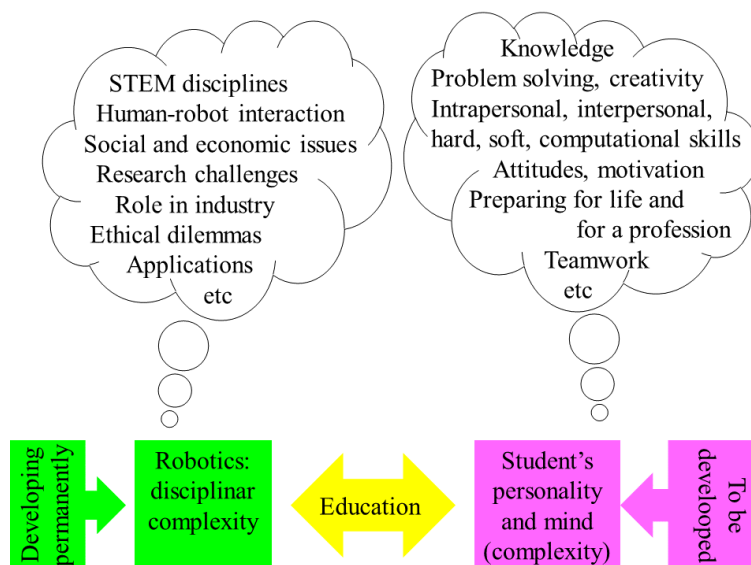


Figure 1. Interaction of two complex systems: robotics and education

Mubin et al. introduces five viewpoints for classification of robot applications in education [7]. Those can provide good guide of orientation.

- Domain of education may be technical or non-technical. Today more and more fields of education can be enumerated as potential user of robotics somehow, even if the subject is non-technical.
- From the viewpoint of organization of education one can distinguish intracurricular and extracurricular establishment. Robotics comes to education from extracurricular side. After school study groups, robotic camps, hobby robot fans existed much before starting to think of curricula of any formal robotics education.
- Robots may have three different roles in a pedagogical process: tool, peer or tutor.
- The types of robot applied in education may open up different scenarios. Today we have an increasing variety of robots and robot kits aimed directly at some form of education. Additionally, other kinds of robots can be introduced into education depending on opportunities of the school and creativity of teachers and students [8]. What is more, recently most of robot kit producers provide methodological guides and syllabuses to their product.
- As a theoretical point of view pedagogical theories underlying different methodological solutions can also be analyzed. Constructionism, active learning and learning by design are mentioned in the cited work. Here we note that theory of maker education is also often applied in pedagogical projects related to robotics [9] [10] [11].

Jung and Won in their literature review [12] focused on age group of young children from kindergarten up to 5th or 6th grade. Their study involved reports on formal and informal study programs with robot kits, but not with social robots. They reflect on definition of robotics education and its position within education. Relation of STEM (science, technology, engineering, mathematics) subjects and robotics appear in two kinds in the literature reviewed. One approach sees robotics education as the part of STEM education. The other one handles robotics education as a separate field with a large common part (intersection) with STEM education. Additionally, two directions can be observed in the role of robotics in education. On the one hand, robotics is often used as a tool of teaching STEM subjects. In this case robots or tasks with robots serve as an aid to understand or practice STEM concepts, for example levers, gear drives, or elementary programming concepts like cycles or conditional commands. On the other hand, robotics is applied in education for the purpose of teaching robotics itself. In this approach the objective of education is directly robotics, that is construction, programming and application of robots.

A highly important and interesting concept in robotics-related education is robotics-intensified practice. It means that skills are exercised by means of robotics. These skills may be STEM skills, robotics skills or possibly other skills (e.g. teamwork, communication). However, authors of [12] draw our attention to the fact that robotics-intensified practice is often biased. It means that robotics involves conceptualization, construction, programming and application of robots, but usually programming tasks outweigh the other three. It means that involving robotics into education

thoughtlessly may mislead the process. This implies that teachers must be aware of what skills of students they really want to strengthen, and they must design tasks for their pupils, students according to it.

Cejka et al. [13] introduces activity of Tufts University Center of Engineering Education Outreach to children at the age groups of K-12 (from kindergarten to 12th grade). Their theoretical background roots in constructivism (Piaget) and constructionism (Papert). They emphasize Papert's view of computers (in 1970's) that children can get in close relation with mathematics by programming a computer. At the same time they point to the fact that learning experience involves design, building and programming a robot. Key concept of their educational methodology is open-ended engineering design problems. This can be formulated for students of all ages from kindergarten to university, PhD level and teacher training.

Robotics education and educational robotics are frequently used expressions. Those are not interchangeable, not synonyms. Their relation to each other and education itself is demonstrated in Figure 2.

Robotics education aims to teach robotics itself. Outcomes of robotic education is inspired, determined by demands of robotic industry and/or subsequent educational levels. Hard and soft skills to be developed in robotic education are directly related to expertise of robotics. In robotic education students often challenged to design, build and test robots, or probably compete with their own-made solutions.

Educational robotics is a discipline for support any field of education by robotic applications. It can use peer or tutor robots. STEM education is in a special position, because robots embody engineering solutions and physical phenomena, together with robots can support discovering and exercising STEM knowledge. It requires methodological awareness of teacher.

Robotics education and educational robotics may certainly have common solutions and common instruments.

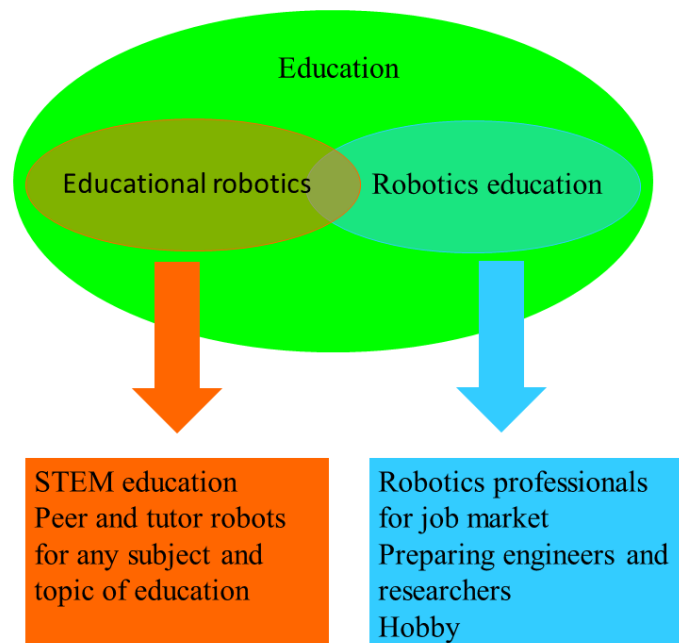


Figure 2. The functions of educational robotics and robotic education, and their relation

Borisov et al [14] presented an educational project for university students. The aim of this program was to develop the skills of students in manipulation tasks with robotic arms. This activity was integrated into a university course. Some students applied knowledge gained from these tasks in their thesis.

Nagy and Dezső presented a project for university students [15]. In this project a packaging system was designed, constructed and demonstrated. The whole system was built up from Lego Mindstorms NXT parts. It was able to fold the paper box, tape the bottom, pass it on, fill with Lego parts, and tape the top of the box. It was displayed in Lego factory at Nyíregyháza, Hungary, one of the largest manufacturing unit of Lego. It was visited by the chief international management group of Lego.

3 DISCIPLINES ROBOTICS RELATED TO

Robotics is related to STEM disciplines and many other ones.

STEM disciplines:

- Mathematics – geometry, arithmetic, artificial intelligence

- Physics – mechanics, electrodynamics, thermodynamics
- Informatics, programming – algorithms, software coding, using software application
- Electronics
- Hardware
- Engineering – mechatronics, energy supply, machine parts and mechanisms, assembling

Other disciplines:

- Management – teamwork, project management, communication, organization, job definitions, re-definitions
- Economics – thrift, business, enterprises
- Psychology – human-robot interaction, good and bad side effects of long-term use of a robot
- Ergonomy – safety, cooperative robots, human vs. machine environmental demands

Moreover, robotics is related to almost all other scientific or engineering disciplines depending on what kind of robots are in question. Since robots are developed on many different fields we can talk about robots of manufacturing, transportation, logistics, medicine, marine, aeronautics, space, household, tourism, cookery, agriculture, military, rescue, laboratory, measurement, architecture, and many more. These special applications can be mentioned in elementary and high school education, but usually not in depth, indeed as motivating demonstration (e.g. visiting a factory equipped with robots) or as narrative in a challenge (e.g. build a rescue robot).

4 SKILL DEMAND AND DEVELOPMENT

Infographic [16] presents most important skills that children can develop thanks to educational robots:

- Creativity and imagination,
- Teamwork,
- Learning from mistakes,
- Self-esteem,
- Critical thinking,
- Proactive spirit,
- Adapting to future,
- Self-assessment of their own performance,
- Motivation for learning,
- Developing new ways of communication.

Of course these skills can be developed not only by robots. At the same time robotics is often highlighted because it provides “fertile soil” for project-based educational challenges, moreover complete project-based educational programs. And, it is valid not only for robotics education, but for other fields of robotics-intensified education (for example history, literature or music).

Shmatko and Volkova [17] investigated that hard, programming and soft skills are demanded for robotics professionals in Russia and the United States by interviews. Saliiently, the most required technical (hard) skill is programming robots and components in both states. Among soft skills organizational, communication skills and being a team player in the USA and the English language, communication skills, self-motivation and creativity in Russia stands over 10%. We highlight from this paper the top 5 mentioned new (or unconventional) skill sets or professions which probably will be required in 5-10 years based on current trend: artificial intelligence, cognitive science; new materials; neural interfaces; technical vision; medical robotics, micro-robotics, a blend of robotics and biotechnology, neurophysiology.

Review research of Safrudin et al. [18] focuses on comprehension of computational skills development and educational robotics. Computational thinking involves five components namely problem decomposition, pattern recognition, abstraction, algorithm design for solution and evaluation. Abstraction is a crucial element of skills needed for computational thinking. Application of robotics in high school education has double benefit: it enhances student’s abstraction skill, and strengthens their commitment to learning, especially in case it is applied in project-oriented programs.

Qu and Fock [19] studied how student-robot interaction cultivates computational skills of 7-10 years old children in an extracurricular program, a summer camp. They differentiate three roles of a student when he or she works with a robot: designer, observer and participant. In the designer role the student builds and/or programs a robot. Observer role means an investigation on a robot’s response. Observation aims at a particular behaviour of the robot. Observation is a methodological task, children should be taught to do it. In the role of participant, students see if the robot acts as they expected. The robot’s performance helps students to imagine how the robot works. Engagement of students increase from designer to participant role. Authors studied the following computational skills: formulating problems, abstraction, logical thinking, using algorithms, analyzing and implementing solutions, generalizing and problem transfer. Authors demonstrated by a simple taxonomy that higher engagement results in development of a wider scope of computational skills, and development of a certain skill was more advanced.

Chou conducted a research in Taiwan with 30 grade 5 students [11]. An after-school informal learning environment was constructed, it was called the Robot MakerSpace. It is based on the theory of maker education [9] [10]. They offered projects with Arduino platform, and it was programmed by Scratch. It has been shown out that electrical engineering, computer programming and problem solving skills of participants developed. Additionally, it has been demonstrated by analysis of filed observations that students developed the following interpersonal and intrapersonal skills: overcoming the fear of failure, high motivation, facing obstacles during the thinking process, debug, review, learning from mistakes after a competition supported by a forum. The author also emphasizes the role of educators. Students need instructions, encouragement, guiding through the whole project, moreover after the project in evaluation.

Robotic Academy is an educational tool consisted of Gazebo simulator, Robot Operating System, Python programming language, a code template and an automatic evaluator for each exercise. It supports both real and simulated robots. Canas et al. [20] introduces 18 exercises available in 2020, and the list is expandable. Practical tasks are aimed to the field of service robotics like mobile robots, autonomous cars, drones and computer vision, which are emerging in the society today. These project-based exercises provide background to an intelligent robotics course for high-school students.

Involvement of robotics into education is determined by three main factors, as Figure 3 shows. This is valid for both educational robotics and robotic education. Technological development opens up new opportunities in robot-human interaction. Society and industry gives voice of demands for hard and soft skills, which are necessitated to be formed and strengthened by education. Both technology and social requirements induce a motive for methodological research and development in education, which has at least two substantial fields: implementing technological results into education, and understanding how children and youngsters can utilize robotic applications in their advancement of their character and skills.

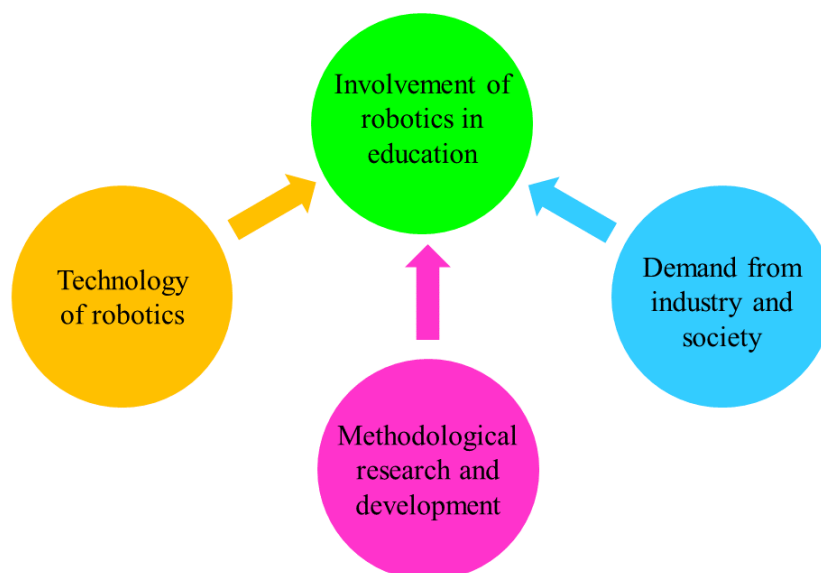


Figure 3. Involvement of robotics into education is determined by three main factors

5 CONCLUSIONS

Evaluating the literature surveyed we can state the followings about integration of robotics into education:

- Relation of robotics and education fit into the frame of general aim of education: fostering character by knowledge transmission and skill development.
- There are several theories of education which may serve as a background to programs applying robotic solutions: constructivism, constructionism, active learning, learning by design, maker education.
- Robotics provides wide variety of project-based studies whether in STEM education or in social and linguistical learning.
- The role of robots in education can be selected as tool, peer or tutor.
- The complexity of robotic applications in education is scalable according to educational purpose.
- Robotics education and educational robotics are two different topics, and teachers must be aware of the difference between those.
- Robotics can be effectively applied in education from kindergarten to higher education. Each age group and each pedagogical aim needs special methodological foundation.

- Though robotics still appears mostly in extracurricular education, there are numerous realized examples and pursuits for creating intra-curricular study programs for all ages.
- Three main factors determine how robotics is integrated, and will be integrated in the future into education: technological advance of robotics, demand from job market and research, methodological investigations and developments.

Finally, we can conclude that both robotics and education are vividly changing parts of our life. Now, there are significant results, good practices and known solutions in educational robotics as well as robotics education. However, we have still a lot to discover, develop, learn and teach. Since our world is rapidly changing it is expected that the integration of robotics into education will offer abundant field of research for theorists and practitioners of pedagogy for a long time.

REFERENCES

- [1] A. Gasparetto and L. Scalera, 'A Brief History of Industrial Robotics in the 20th Century', *AHS*, vol. 08, no. 01, pp. 24–35, 2019, doi: 10.4236/ahs.2019.81002.
- [2] J. López-Belmonte, A. Segura-Robles, A.-J. Moreno-Guerrero, and M.-E. Parra-González, 'Robotics in Education: A Scientific Mapping of the Literature in Web of Science', *Electronics*, vol. 10, no. 3, p. 291, Jan. 2021, doi: 10.3390/electronics10030291.
- [3] R. Dwivedi, A. Kumar, B. Babu, N. Grandhi, R. Meka, and V. Ahuja, 'The Role of Competitive Robotics in Providing Context to Classroom Learning and Technical Skill Development in School Age Students—A Survey of Current Avenues, Assessment, and Path Forward with Systematic Implementation', *Education Sciences*, vol. 11, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2021, doi: 10.3390/educsci11040167.
- [4] C. Hyunjin and K. Tongjin, 'A Study on the Development of Robot Education in the Fourth Industrial Revolution', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1642, Sep. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1642/1/012026.
- [5] 'Incorporating Robotics Across the Curriculum', *Edutopia*. <https://www.edutopia.org/article/incorporating-robotics-across-curriculum> (accessed Jun. 21, 2022).
- [6] B. Simon and G. Dezső, Eds., *Számítógéptudomány a kezdetektől a robotfoci világbajnokságig Szabolcs-Szatmár-Bereg megyében (MTMT)*. Nyíregyházi Egyetem, 2009.
- [7] O. Mubin, C. J. Stevens, S. Shahid, A. A. Mahmud, and J.-J. Dong, 'A review of the applicability of robots in education', *Technology for Education and Learning*, vol. 1, no. 1, 2013, doi: 10.2316/Journal.209.2013.1.209-0015.
- [8] X. Yu, S. Nurzaman, U. Culha, and F. Iida, 'Soft Robotics Education', *Soft Robotics*, vol. 1, pp. 202–212, Sep. 2014, doi: 10.1089/soro.2014.0009.
- [9] J. Hughes and K. Kumpulainen, 'Maker Education: Opportunities and Challenges', *Frontiers in Education*, vol. 6, Nov. 2021, doi: 10.3389/educ.2021.798094.
- [10] I. Kang and H. Kim, 'Exploring the Value of the Maker Mind Set at Maker Education', *The Journal of the Korea Contents Association*, vol. 17, no. 10, pp. 250–267, 2017, doi: 10.5392/JKCA.2017.17.10.250.
- [11] P.-N. Chou, 'Skill Development and Knowledge Acquisition Cultivated by Maker Education: Evidence from Arduino-based Educational Robotics', *EURASIA J MATH SCIT*, vol. 14, no. 10, Jul. 2018, doi: 10.29333/ejmste/93483.
- [12] S. E. Jung and E. Won, 'Systematic Review of Research Trends in Robotics Education for Young Children', *Sustainability*, vol. 10, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2018, doi: 10.3390/su10040905.
- [13] E. Cejka, C. Rogers, and M. Portsmouth, 'Kindergarten Robotics: Using Robotics to Motivate Math, Science, and Engineering Literacy in Elementary School', p. 12.
- [14] O. Borisov *et al.*, 'Manipulation Tasks in Robotics Education', *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, pp. 22–27, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.147.
- [15] Nagy G. L. and Dezső G., 'Csomagoló robot építése és stabilitásának vizsgálata', Kolozsvár, Romania, 2011, pp. 213–216. doi: DOI: 10.36243/fmtu-2011. 52.
- [16] 'Infographic_educational_robots.pdf'. https://www.iberdrola.com/documents/20125/40177/Infographic_educational_robots.pdf (accessed Jun. 21, 2022).
- [17] N. Shmatko and G. Volkova, 'Bridging the Skill Gap in Robotics: Global and National Environment', *SAGE Open*, vol. 10, no. 3, Jul. 2020, doi: 10.1177/2158244020958736.
- [18] F. M. Safrudin, C. W. Budiyo, and R. A. Yuana, 'The Influence of Educational Robotics to Abstraction Skill in High School', *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1808, no. 1, p. 012018, Mar. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1808/1/012018.
- [19] J. Qu and P. Fok, 'Cultivating students' computational thinking through student–robot interactions in robotics education', *International Journal of Technology and Design Education*, Jun. 2021, doi: 10.1007/s10798-021-09677-3.
- [20] J. Cañas Plaza, E. Perdices, L. García-Pérez, and J. Fernández-Conde, 'A ROS-Based Open Tool for Intelligent Robotics Education', *Applied Sciences*, vol. 10, Oct. 2020, doi: 10.3390/app10217419.

Szakirányú Továbbképzési Szakok A Nyíregyházi Egyetem Műszaki És Agrártudományi Intézetében

Specialized continuing education courses at Technical and Agricultural Sciences Institute of University of Nyíregyháza

Sikolya László

Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, Közlekedéstudományi és Infotechnológiai Intézeti Tanszék 4400 Nyíregyháza Sóstói út 31/B

Összefoglaló: A Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézetének rövid bemutatása visszatekintve a jogelőd intézményekre is. Az Intézet tevékenységeinek ismertetése a mi a kutatás és oktatás területeit érinti kiemelttem a szakirányú továbbképzési szakokat.

Kulcsszavak: tudományos kutatás, oktatás, alapképzési szakok, szakirányú továbbképzési szakok

Abstract in English: A short presentation of the Institute of Technology and Agricultural Sciences of the University of Nyíregyháza, looking back at its predecessor institutions. In describing the activities of the Institute in our fields of research and education, I have highlighted the specialized continuing education courses.

Keyword in English: scientific research, education, undergraduate courses, specialized continuing education courses

AZ INTÉZET MÚLTJA, HELYE, SZEREPE

A Nyíregyházi Főiskola Műszaki és Mezőgazdasági Főiskolai Karát 2000. január elsején alapították a szakmai jogelőd Gödöllői Agrártudományi Egyetem Nyíregyházi Mezőgazdasági Főiskolai Karából. A jogelőd Nyíregyházi Mezőgazdasági Főiskolának az alapjait az 1939-ben alapított Kertmunkás Iskola, az 1946-ban létesített Kertészeti Középiskola, illetve az 1950-ben létrehozott Mezőgazdasági Technikum kertészeti és mezőgazdasági gépészeti technikus képzése képezte. Az átalakuló mezőgazdaság szakember igényeinek kielégítésére 1961-ben az országban elsők között Nyíregyházán is létesítettek felsőfokú mezőgazdasági technikumot és elkezdődött a felsőfokú szakemberképzés: 1961-ben gyümölcs és szőlőtermesztési szakon, az 1966/67. tanévtől pedig a mezőgazdasági gépész szakon. A mezőgazdaság fejlődése további szakterületen igényelte a felsőfokú képzettségű szakembereket. Így 1968-ban a mezőgazdasági gépészeti szak növényvédő repülőgép-vezető ágazatát indították be. A gyors fejlődés eredményeként 1971-re – tíz év alatt – mintegy 800 szakember végzett a kertészeti szak gyümölcsstermesztési, feldolgozási és áruforgalmi ágazatán, illetve a mezőgazdasági gépészeti szak gépjavító és növényvédő repülőgép vezető ágazaton.

A szakmai fejlődés elismeréseként a Felsőfokú Mezőgazdasági Technikum átszervezésével 1971-ben létesült a Nyíregyházi Mezőgazdasági Főiskola, Kertészeti Karral és Mezőgazdasági Gépészeti Karral.

1990-től a szakmai integráció jegyében Gödöllői Agrártudományi Egyetem Nyíregyházi Mezőgazdasági Főiskolai Karává szerveződött, s bevezettük a kreditrendszerű oktatást.

1992-ben a kertészeti képzés hagyományain újra indult a mezőgazdasági mérnöki szak, 1994-től pedig létrehoztuk a gazdálkodási szakot.

2000-ben alakult meg a Nyíregyházi Főiskola, amelyben az ismertetett jogelőd a négy kar létrehozásához adta a Műszaki és Mezőgazdasági Főiskolai Kart, valamint részben a Gazdasági és Társadalomtudományi Kart.

A műszaki végzettségű szakemberek iránti igény növekedése, az életen át tartó képzési modell kiteljesedést kínál a szak számára. A magas szintű elméleti alapozás mellett a képzés gyakorlatorientált jellege a meghatározó, melyhez az oktatási feltételeket a jól működő botanikus kert, a tangazdaság, a bemutató kert, az üvegház, a tanműhelyek és a laboratóriumok kiépítettsége, valamint a széleskörű kapcsolatrendszer biztosítja. Az új létesítmények épületgépészeti, oktatástechnikai és laboratóriumi infrastruktúrája lehetővé teszi a XXI. századi technika színvonalának megfelelő oktatást, kutatást, szaktanácsadást.

2013. szeptember 1-től a Szenátus RH/41-69/2013.(június 18.) számú határozatának következtében a kari struktúra megszűnt a Műszaki és Mezőgazdasági Kar **Műszaki és Agrártudományi Intézet** néven folytatja tovább működését.

2016. január 1-től a Nyíregyházi Főiskola **Nyíregyházi Egyetem** néven folytatja tovább tevékenységét, mint alkalmazott tudományok egyeteme, melyben a Műszaki és Agrártudományi Intézet meghatározó szervezeti egységként működik tovább.

A műszaki végzettségű szakemberek iránti igény növekedése, az életen át tartó képzési modell kiteljesedést kínál a szak számára. A magas szintű elméleti alapozás mellett a képzés gyakorlatorientált jellege a meghatározó, melyhez az oktatási feltételeket a jól működő botanikus kert, a tangazdaság, a bemutató kert, az üvegház, a tanműhelyek és a laboratóriumok kiépítettsége, valamint a széleskörű kapcsolatrendszer biztosítja. Az új létesítmények épületgépészeti, oktatástechnikai és laboratóriumi infrastruktúrája lehetővé teszi a XXI. századi technika színvonalának megfelelő oktatást, kutatást, szaktanácsadást.

A Műszaki és Agrártudományi Intézet jelenlegi tanszékei:

- Agrártudományi és Környezetgazdálkodási Intézeti Tanszék;
- Jármű- és Mezőgazdasági Géptani Intézeti Tanszék;
- Közlekedéstudományi és Infotechnológiai Intézeti Tanszék;
- Műszaki Alapozó, Fizika és Gépgyártás-technológia Intézeti Tanszék.

TEVÉKENYSÉGEK MŰSZAKI ÉS AGRÁRTUDOMÁNYI INTÉZETBEN

A képzések korszerűsítése és új szakok alapítása és indítása folyamatos a Műszaki és Agrártudományi Intézetben, igazodva a kor és a munkaerőpiac elvárásaihoz.

Folyamatosak a kutatások és a rendezvények is. Rendszeresen megrendezésre kerülnek a házi Tudományos Diákköri rendezvények a díjazottak pedig az Országos Tudományos Konferenciákon vesznek részt. Kétévenként megrendezésre kerül a Nagybánya-i társintézménnyel közös szervezésben a tudományos Multidiszciplináris Konferencia.

A Műszaki és Agrártudományi Intézetben eddig a következő kutatások folytak illetve folynak:

- Traktor gumiabroncsok műszaki fejlesztése.
- Belsőégésű motorok vizsgálata.
- Ipari pattogató berendezés tervezése és gyártása.
- Szélerőgépek tervezése és gyártása.
- A dohány szárítás technológiai és műszaki fejlesztése.
- A zöldség és gyümölcs szárítás korszerű technológiái.
- Környezetbarát megmunkálási technológia fejlesztése.

- Kísérleti mechanikai kutatások.
- Anyagtudományi kutatások (kompozitok fejlesztése, fém- és műanyaghegesztés).
- Repülőgép részegységek mechanikai vizsgálata.
- Additív gyártási eljárások kutatása műgyanta és fém alapanyagból készített alkatrészek esetén
- Számítási háló optimalizálása és simítása.
- A mesterséges intelligencia kutatása.
- Mechatronika az iparban és a mezőgazdaságban;
- Közlekedéstudomány és logisztikai fejlesztések.
- A régió infrastruktúrája, ipara, mezőgazdasága és környezeti kölcsönhatása;
- Tájjellegű növények termesztéstechnológiájának fejlesztése;
- Mezőgazdasági melléktermékek energetikai célú hasznosítása, bioenergetika;
- Növénynemesítési és állattenyésztési tevékenységek;
- Akkreditált anyagvizsgáló- és mérőcentrumban folyó a kutatási potenciál fejlesztése.
- Megújuló és konvencionális energiaforrások harmonizálását segítő kutatásfejlesztés.
- Élelmiszeripari technológiák műszaki fejlesztése
- Közlekedéstudományi kutatások, műszaki logisztikai „K+F” projektek.
- Motorfékpad laboratóriumban folyó járműgépészeti kutatások
- Korszerű hegesztőműhelyben végzett hegesztés-technológiák fejlesztése
- Anyagmozgatás és logisztika
- Környezettechnika laboratóriumban környezetvédelmi kutatások

Az **oktatás** jelenleg a következő szakokon folyik:

FELSŐOKTATÁSI SZAKKÉPZÉSEK

Műszaki felsőoktatási szakképzési szak

Mezőgazdasági mérnöki felsőoktatási szakképzési szak

ALAPSZAKOK

Gépészmérnöki alapszak (BSc)

Repülőmérnöki alapszak (BSc)

Közlekedésmérnöki alapszak (BSc)

Járműmérnöki alapszak (BSc)

Mezőgazdasági és élelmiszeripari gépészmérnöki alapszak (BSc)

Mezőgazdasági mérnöki alapszak (BSc)

MESTERKÉPZÉS

Fizika mesterszak (MSc)

Mérnök-tanár (gépészmérnök) (MSc)

SZAKIRÁNYÚ TOVÁBBKÉPZÉSI SZAKOK

1. Agrár- és vidékfejlesztési szakmérnök szakirányú továbbképzési szak

– engedélyezése: NYF Szenátus I/2-2/7/2007. (2007.01.10.)

– képzési idő: 2 félév

– indulása: 2007/2008. tanévtől folyamatosan

A végzett mérnökök rendelkeznek azokkal a mezőgazdasági, projekt menedzsment, szaktanácsadási és humánmenedzsment ismeretekkel, amelyek szükségesek egy mezőgazdasági vállalkozás, vidéki gazdaság részére a pályázattal elnyerhető forrásokra történő projekt kidolgozására és menedzselésére.

2. Élelmiszeripari minőségügyi szakmérnök szakirányú továbbképzési szak

– engedélyezése: NYF Szenátus I/2-2/54/2008. (2008.04.29.)

– képzési idő: 2 félév

– indulása: 2008/2009. tanévtől folyamatosan

Az élelmiszeripari minőségügyi szakemberek képesek az élelmiszer feldolgozással foglalkozó termelő és szolgáltató vállalatoknál az élelmiszeripari minőségüggyel összefüggő feladatok megoldására, továbbá rendelkeznek azokkal az élelmiszertechnológiai, műszaki, minőség- és emberi erőforrás menedzsment ismeretekkel, amelyek szükségesek egy élelmiszer-feldolgozó vállalat komplex minőségbiztosítási rendszerének a kiépítéséhez, működtetéséhez és fejlesztéséhez.

3. Energetikai szakmérnök szakirányú továbbképzési szak

– engedélyezése: NYF Szenátus RH/55-149/2011.(2011.10.18.)

– képzési idő: 3 félév

– indulása: 2011/2012. tanévtől folyamatosan

A képzés célja: olyan felsőfokú energetikai szakemberek képzése, akik a felsőfokú természettudományi, agrár- és műszaki graduális képzésben megszerzett mérnöki ismereteik birtokában a szakmérnök-képzés elméleti és gyakorlati anyagának elsajátításával képesek az energiatermelő, energiaellátó, valamint energiaszállító és tároló tevékenységet folytató vállalatoknál, felügyelőségnél, szakhatóságoknál, önkormányzatoknál és non-profit szervezeteknél energiatermeléssel és energiaellátással összefüggő integrált feladatok megoldására. Továbbá rendelkeznek azokkal a speciális mérnöki, projektmenedzsmenti ismeretekkel, amelyek szükségesek az energiatermelés, energiaellátás, energiaszállítás és energiátárolás szakterületein a gyakorlati feladatainak elvégzéséhez.

4. Gumiipari technológiai szakmérnök szakirányú továbbképzési szak

– engedélyezése: NYF Szenátus I/2-2/54/2008. (2008.04.29.)

– képzési idő: 2 félév

– indulása: 2008/2009. tanévtől folyamatosan

A gumiipari technológiai szakmérnökök képesek a termelő vállalatoknál a gumi- és abroncsgyártással összefüggő feladatok megoldására, valamint rendelkeznek azokkal a műszaki, gumiipari technológiai ismeretekkel, amelyek szükségesek egy vállalati technológiai rendszer kiépítéséhez, működtetéséhez és fejlesztéséhez.

5. Innovációs menedzser szakmérnök szakirányú továbbképzési szak

– engedélyezése: NYF Szenátus RH/673-3/2014.

– képzési idő: 2 félév

– indulása: 2014/2015. tanévtől folyamatosan

A képzés célja: olyan felsőfokú innovációs menedzser szakemberek képzése, akik a felsőfokú agrár- és műszaki graduális képzésben megszerzett mérnöki ismereteik birtokában a szakmérnök-képzés elméleti és gyakorlati anyagának elsajátításával képesek az innovációban aktívan részt venni, valamint menedzseri tevékenységet folytatni termelő és szolgáltató vállalatoknál, felügyelőségénél, szakhatóságoknál, önkormányzatoknál és non-profit szervezeteknél a környezetgazdálkodással összefüggő integrált feladatok megoldására. Továbbá rendelkeznek azokkal a speciális mérnöki, projektmenedzsmenti ismeretekkel, amelyek szükségesek az ipari és mezőgazdasági szakterületeken a gyakorlati feladatainak elvégzéséhez.

6. Környezet- és vízgazdálkodási szakmérnök szakirányú továbbképzési szak

– engedélyezése: NYF Szenátus RH/48-133/2009. (2009.12.21.)

– képzési idő: 2 félév

– indulása: 2010/2011. tanévtől folyamatosan

A képzés célja: olyan felsőfokú környezet- és vízgazdálkodási szakemberek képzése, akik a felsőfokú agrár- és műszaki graduális képzésben megszerzett mérnöki ismereteik birtokában a szakmérnök-képzés elméleti és gyakorlati anyagának elsajátításával képesek a környezetgazdálkodási, vízgazdálkodási tevékenységet folytató termelő és szolgáltató vállalatoknál, felügyelőségénél, szakhatóságoknál, önkormányzatoknál és non-profit szervezeteknél a környezetgazdálkodással és vízgazdálkodással összefüggő integrált feladatok megoldására. Továbbá rendelkeznek azokkal a speciális mérnöki, projektmenedzsmenti ismeretekkel, amelyek szükségesek az ipari és mezőgazdasági szakterületeken a környezet- és vízgazdálkodás gyakorlati feladatainak elvégzéséhez.

7. Légiközlekedési- hajózó szakmérnöki szakirányú továbbképzési szak

– engedélyezése: FNYF/2218-3/2017 (2017.11.16.)

– képzési idő: 3 félév

– indulása: 2017/2018. II-félévtől folyamatosan

A képzés célja olyan szakemberek képzése, akik képesek:

- a repülés megtervezésére, a szükséges navigációs és teljesítményszámítás elvégzésére;
- a repülési terv elkészítésére, leadására;
- angol nyelvű rádióforgalmazásra;
- a meteorológiai helyzet elemzésére, értékelésére;
- a repülésbiztonsági szabályok betartására;
- a pilóta által üzemeltethető repülőgépeknél a műszaki állapot leellenőrzésére;
- az angol nyelvű szakirodalmat, dokumentációt készség szinten használni;
- elméleti és gyakorlati ismeretei alapján újabb típus- vagy kategória jogosítás megszerzésére.

8. Minőségirányítási szakmérnök szakirányú továbbképzési szak

– engedélyezése: NYF Szenátus I/2-1/9-40/2006. (2006.11.07.)

– képzési idő: 2 félév

– indulása: 2007/2008. tanévtől folyamatosan

A minőségirányítási szakemberek képesek a termelő és szolgáltató vállalatoknál a minőségirányítással összefüggő feladatok megoldására, valamint rendelkeznek azokkal a műszaki, minőségirányítási és humán-menedzsment ismeretekkel, amelyek szükségesek egy vállalati minőség-menedzsment rendszer kiépítéséhez, működtetéséhez és fejlesztéséhez.

9.-10. Munkavédelmi szakember és munkavédelmi szakmérnök szakirányú továbbképzési szakok

– engedélyezése: NYF Szenátus RH/55-182/2011.(2011.12.13.)

– képzési idő: 4 félév

– indulása: 2011/2012. tanévtől folyamatosan

A végzettek képesek lesznek munkakörükben az adott vállalat, vállalkozás, munkavédelmi hatóság működési területén jelentkező munkavédelmi problémákat felismerni és azok kezelése érdekében – a műszaki, tudományos, jogi és gazdasági eszközrendszer felhasználásával – megoldási javaslatokat tenni, illetve a szükséges intézkedéseket megtenni. A képzés során jártasságot szereznek a munkavédelem ismert vizsgálati, illetve értékelési módszereinek alkalmazásában és képessé válnak azok fejlesztésére, valamint új módszerek kidolgozására.

11. Műszaki logisztikai szakmérnök szakirányú továbbképzési szak

– engedélyezése: NYF Szenátus I/2-2/42/2009. (2009.04.07.)

– képzési idő: 3 félév

– indulása: 2009/2010. tanévtől folyamatosan

A műszaki logisztikai szakemberek képesek a logisztikai tevékenységet folytató termelő és szolgáltató vállalatoknál a műszaki (üzemi) logisztikával összefüggő integrált feladatok (anyagellátás, készletgazdálkodás, fizikai elosztás, illetve az ezekhez szervesen kapcsolódó szállítás, anyagmozgatás, csomagolás, rakodás, tárolás, stb.) megoldására. Továbbá rendelkeznek azokkal a speciális műszaki, gazdasági, tervezési, innovációs és erőforrás menedzsment ismeretekkel, amelyek szükségesek egy logisztikai tevékenységet folytató vállalat komplex logisztikai rendszerének a kiépítéséhez, működtetéséhez és fejlesztéséhez.

12. Tűzvédelmi szakmérnök szakirányú továbbképzési szak

– engedélyezése: FNYF/706-3/2017. (2017.03.17.)

– képzési idő: 4 félév

– indulása: 2017/2018. tanévtől folyamatosan

A tűzvédelmi szakmérnök szakirányú továbbképzési szakképzés célja olyan kompetens felsőfokú műszaki szakemberek kibocsátása, akik képesek az elsajátított ismereteket és a megszerzett végzettséget a katasztrófavédelmi szerveknél, a hivatásos önkormányzati tűzoltóságoknál, a veszélyes anyagokat használó üzemek tevékenységi körében alkalmazni, a megelőző és a mentő tűzvédelem, a műszaki mentés területén. A végzettek képesek lesznek munkakörükben az adott vállalat, vállalkozás, tűzvédelmi problémáit felismerni és azok kezelése érdekében – a műszaki, tudományos, jogi és gazdasági eszközrendszer felhasználásával – megoldási javaslatokat tenni, illetve a szükséges intézkedéseket megtenni.

Felhasznált irodalom

[1] Szakindítási kérelmek

[2] www.mati.nye.hu

Az ábrázoló geometria oktatásának aspektusai

Aspects of teaching descriptive geometry

Szilvásiné dr. Rozgonyi Erika

*Miskolci Egyetem, Matematika Intézet, Ábrázoló Geometria Tanszék
Miskolc-Egyetemváros, matre@uni-miskolc.hu*

Absztrakt: *A térbeli gondolkodás és a téri képességek, a térlátás a mindennapi élet számos területén nyújthat bárkinek segítséget. Különböző problémamegoldást igénylő szituációkban ezen készségek elengedhetetlenek lehetnek. Ebben a tanulmányban az ábrázoló geometria tantárgy oktatásának fontosságára szeretném felhívni a figyelmet, rávilágítani arra és kutatásokkal alátámasztani, hogy ez a képesség fejleszthető, igaz, különböző életkorban különböző szinten. Ezen készség fejlesztése és megfelelő szintre való hozása nélkül a felsőoktatásban mérnöki tanulmányokat folytató diákok nem tudnak időben megfelelő végzettséget szerezni, azaz számukra szükségszerű és nélkülözhetetlen.*

Kulcsszavak: *térszemlélet, ábrázoló geometria, térlátás*

Abstract: *Spatial thinking, spatial abilities and spatial vision can help anyone in multiple areas of everyday life. In different situations that require problem-solving, these skills may be essential. In this study, I would like to draw attention to the importance of teaching descriptive geometry as a subject, highlight, and proved based on research that it is possible to develop this ability at different ages, at different levels. Without developing this skill to a sufficient level, students pursuing engineering studies in higher education will not be able to obtain a suitable degree in time, making it necessary and indispensable to them.*

Keyword: *spatial approach, descriptive geometry, spatial vision*

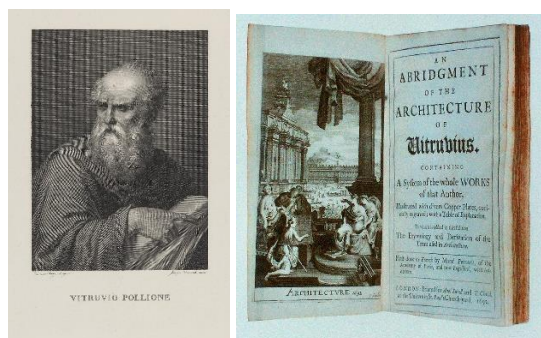
1. BEVEZETÉS

„Az ábrázoló geometria célja a térbeli alakzatok meghatározása alakra, nagyságra és helyzetre nézve síkban való ábrázolás által és ezen ábrázolás alapján a térbeli alakzatra vonatkozó feladatoknak rajzbeli megoldása” – olvashatjuk Strommer Gyula Ábrázoló geometria című könyvében [1].

A fent említett író az 1971-ben írt könyvének bevezetését azzal folytatja, hogy „az ábrázoló geometria tárgyánál fogva a mérnök nélkülözhetetlen segédtudománya; míg egyrésztől képessé teszi, hogy a szakjához tartozó s már meglevő tárgyakat, mint amilyenek az épületek, a gépek stb. a rajzra ábrázolja, másrésztől új tárgyak tervezésére vonatkozó munkálataiban segédeszközként szolgál.”

Ezt azóta sem tudnánk megfogalmazni pontosabban, és napjainkban is ugyanez igaz. Ami viszont megváltozott, az a középiskolából kikerülő diákok nagy részének erre a tantárgyra vonatkozó tudásszintje. Sajnos a tananyagok folyamatos változtatása, csökkentése, átváltoztatása azt hozta magával, hogy a gimnáziumok többségében az alapmatematikát tanuló osztályokban a szerkesztési feladatok száma lecsökkent, vagy néhol teljesen el is tűnt. A szakközépiskolákban, ahol tanulnak ábrázoló geometriát, ott természetesen nagyon sok szerkesztés van, hiszem géprajz, szakrajz tantárgyaik is vannak. Azok a középiskolai diákok is hátrányból indulnak egy olyan egyetemi képzésben, ahol tanulni kell ábrázolót, akik a középiskolában teljesen más szakirányon voltak, például informatikán, ügyvitelen, kereskedelmen stb., de most mégis például gépészmérnökként látják a jövőjüket.

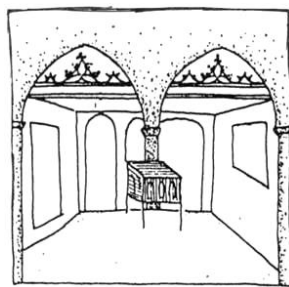
Ha egy kis történelmi áttekintést teszünk, akkor már a több ezer éve épült épületekről is megállapítható, hogy az építőkövek pontos összeillesztése pontos tervrajz nélkül elképzelhetetlen. Ezekről a tervrajzokról maradtak fenn írásos és kőbe faragott emlékeink is. Vitruvius római építész i. e.15 évvel írt könyvében már teljesen hasonló ábrázolási módszereket találunk, mint amit ma is használunk. A De Architectura libri decem című könyvét az építészetéről írta, és Augustus császárnak ajánlotta. A tíz kötetből álló mű az ókori építészet egyik alapját adta. Vitruvius vízvezetékét és hajítófegyvereket is tervezett, Olaszországban Fano kikötővárosában a bazilika tervezését is az ő nevéhez kötik.



1. ábra. Vitruvius és könyvének 1692-es angol kiadása
(forrás: https://hu.wikipedia.org/wiki/Marcus_Vitruvius_Pollio)

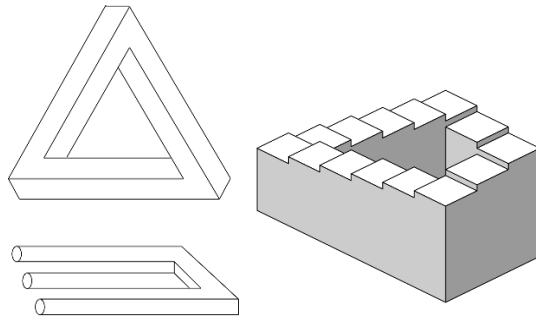
Az ábrázoló geometria története szorosan összefonódik az építészet, a képzőművészet, a technika és térképészet történelmével. Az ábrázoló geometria az euklideszi szerkesztéseken alapul, de manapság a kézzel végzett szerkesztések szerepe csökkent, helyét a számítógépes tervezés veszi át. Azt viszont látnunk kell, hogy a szoftverek mögött ott vannak azok az összefüggések, amelyek az ábrázoló geometria alapösszefüggései, és amelyeknek tudása nélkül nem lehet pontosan működő, szimulációs szerkesztőprogramokat írni. Ezen tantárgy a szakrajz, géprajz, műszaki rajz és egyéb fontos tantárgyak alapozó tárgyaként is tekinthető, hiszen ezen tárgyak alapja is az axonometrikus ábrázolás megértése, a térbeli alakzatok egyértelmű síkba rajzolása, majd ezen síkbeli képekből való egyértelmű rekonstrukció. A rekonstrukció kihangsúlyozása az egyik legfontosabb dolog, ugyanis ha a síkbeli képből nem egyértelmű módon tudjuk megállapítani a tárgy alakját, méreteit, helyzetét, akkor az a rajz nem jó. Ilyen kétértelmű ábrákat rengeteget találunk, akár a festészetben is, amelyek teljesen ellentmondanak a fizika törvényeinek. Ha csak a számítógépes programokra hagyatkozunk, akkor számtalan alkalommal azt tapasztalhatjuk, hogy az, amit látunk a gépen magunk előtt, a 3 dimenziós világunkban nem létező dolog. A mai mérnököknek ezért van szükségük ábrázoló geometriát tanulni, hogy észrevegyék azokat a dolgokat, problémákat, fizikai képtelenségeket, amelyeket csak jó térlátással, magas szintű térérzékeléssel veszünk észre.

Az egyik legkorábbi olyan alkotás, amely lehetetlen tárgyra utal, a holland, bredai Grote Kerk 1902-ben, egy restaurálás során felfedezett freskója. Az ismeretlen 15. századi festő az alábbi képen szereplő három oszlop közül a középsőt lehetetlen módon ábrázolta, azaz míg a két szélsőt az előtérben helyezkedik el, addig a középső a háttérben.

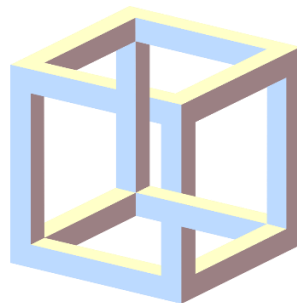


2. ábra Greute Kerk freskója
(forrás: wikipedia.org)

Oscar Reutersvärd svéd művész volt az első, aki már lehetetlen tárgyak tervezésével foglalkozott. Űgy is hívták: „a lehetetlen tárgyak atyja.” 1934-ben Oscar Reutersvärd rajzolta az úgynevezett Penrose-háromszöget, néhány évvel Penrose előtt, igaz, nem teljesen azonos a kettő, mert a háromszög oldalait kockákból állította össze. A Penrose-háromszög a leghíresebb és legegyszerűbb lehetetlen tárgy. Roger Penrose angol matematikus volt, aki, miután meghallgatta Escher holland grafikus egyik előadását, újra felfedezte a lehetetlen háromszöget, melyet 1958-ban publikált is a *British Journal of Psychology*-ban. Ebben a cikkben utal Escherre, aki felkeltette az érdeklődését ezen lehetetlen tárgyak iránt. Oscar Reutersvärdről, úgy tudjuk, egyikőjük sem tudott. Maurits Cornelis Escher 20. századi fametszeteiről és könyvmatairól elhíresült holland művész, többek között lehetetlen építményeket is ábrázolt, olyan geometriai formákat is rajzolt, amelyek fokozatosan teljesen más alakot öltenek. Egyik ilyen képe látható a 4. ábrán.



3. ábra. Penrose-háromszög, ördögvilla, Penrose által tervezett lépcső (forrás: wikipedia.org)

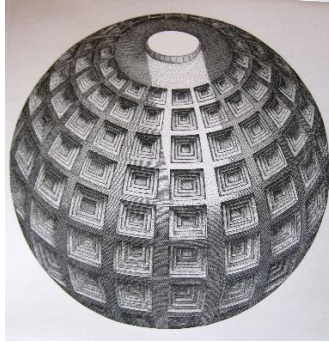


4. ábra. Maurits Cornelis Escher: Hyzer-illúzió (forrás: wikipedia.org)

Ha a mai korból szeretnénk olyan embereket tekinteni, akik lehetetlen ábrák rajzolásával ma is foglalkoznak, akkor itt van például Orosz István (művésznevén: Utisz) a Nemzet Művésze címmel kitüntetett író, Kossuth-díjas grafikusművész, animációsfilm-rendező, aki a Magyar Iparművészeti Főiskola Grafika Tanszékén szerzett diplomát, és az alkalmazott grafikával pályája kezdete óta foglalkozik. Tagja az Alliance Graphique Internationale-nek és mindkét magyarországi művészeti akadémiának. 2005-ben ő alapította meg a Nyugat-magyarországi Egyetem Művészeti Intézetének grafika tanszakát. Szépirodalommal is foglalkozik, verseket, esszéket és prózákat is ír.



5. ábra. Orosz István (Utisz) sarokházgrafikája, amely egy optikai csalódás, egy illúzió (forrás: wikipedia.org)



6. ábra. Orosz István: A gömb (Panthéon-parafrázis)
(forrás: <https://www.kollergaleria.hu>)

2. AZ ÁBRÁZOLÓ GEOMETRIÁRA IRÁNYULÓ KUTATÁSOK

Az érzékszerveinkre vonatkozó kutatásokból kiderül, hogy a látás 75%-ban, a hallás 13%-ban, a tapintás 6%-ban, a szaglás 3%-ban, az ízlelés 3%-ban vesz részt az egyénnél egy adott probléma megértésében, a diákoknál a tanulásban. Több publikációban arról olvashatunk, hogy minél több érzékszervünket használjuk a probléma megértésére, a tanulás annál eredményesebb lesz.

1970-es években Ramirez Witkin kutatásait figyelembe véve megállapítható, hogy összefüggések vannak az egyén motivációs folyamatai és a saját környezete felé fordulás között. Mindenki más típusba sorolható abból a szempontból, hogy ki hogyan fogadja be az adott az információt, kinél milyen érzékszervi modalitás kerül előtérbe. Ezek szerint megkülönböztethetünk auditív, vizuális vagy kinezetikus típusú embereket. Van, akinek mihelyst elmondunk egy adott problémát, azonnal társít hozzá egy képet, míg másvalakinél le kell rajzolni a feladatot, hogy megértse azt.

Ezek után tegyük fel a kérdést magunkban: Hogyan tudnánk számítógéppel alakzatokat tervezni azon képességek nélkül, hogy pontosan el ne képzelnénk, papírra le ne rajzolnánk, vázlatot nem készítenénk a tervezendő alakzatról? Ez pedig a megfelelő szintű térlátás nélkül lehetetlen. A térlátás viszont mindenkinél kialakul már csecsemőkorában, de a megfelelő szintre fejlesztés például az ábrázológeometria-feladatokkal nagymértékben fejleszhető.

Tudományos kutatások támaszthatják alá, hogy az agyban születéskor nincs meg a térlátás képessége, az akkor fejlődik ki, amikor a csecsemők folyamatosan megtanulják érzékelni saját környezetük mélységeit a különböző vizuális, kívülről jövő ingerek során. Kovács Ilona, aki a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem kutatója, a munkatársaival közösen kereste a válaszokat a térlátás kifejlődésére a csecsemőknél. A kutatás lényege, hogy harminc csecsemő térlátási képességeit tesztelték folyamatosan a koponyájukra erősített elektródák segítségével, miközben a babák tévéképernyőn különböző mintákat nézegethettek. Az agysejtek elektromos töltésének folyamatosan mértésével dokumentálták az eredményeket, és azt figyelték, hogy a retina és az agyban lévő látóideg egészséges-e, mivel az egyik csak akkor tud megfelelően működni, ha a két szemmel való látás már teljesen kifejlődött. A legelső vizsgálatokat a babák megszületése utáni 11–12. hetben végezték el, majd ezt havonta megismételték. Ezt a vizsgálatot akkor fejezték be, amikor már bizonyíthatóan kifejlődött a térlátás, amelynek ideje átlagosan 3,78 hónap után következett be [2].

Az egyetemista diákok körében is számos kutatást találunk a térszemlélet fejlesztésének vonatkozásában. Ezek közül egy például a 2015-ben megjelent Új kutatások a neveléstudományokban című tanulmány, amit az MTA Pedagógiai Tudományos Bizottsága és az Óbudai Egyetem adott ki, és amelyben a térszemlélet fejlesztésére irányuló eredmények jelentek meg [3]. Ebben a közleményben arról is szó esik, hogy számos tanulmány erősíti meg azt az elképzelést, mely szerint a képalkotási folyamatoknak a pontos mentális képzetek létrehozásában döntő jelentősége van [4] [5].

Több külföldi és magyar vizsgálat is kimutatta, köztük például a Michigan Egyetem oktatója, Sheryl A. Shorby azt találta, hogy az egyetemista korosztály, vagyis a 18–23 éves diákok körében a térszemlélet csak lassú ütemben fejleszhető képesség, és azon tanulóknak, akik nem szereznek diplomát, a sikertelenség hátterében sok esetben a téri kompetenciák hiánya áll [6]. Több fél éves kézi rajztechnikai oktatás eredményeként látja javulni a térszemléletet, a térbeli készségeket. Ő a saját egyetemén is azt látja, hogy ahogy változtattak a tanterveken, folyamatosan háttérbe került a kézi rajzolás, és előrébb került a számítógépes tervezőprogramok megismerése, elsajátítása, pedig ezt a folyamatot nem szabad felborítani, mert pont az ellenkezőjét érjük el vele. A végzett mérnökök egy részének felületes lehet így a mérnöki tudása, a rajzképessége, majd a diploma megszerzésének időpontja kitolódik, nehezebbé válik. Sorby ezen cikkében megkísérli megválaszolni a térbeli készségek kutatásával kapcsolatban lévő háttér-információkra vonatkozó számos kérdést, és leírja azokat a stratégiákat, amelyekkel a grafikát oktatók ezt a képességet továbbfejleszhetik diákjaikban.

A térszemlélet képességének fejleszthetőségére több kutatás is irányult és irányul napjainkban is. A programok eredményességét elsősorban a térszemlélet STEM (science, technology, engineering, mathematics) területére gyakorolt hatásával összefüggésben tanulmányozták [7]. A cikkükben arról írnak, hogy a térbeli készségek erősen megjósolják, ki fog belépni a STEM-területekre. De miért igaz ez? Azt állítják, hogy ezen készségek átjáróként vagy akadályként szolgálnak a STEM-területekbe való belépés előtt. Kutatásuk segít meghatározni, hogy a térbeli képességek mikor és hogyan számítanak (vagy nem) a STEM-gondolkodásban és a tanulásban. Arra a következtetésre jutnak, hogy azon diákoknak, akiknek ezen képességük alacsony szinten van, egy tréning, felzárkóztató kurzus az egyetem megkezdése előtt segíthet bejutni a STEAM-területek valamelyikére.

Hogy visszatérjünk egy kicsit a hazai kutatásokhoz, mindenképp említésre méltó Bölcskei Attila 2016-os habilitációs értekezése, amelyben több teszt alapján kialakuló következtetést tárgyalja az ábrázoló geometria módszertanának szempontjából [8]. Oktató kollégáival számos, a térlátás képességének fejlesztésére irányuló kutatást végeztek [9]. Az értekezésben lévő vizsgálatokat a Ljubljana Egyetemen együttműködve készítették el. A habilitációs dolgozatában olvasható a következő tézis is:

„Az ábrázoló geometriai tanulmányok az MRT teszt által mérhető módon erőteljesen javítják a hallgatók térszemléletét, hiszen mind az átlageredmény, mind a javulást mutató hallgatók aránya nagyban növekszik.”

Ebben a közleményben olvashatunk arról is, ami szerintem is teljes mértékben megalapozott, és igaz, hogy a jó mérnöki munka háttérében ott van az a kompetencia, a térlátás, a tér imaginációja, tökéletes érzékelése, melynek fejlesztésében a felsőoktatásban az ábrázoló geometria tanítása nyújthat nagy segítséget.

Az általános iskolákban való fejlesztésekkel kapcsolatban 2020-ban jelent meg Beták Norbert és Szabó Tibor a Nitrai Egyetem két oktatója által írt közlemény. [10] Ebben a Lego építőjáték és annak digitális változatát alkalmazták a kísérletükben szereplő gyerekek térszemléletének fejlesztésére. Ezen tanulmányban a szerzők részletesen ismertetik a fejlesztő tevékenységük egyes fázisait, mely a digitális és valós térben egyaránt megvalósult, és játékos módon, de a mérnöki munka felé irányítja a felmérésben szereplő tanulókat. Külön kitérnek dolgozatukban a Lego Digital Designer alkalmazásra, amely a virtuális környezetet biztosította a térszemlélet fejlesztésben részt vevő gyermekeknek. Továbbá a foglalkozások során különböző típusú és formájú Lego építőelemeket használtak fel, melyek az elkészített szerkezetek alapelemeiként szolgáltak.



7. ábra. Lego Digital Designer használat közben (forrás: [10])

A kutatásban részt vevők tapasztalatai szerint a komplex, problémamegoldást feltételező feladatok felkeltették a részt vevő gyermekek érdeklődését. Érdekes lenne ezen eredményeket összevetni esetlegesen egyetemista résztvevők esetén.

Bábalý és Kárpáti [11] 2015-ben megjelent cikkükben öt tevékenységtípust nevezett meg, melyek a leghatékonyabban fejleszthetik a térszemléletet, mégpedig:

- építőjátékok használata gyermekkorban,
- kézműve-foglalkozások és barkácsolás,
- 3D-s számítógépes játékok,
- sportolás,
- matematikai képességek fejlesztése.

A konstrukciós játékok térszemlélet-fejlesztő hatása több kutatással is alátámasztható.

3. KONKLÚZIÓ

A téri képességek, térlátásra vonatkozó kutatások régre visszanyúlnak, és nagyon sok tartalmas és számos aspektusból vizsgált területről beszélünk. Van, aki a biológia felől, van, aki módszertanilag közelíti meg ezt a kérdéskört. A téri képességek fejlesztésére is nagyon sok és sokféle eszközt fejlesztettek ki. Egyik, a napjainkban talán legmodernebb és az egyetemisták körében nagyon kedvelt, általunk is használt módszer a háromdimenziós modellezés. A Miskolci Egyetem Ábrázoló Geometria Tanszékén tartott előadásaimon, gyakorlatokon és a felzárkóztató órák alatt is minden probléma felvetése után háromdimenziós nyomtatóval kinyomtatott testeken is

megnézzük a feladatot a könnyebb megértés és elképzelés érdekében. Az interaktív virtuális valóság modellezése is folyamatban van, amivel a felhasználó személy a háromdimenziós alakzatokat mozgathatja, forgathatja, megnézheti különböző helyzetekből, ezzel elősegítve a téri képességek fejlesztését. Összefoglalóan elmondható, ahhoz, hogy mérnökeink minél magasabb szintű téri készségekkel rendelkezzenek, ezen eszközök használata nagyban hozzásegíti őket, és ez az eredményeiken egyértelműen mutatkozik. Az elmúlt időszakban az online oktatás alatt a diákjainkat rövid videókkal segítettem, amelyeknek előnye, hogy bármikor megnézhetők, bárhányszor visszanezézhetők, és egy feladatot sokszor, többféleképpen megszerkesztve is fejleszthették tudásukat. Ezek a videók mégsem voltak annyira eredményesek, mint a jelenléti oktatásban való szemléltetések. Többen hiányolták a háromdimenziós alakzatokat, amit csak kamerán keresztül láthattak, nem foghatták kézbe. Néhány diák a videóban szereplő szerkesztések többszöri megnézése után is a közvetlen kérdésfeltevést, válaszadást tartotta volna célravezetőnek. Ezen tantárgy oktatásánál is megfigyelhető, hogy szükségszerű, mondhatni elengedhetetlen a feladat megértéséhez a szemléltetés, a testek érzékelése vagy közvetlenül vagy a virtuális valóság segítségével. Ezen tantárgy oktatásával pedig nagyban hozzásegíthetjük diákjainkat az időben megszerzett diplomához és a mindennapi életben is sokszor használt térlátás képességének fejlesztéséhez.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Strommer Gy.: Ábrázoló geometria, Tankönyvkiadó, 1974
- [2] Jando, G ; Miko-Barath, E ; Marko, K ; Hollody, K ; Torok, B ; Kovacs, I: Early-onset binocularity in preterm infants reveals experience-dependent visual development in humans., Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 109 : 27 pp. 11049-11052. , 4 p., 2012
- [3] Kozma T., Perjés I.: Új kutatások a neveléstudományokban 2015, MTA Pedagógiai Tudományos Bizottsága, Óbudai Egyetem, Elte Eötvös Kiadó, 2016
- [4] McKim, R. H. : Experiences in visual thinking. MA: PWS Publishers, Boston, 1980
- [5] Mohler, J. L. és Miller, C. L. : Improving spatial ability with mentored sketching. Engineering, Design Graphics Journal, 72. 1. sz. 19–27., 2009
- [6] Sorby, S. A.: Developing 3-D spatial visualization skills. Engineering Design Graphics Journal, 63. 2. sz. 21–32., 2009
- [7] Uttal, D. H. és Cohen, C. A.: Spatial thinking and STEM education: When, why and how. Psychology of learning and motivation, 57. 147–181., 2012
- [8] Bölcskei A.: A térábrázolás néhány módszertani, matematikai és építészeti vonatkozásáról, Pécsi Tudományegyetem, habilitációs értekezés, 2016
- [9] Bölcskei A., Kovács A. Zs. és Kusar D. : New ideas in scoring the Mental Rotation Test. Ybl Journal of Built Environment, 1. 1. sz. 59–69., 2013
- [10] Beták N. és Szabó T.: Térsemlélet-fejlesztést segítő foglalkozások Lego eszközök segítségével. OXIPO – Interdiszciplináris tudományos folyóirat, 2020/4, 71-81. doi: 10.35405/OXIPO.2020.4.71
- [11] Babály, B. és Kárpáti, A. : A téri képességek vizsgálata papír alapú és online tesztekkel. Magyar Pedagógia, 115. (2.) pp. 67–92. doi 10.17670/MPed.2015.2.67, 2015

MŰSZAKI MENEDZSMENT SZEKCIÓ

Javaslatok a lakott területi fakivágás jogszabályi háttérének módosításához

Proposals to amend the legal framework for the felling of trees in inhabited areas

Dr. Zákányi Balázs^{1*} – Bereczky Attila² – Dr. Zákányiné dr. Mészáros Renáta³

¹ Miskolci Egyetem, Környezetgazdálkodási Intézet, 3515, Miskolc Egyetemváros, hgzb@uni-miskolc

² Egyéni vállalkozó, 3717, Alsódobsza, Rákóczi utca 69.

³ Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, 3515, Miskolc Egyetemváros

Összefoglaló: Több mint 30 évvel ezelőtt született meg a 15/1989. (X. 8.) MÉM-rendelet az Erdészeti Biztonsági Szabályzat kiadásáról (továbbiakban EBSZ). Ez a munkavédelemről szóló – a 64/1980. (XII. 29.) MT, a 18/1984. (III. 31.) MT, a 12/1985. (III. 14.) MT, a 4/1987. (II. 9.) MT és a 63/1989. (VI. 30.) MT-rendelettel módosított – 47/1979. (XI. 30.) MT-rendeletben foglalt felhatalmazás alapján – az érdekelt miniszterekkel, az Országos Munkavédelmi és Munkaügyi Főfelügyelőség vezetőjével, a Termelőszövetkezetek Országos Tanácsával, valamint az érdekelt ágazati szakszervezetekkel egyetértésben jött létre. E rendelet elsősorban az erdőben végzett fakitermelésre vonatkozik, és csupán egy fejezete tárgyalja a lakott területi fakitermelést, mely jelenleg vizsgáláshoz kötött tevékenység.

Sok év telt el azóta, de a szabályzat csak kisebb módosításokon esett át. Munkánk célja az EBSZ kiegészítése, javaslattétel, illetve figyelemfelhívás balesetmegelőzési szempontból, ugyanis ha a jelenlegi szabályokat betartva dolgozunk, az vagy teljesen ellehetetleníti a munkavégzést, vagy pedig súlyos balesetekhez vezethet.

Kulcsszavak: lakott terület, fakivágás, jogszabály módosítása

Abstract: More than 30 years ago, Decree 15/1989 (X. 8.) on the issue of the Forest Safety Regulations (hereinafter referred to as the "OSR") was issued. This is the result of the amendments to the Labour Safety Regulations - MT 64/1980 (XII. 29.), MT 18/1984 (III. 31.), MT 12/1985 (III. 14.), MT 4/1987 (II. 9.) and MT 63/1989 (VI. 30. MT, as amended by Decree No 47/1979 (XI. 30.) MT, was established in consultation with the ministers concerned, the Head of the National Labour Inspectorate, the National Council of Producers' Cooperatives and the trade unions concerned. This regulation mainly concerns logging in forests and only one chapter deals with logging in inhabited areas, which is currently an activity subject to an examination.

Many years have passed since then, but only minor amendments have been made. The aim of our work is to supplement the EWC, to make suggestions and to draw attention to the need to prevent accidents, because working without complying with the current rules can either make it impossible to work or can lead to serious accidents.

Keywords: inhabited area, tree felling, amendment of legislation

1. BEVEZETÉS

Jelenleg a 15/1989. (X. 8.) MÉM-rendelet az Erdészeti Biztonsági Szabályzat kiadásáról (továbbiakban EBSZ) [1] foglalkozik egyedül a fakivágással (erdészeti és lakott területi). Más szabály jelenleg nem vonatkozik a lakott területi fakitermelésre, pedig 1989 régen volt. A rendszerváltás óta sok minden változott rohamosan fejlődő világunkban. Nem kell nagy dolgokra gondolni, elég csak például a telefonra. Elképzelhetetlen dolog volt a jelenlegi okostelefon, ha valahová telefonálni akartunk, el kellett menni a posta melletti fülkébe, ahol hosszas kurglizás után a telefonközpontos kapcsolt össze a távoli rokonokkal. Ekkor íródott az EBSZ, és azóta rengeteg minden változott a munkavédelmi felszereléseken, egyéni védőeszközökön, szerszámokon keresztül szinte minden. Elképzelhetetlen volt a mai könnyű gyorscsatos, tépőzáras, karbon műszálas mászóvasak elérése, hiszen nem is léteztek még Amerikában sem. Akinek volt valamilyen mászóeszköze, az már nagy szám volt, mindenki csináltatta valamilyen séma alapján egy-egy kovácműhelyben. Ezek rendkívül nehéz és kényelmetlen eszközök voltak. Szintén nem voltak korszerűek a többpontos bekötőhevederek. Aki biztosította magát, az szerzett az áramszolgáltatók ismerőstől egy rendkívül nehéz, kenderköteles, nem vagy nehezen pozícionálható derékövet.

A szabályzat is ezekhez az akkoriban elérhető eszközökhöz íródott, mint például a kötélletra, amely már teljesen kiment a forgalomból, sőt munkavédelmi szempontból nem megengedett a használata.

Sok év telt el azóta, s bár kisebb módosításokon átesett, de maradt a szabályzat. Munkánk célja ennek kiegészítése, a javaslattétel, esetleg a megfelelő helyre eljuttatva a figyelemfelhívás. Figyelemfelhívás balesetmegelőzési szempontból, ugyanis, ha a jelenlegi szabályokat betartva dolgozunk, az vagy teljesen ellehetetleníti a munkavégzést, vagy pedig súlyos balesetekhez vezethet.

2. AZ ERDÉSZETI BIZTONSÁGI SZABÁLYZAT ÁTTEKINTÉSE, ÉSZREVÉTELEK, JAVASLATOK

Több mint két évtized tapasztalata és a begyűjtött információk alapján szakmai körökben is köztudott, hogy a jelenleg érvényben lévő Erdészeti Biztonsági Szabályzat lakott területi fakitermelésre vonatkozó része elavult, nem halad a kor elvárásaival, a modern eszközök használatának lehetőségeit nem ismerteti. Jelenleg ez az egyetlen törvényi szabályozás, melyet tudnia kell egy lakott területi fakitermelőnek. A saját és a szakmában dolgozó kollégák meglátása szerint ez az ismeretanyag nagyon kevés, sőt egyes fejezetek betartása, alkalmazása veszélyforrás is lehet.

A következőkben az elmúlt években szerzett tapasztalatok alapján javaslatokat teszünk az Erdészeti Biztonsági Szabályzat módosításához, újragondolásához. Az átláthatóság érdekében az EBSZ jelenleg is érvényben lévő fejezeteit dőlt betűvel, megjegyzéseinket normál, álló betűtípussal írjuk le, a végén pedig javaslatokat teszünk arra, hogy melyek azok a fejezetek, amelyekkel szükséges lenne kiegészíteni az amúgy is kevés terjedelemmel rendelkező szabályzatot.

Az Erdészeti Biztonsági Szabályzat 5 fejezetből áll, melynek tartalma a következő:

1. Általános előírások;
2. Az erdőművelési munkákra vonatkozó biztonsági előírások;
3. Erdőben és egyéb lakott területen kívül végzett fakitermelési munkákra vonatkozó biztonsági előírások;
4. Lakott területen végzett fakitermelési munkákra vonatkozó biztonsági előírások;
5. Az erdészeti faanyagmozgatásra és készletezésre vonatkozó biztonsági előírások.

Bár ugyanolyan régen íródott, és a többi fejezeteknek is vannak hiányosságai, munkánkban kizárólag a lakott területen végzett fakitermelési munkákra vonatkozó biztonsági előírásokat részletezzük.

Erdészeti Biztonsági Szabályzat 4. számú fejezete: Lakott területen végzett fakitermelési munkákra vonatkozó biztonsági előírások

„Fakitermelést lakott területen 1991. január 1-jétől csak olyan, legalább 2 éves szakmai gyakorlattal rendelkező fakitermelő szakmunkás végezhet, aki hatósági vizsgabizottság előtt eredményes vizsgát tett a „fakitermelés lakott területen” tanfolyam tananyagából. Ezt a képesítést be kell vezetni a mezőgazdasági és erdészeti gépkezelői jogosítványba.”

A rendelet értelmezése szerint a fakitermelő vizsga megléte után 2 évvel a „fakitermelés lakott területen” tananyagból levizsgázottak közül bárki végezhet fakitermelést lakott területen, további tanfolyam, ismeretanyag nem szükséges, sőt a szakmai gyakorlat bizonyítása sem szükséges, elég 2 évet „várni” például szakácsként, vagy otthon munkanélküliként ülve egyaránt.

Elengedhetetlen feltétel lenne a valóban 2 év motorfűrész munkában végzett szakmai gyakorlat meglétének igazolása. Rengeteg ember rendelkezik motorfűrész-kezelői vagy fakitermelői képesítéssel, és sajnos több mint fele még a fűrész se tudja kezelni rendesen. Sajnos ez is kijátszható, mivel bármelyik cégtől beszerezhető egy ilyen dokumentum.

Lakott területi fakitermelés során az esetek többségében kötéltechnikával dolgozunk, vagy mozgó munkaállványról. Mindenképpen szükséges lenne egy olyan kiegészítés, mely előírja a kötéltechnika teljes körű ismeretét, tehát a dolgozónak szükséges legyen ipari alpinista vagy a faápolás kötéltechnikája tanfolyam elvégzése is.

Mivel egyes esetekben szorosan kapcsolódik a faápoláshoz és a favágáshoz, gallyazásokhoz a mozgó munkaállvány használata, aki innen dolgozik, annak kötelező legyen az adott gépkategóriához tartozó emelőgép-kezelői jogosítvány megléte. Jelenleg jogilag elegendő annak, aki „kezeli” a gépet, vagyis egy főnek, aki ott van.

4.1. Nem kell lakott területi fakitermelésnek tekinteni a szolgáltató vállalat dolgozói által a közüzemi szolgáltató vezetékek (pl. az erősáramú és távközlő szabadvezetékek) őrsvényének a – fák gallyazásával járó – karbantartását.

Ezeknek a munkáknak az elvégzésére is kötelezővé tennék mind a lakott területi fakitermelői, mind pedig a mozgó munkaállvány-kezelői képesítést. Ezenkívül faápoló-végzettséghez is kötnénk, vagy pedig faápoló vagy faápoló szakmérnök felügyeletét kellene biztosítani a munkálatokhoz. Sajnos az ilyen munkák végzésekor kizárólag az őrsvények által előírt védőtávolságokat nézik, nem pedig a fa egészségi, esztétikai értékeinek megfelelő állapotot. Szinte kizárólag mozgó munkaállványból végezhető a feladat, kötéltechnikával értelmetlen munkaerő- és energiapazarlás.

*4.2. * Álló fák gallyazását és ledarabolását közvetlenül a fáról vagy létráról csak 18 évnél idősebb és 50 évnél fiatalabb olyan férfiak végezhetnek, akik az előzetes és időszakos alkalmassági orvosi vizsgálaton a magasban végezhető munkára alkalmasnak bizonyultak.*

A szabályzat értelmezése szerint 50 évnél idősebb férfi nem végezhet munkát. Akkor mit dolgozzon az, aki mindenét ebbe ölte bele, ebből él, tehát ha befejezi vállalkozását, hova menjen dolgozni? Abban az esetben, ha szabályzatba iktatják a korhatárt, ennek megfelelően az ilyen munkát végzőknél fizikai felülvizsgálat alapján döntsenek vagy korlátozzanak.

Továbbá, ha egy nőnek szabad ipari alpin és fakitermelői munkát végeznie egyaránt, akkor a kettő együtt miért ne lehetne? Az előzetes és időszakos orvosi vizsgálat elengedhetetlen. Az Erdészeti Biztonsági Szabályzat több pontjában is utalnak arra, hogy bizonyos munkafolyamatokat férfiak végezhetnek. Érdemes lenne ezt is felülvizsgálni, hiszen fakitermelői, és lakott területi fakitermelői vizsgát nőneműek is egyaránt tehetnek.

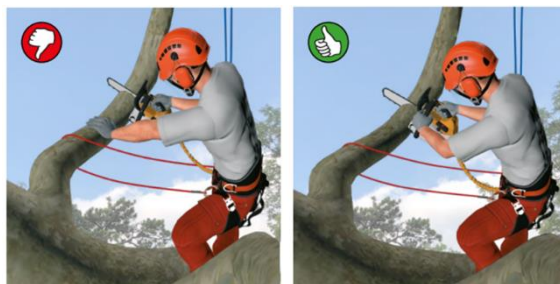
4.3. Az álló fák gallyazását és ledarabolását vegetációs időn kívül, lombhullás után szabad végezni. Kivételt képeznek azok az esetek, amikor a nyári zivatar okozta sérülések az élet- és vagyónbiztonság miatt a vegetációs időn belüli munkát szükségessé teszik. A fenyőket vegetációs időn belül is fel lehet gallyazni és le lehet darabolni.

Kiegészítésként javasoljuk, hogy fokozott figyelemmel legyünk költési időszakban a fán fészkelő védett és fokozottan védett madarakra, vegetációs időn kívül pedig az odulakó denevérekre. Az ezekkel való találkozás esetén értesítsük a helyileg illetékes Nemzeti Park igazgatóságát vagy az állatmentéssel foglalkozó civil szervezeteket! Jó, ha a favágó, faápoló legalább alapszinten tisztában van a védett vagy nem védett állatfajokkal. Már az is értékelhető eredmény, ha nem hagyja magára, hanem telefonos segítséget kér [2].

4.4. * A fa koronájában gallyazás és darabolás kizárólag kézi fűrészszel vagy ún. egykezes motorfűrészszel végezhető. Motoros fűrészszel a fától független állásról (pl. hidraulikus mozgó munkaállványból) szabad gallyazási, darabolási munkát végezni.

Amennyiben kivitelezhető, munkavédelmi szempontból megfelelő a szabályozás, hiszen mozgó munkaállványból a legbiztonságosabb a fa ledarabolása. Ellenben rengeteg eset van, amikor nem tudunk a fától független állásról dolgozni, mert a fa annyira beépített területen áll, hogy a munkagéppel nem lehet megközelíteni. Ezenkívül rengeteg nagy méretű fa van, amelyek oldalágainak eltávolításához a piacon kapható legnagyobb fűrész az alkalmas, ezeknek kézi fűrészszel vagy kis teljesítményű fűrészszel való ledarabolása lehetetlen. A faápoló fűrészeknek az „egykezes motorfűrész” megnevezése is hibás. Hiába olyan a kialakítása, hogy egy kézzel is kezelhető, de így rendkívül balesetveszélyes, ha csak lehet, kerüljük az egy kézzel való fűrészszelést, azt szabályosan két kézzel kell tartani (1. ábra).

A munkavégzés megkezdése előtt stabil munkahelyzetet kell felvennünk, ez egyértelmű kommunikáció az egész csapatnak (vizuális és akusztikus). A vágás megkezdése előtt a fán dolgozó ellenőrizze a szabadesési területet. A láncfűrésznek meg kell felelnie a biztonsági előírásoknak, és tökéletesen működőképes állapotban kell lennie. Az indítási folyamat csak aktivált láncfékkel történhet, a láncfék csak vágás előtt oldható ki, közvetlenül utána újra be kell húzni.



1. ábra: A faápoló fűrész helytelen és biztonságos használata [3]

4.5. * A koronába való feljutáshoz csak teljesen ép kötélletra használható. Ezek műszaki állapotát, a legalább 225 kg terhelhetőséget minden új munkahelyen a szállítást követően ellenőrizni kell. Az ellenőrzésről naplót kell vezetni. A sérült és a követelményeket más okból ki nem elégítő felszerelést a munkából ki kell iktatni. A koronába való feljutás történhet biztonsági öv* és mászóvas* együttes alkalmazásával.

Kötélletra gyakorlatilag a kereskedelmi forgalomban nem is kapható, ha mégis beszerezhető, az biztos nem felel meg a munkavédelmi előírásoknak. Használata rendkívül veszélyes, hiszen ha elszakad, a kötélletrán közlekedőt semmi se biztosítja. A 225 kg terhelhetőség kevés, jelenleg az alpintechnikában is használt kötelek terhelhetősége minimum 15 kN, ami kilogrammra vetítve 1500 kg! Ennél a pontnál kellene alkalmazni a 11/2003. (IX. 12.) FMM-rendelet az ipari alpintechnikai tevékenység biztonsági szabályzatáról, a 12. § szerint felsorolt, alpintechnika során alkalmazott felszerelések és egyéni védőeszközök használatára vonatkozó követelményeket és eszközöket. Az utóbbi években kimondottan faápoláshoz készült ereszkedő-beülő eszközök, hevederek, karabinerek jelentek meg az ipari alpintechnikai eszközöket forgalmazó cégek piaci kínálatában.

Összegezve a koronába való feljutáshoz – a jelenleg elérhető eszközöket figyelembe véve – nem szabad megengedni a kötélletra alkalmazását. A „biztonsági öv” megnevezést az ipari alpintechnikailag bevizsgált, 3 pontos testhevederre használhatjuk. A munkavégzés drótköteles munkahelyzet-pozicionálással és bevizsgált mászóvassal történjen! Amennyiben nem a fa kivágása, hanem a fa gallyazása vagy ápolása történik, a mászóvas használata kerülendő, hiszen a fában felületi sérüléseket és fertőzéseket okozhat. Létra megfelelő rögzítéssel használható a fa lombkoronájába való feljutáshoz.

4.6. A felszerelések ellenőrzéséért felelős személyt, az ellenőrzés módját, gyakoriságát, eszközönkénti bontásban a munkáltatói előírásokban kell meghatározni.

Ezzel a bekezdéssel nincs kifogás, az ipari alpinmunkákban használatos egyéni védőeszközök, kötelek, karabinerek időszakos kötelező vizsgálatát kell szem előtt tartani. Az ide vonatkozó szabványok ismertetése és tanulmányozása elengedhetetlen. Ezeket a szabályzat végén fel kell sorolni.

4.7. Az egyágú létra alsó szárait elcsúszás ellen hegyes vassarúval, felső végeit pedig kapaszkodó vaskampókkal, a fa ágára, illetve törzsére csatolható szíjjal vagy hevederrel kell ellátni.

4.8. A létrát csak ág- és ágcsontmentes törzsrésznek szabad támasztani.

4.9. Az egyágú létra kikötésének megtörténteig legalább egy főnek kell a létrát alul biztosítania eldőlés és elcsúszás ellen.

A létra felállítását követően győződjünk meg a megfelelő beállításról és a mérési szög állapotáról (65–75)!

A legtöbb baleset a létráról való munkavégzés közben szokott történni. Rengeteg ilyen videó található a közösségi médiacsatornákon az interneten. Egyik klasszikus példa, amikor az ág levágásakor az ágvég hamarabb ér le, majd visszacsapódik – általában a létrának –, a létra kisodródik a munkavégző alól, vagy azzal együtt eldőli.

A másik leggyakoribb baleset, amikor oldalágnak támasztva történik a munkavégzés. Az ágvéget levágjuk, ezáltal a megmaradt ág megkönnyebbül, ami által több 10 cm-t vagy akár 0,5-1 métert is megemelkedhet. Emiatt a támaszték megszűnik, a létra eldőli.

Rendkívül veszélyes tehát a létráról történő munkavégzés. Véleményünk szerint csak a lombkoronába való feljutás segítésére engedélyezhető. Cserje vagy egyéb tujasor tetejéhez a könnyen összeszerelhető mobil állványt javasoljuk, ellentétben a létrával. Természetesen, ha az adottságok megengedik, mindenképpen a mozgó munkaállványból való munkavégzés a legmegfelelőbb.

4.10. A munkát végző csak akkor léphet a fa ágaira, ha azok teherbíró képességéről előbb meggyőződött. Száraz, korhadt ágakra ne lépünk rá, azokat le kell vágni, nem pedig támasztéknak meghagyni.

A munkát végzőnek a felmászás előtt a biztonsági övhöz, felérkezés után pedig az arra alkalmas ághoz kell a szerszámaikat csatolni.

A testhevederhez rögzíthető külön fűrész vagy szerszámtartó már régóta forgalomban van. Kiegészítésként szükséges lenne olyan szerszámtartó hevederre, amely egy bizonyos terhelés hatására kiold. Sok esetben előfordul, ha a fűrész nem húzzuk ki a döntővágás után a fából, akkor beragad a hajkalapba.

4.11. Nem szabad a fa alatt tartózkodni, ha a koronában a munka elkezdődött.

Fokozott elővigyázatossággal kizárólag a munkát végzők tartózkodhatnak a fa környezetében. Amennyiben a gallyak és a törzs darabolása kötél biztosítása nélkül történik, a fa alatt senki sem tartózkodhat! Figyelembe kell venni, különösen a törzsnél és egyéb tuskórészeknél a pattanás veszélyét, ha az a fán pattan meg, akár több méterre is eltérhet a röppályától.

Ugyanez érvényes a lezuhanó farönkre is, megpattanhat a kemény földön, gyökéren, betonon egyaránt. Ha kivitelezhető, minden esetben ágyazzunk be a fa alá a levágott gallyakból. A munkakötelet kezelő úgy helyezkedjen el, hogy minden alkalommal számolja bele a megfogott fa röppályáját, amennyiben a munkakötél elszakadna, vagy a hevederből kiesne.

Minden esetben győződjön meg a biztosító ember is, és a lombkoronában munkát végző arról, hogy a kötéllal biztosított fatörzs vagy ág valóban be van kötve. Erről egymásnak egyértelmű jelzéseket szükséges adni minden vágás előtt. A munkát végző személyeken kívül a fa környezetében (fa magasságának megegyező sugarú körben) más nem tartózkodhat.

4.12. Álló fa gallyazását és ledarabolását csak a biztonságos munkavégzést lehetővé tevő időjárási és megvilágítási viszonyok között szabad végezni: a megvilágítás mértéke és a köd nem akadályozza a munkába vett fa csúcsáig – a részleteket is jól kivehető – látást; a fa törzse és ágai csapadék (eső, ónos eső, hó) és a zúzmara miatt nem síkosak; a hőmérséklet -3 °C -nál magasabb; szélcsend van; villámlással járó zivatar nincs.

A munkavégzést nehezítő tényezők közül megkülönböztetünk biotikus, abiotikus és klimatikus tényezőket.

Abiotikus tényezők:

- Zaj: forgalmas utakon autók;
- Gépzaj (kotrógépek, munkagépek stb.);
- Mindezek a kommunikációt nehezítik meg a csapatban;
- Villamos vezetékek, légvezetékek, épületek.

Biotikus tényezők:

- Az egészségre veszélyes allergén növények;
- Érintésre súlyos égési sérüléseket, hólyagokat, csipéseket okozó növények;
- Erős mérgű rovarok, darazsak;
- Hüllők: többségük ártalmatlan és nem mérgező a harapásuk, de a fákon megtelepedhetnek félelmet okozva.

Klimatikus tényezők:

- Hő: kiszáradás, összeomlás;
- Ózon;
- Hideg;
- Nedvesség, pára, köd;
- Szél;
- Zivatarok.

4.13. A fa koronájában egy időben csak egy fő dolgozhat.

Bár vannak olyan esetek, amikor a fa mérete lehetővé tenné, hogy akár több fő is dolgozzon rajta, biztonsági szempontból ezt nem engedélyezném. Amennyiben a munkát végző kizárólag kötéltechnikával dolgozik, a fa koronájában egy fő, amennyiben mozgó munkaállványból, a kosárba maximum 2 fő (a munkát végző és egy segítő vagy gépkezelő) tartózkodhat.

4.14. Erősáramú szabadvezeték veszélyeztetése esetén a munkát csak akkor szabad megkezdeni, ha a vezeték üzemeltetője a vezeték – az erdő tulajdonosának, kezelőjének kérésére – a munka időtartamára feszültségmentesítette.

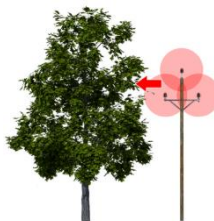
Az erdő tulajdonosának javítandó a fa tulajdonosára. Szükséges lenne megadni a biztonságos védőtávolságokat is. Figyelembe kellene venni a 8/2001. (III. 30.) GM-rendelet által hatályba léptetett „Villamosmű Műszaki-Biztonsági Követelményei Szabályzat”, 2/2013. (I. 22.) NGM-rendelet a villamosművek, valamint a termelői, magán- és közvetlen vezetékek biztonsági övezetéről. Jelentős számú elektromosbaleset a felsővezetékek veszélyei miatt következik be, különösen az 1 kV és 30 kV közötti tartományban, ezek a vezetékek általában fán vannak, vagy betonoszlopokon helyezkednek el viszonylag alacsony magasságban. A villamosok, vonatok és trolibuszok is veszélyesen magas feszültséget hordoznak.

Felsővezetékek közelében történő munkavégzés során be kell tartani a megelőzés érdekében az alábbi óvintézkedéseket:

- A munka megkezdése előtt vegye fel a kapcsolatot az adott hálózat üzemeltetőjével, szükség esetén tegye meg az intézkedéseket (feszültségmentesítés)!
- Áram alatti vezeték esetén szükséges a biztonsági távolság betartása. Ebben az esetben is konzultáljunk az üzemeltetővel, lehetőleg legyen jelen a munkavégzés során. Biztonsági távolság betartásakor figyelembe kell venni:
 - a vezeték kilengését,
 - a fa kilengését,
 - a szerszámok hosszát.

Biztonsági zónák:

- 0,5 m: 1 kV,
- 1,5 m-től: 30 kV-ig,
- 2 m-től: 110 kV-ig,
- 3 m-től: 220 kV-ig,
- 4 m-től: 380 kV-ig.



2. ábra

4.15. Lakott területen fadóntást, álló fa legallyazását és ledarabolását megelőzően faegyedenként előre pontosan meg kell tervezni a tevékenységek sorrendjét, és a feladatokat egyértelműen meg kell osztani a munkában részt vevők között.

4.16. Meg kell határozni a munka tárgya, az alkalmazott felszerelés és technológia függvényében a veszélyeztetett körzetet.

4.17. A munka megkezdése előtt gondoskodni kell arról, hogy a veszélyeztetett körzetben a munkát végzőkön kívül senki se tartózkodjon (pl. veszélyeztetett lakóházban, hétvégi házban, kertben).

A tapasztalatok megerősítik, hogy senki ne tartózkodjon a veszélyeztetett körzetben. Ha a veszélyeztetett körzet közterület, a munka azután kezdhető el, miután az illetékes hatóságok (pl. a helyi önkormányzat jegyzője, közlekedésrendészet) az engedélyt megadta, és a közterületet a forgalom elől elzárta.

A terület elzárásán (pl. út vagy járda esetében ideiglenes sorompó, szalagkorlát) kívül jól látható figyelmeztető táblákat kell elhelyezni a következő felirattal: „Fakitermeléssel veszélyeztetett terület, belépni tilos!”

A munka megkezdése előtt lakott területen történő munkavégzéskor kiemelten, ha az közterületen történik, kötelező a munkaterület lezárni, biztosítani és megjelölni. A lezárt terület a fa csurgóterületén mindenképp érjen túl (3. ábra)! Ez történhet szalaggal, oszlopokkal, figyelmeztető táblákkal, bójákkal. Magánterületen is ajánlatos a terület körbeszalagozása. Amennyiben a munka félbeszakad, csak akkor szabad a területet átjárhatóvá tenni, ha az semmiféle veszélyforrást nem jelent a járókelők számára.

A fán végzett munka lehetséges veszélyt jelent a járókelők, járművezetők számára, ezért fokozott figyelemmel kell lenni rájuk. Mivel látványos tevékenység, sok érdeklődő megáll, bámészkodik, érdeklődik. Az emberek nagy részének tetszik, másik részének nem tetszik, amit végzünk. Van, aki betontengerben érzi magát jól, és minden fát kivágatna, és vannak a szélsőséges zöldek, akik a legéletveszélyesebb fához is odaláncolnák magukat.

Saját felelősségünk, hogy a munkaterületet csak a munkát végzők használják, oda illetéktelen személyek nem léphetnek be.



3. ábra. A munkaterület helyes lezárása [3]

Közterületet, szomszédos ingatlan magánterületét csak előzetes egyeztetés után szabad használni, a munka megkezdése előtt kötelesek vagyunk értesíteni a terület kezelőjét.

Az esési terület a veszélyes terület része, amelybe a fa vágott részei esnek, itt senki sem maradhat, ennek a területnek mérete a munkavégzés típusától, a munkapozíció magasságától, a terepi feltételektől, a fa állapotától és az időjárási tényezőktől, szélviszonyoktól függ.

Forgalmas területen, út mellett 2 fő folyamatos jelenléte szükséges, akik szükség esetén leállítják a forgalmat, amikor a fa leejtése vagy leeresztése, illetve döntése történik. Ugyancsak szükséges a munkaterület előtt mért 100 méter távolságból, mindkét irányból a „vigyázz fakitermelés” tábla kihelyezése, továbbá a forgalomlassító, 30 km megengedett legnagyobb sebesség tábla kihelyezése. Főútvonal mentén szükséges a közútkezelővel való egyeztetés, illetve a hozzájárulásának beszerzése.

3. KIEGÉSZÍTENDŐ JAVASLATOK

Eddig az erdészeti biztonsági szabályzatban található fejezetek lettek kiegészítve. A továbbiakban javaslatként olyan betartandó szabályokat ismertetünk, melyeknek elsajátítása elengedhetetlen legalább alapfokon a témával foglalkozó szakemberek vagy tanulók részére. Mélyebb ismeretek közzétételére nem térünk ki, hiszen ha valaki ebből akar megélni, annak mindenképpen el kell végeznie nemcsak a lakott területi fakitermelő tanfolyamot, hanem legalább egy alapfokú ipari alpintanfolyamot, ahol mélyebb ismeretanyagra lehet szert tenni.

A világ legveszélyesebb munkái közé tartozik a fakitermelés. A magasban végzett munka ugyancsak ide tartozik. E kettő kombinációja pedig rendkívül veszélyes. Úgy gondoljuk, hogy egy ilyen szakmának a biztonsági szabályzatát nem szabad 3 oldalban „letudni”.

Sokan a tanfolyam elvégzése után kezdenek el fákat kivágni speciális eszközökkel. Ezért tartjuk fontosnak bővíteni a szabályzatot, hiszen az elérhető eszközök is sokat fejlődtek az elmúlt években. Fontos a fák, fafajok ismerete is, hiszen minden fának más a tulajdonsága, teherbíró képessége, statikája.

Ismernünk kell a fahibákat, és a rejtett veszélyekre is fel kell készülnünk. Alapfokon ezeknek is szükséges a közzététele, aki pedig nem gyakorlott, mindenképpen kérje ki egy minősített favizsgáló tanácsát a fakivágás előtt.

A lakott területi fakivágást végzőknek célszerű lenne egy ismeretanyagot összeállítani és az EBSZ-t kiegészíteni, ami a következő tématerületeket érintené:

- A fa felmérése, fahibák;
- Veszélyek, vészhelyzetek fán való munkavégzéskor;
- Kötéltelepítés;
- Sérülékeny tárgyak, közterületi és kerti berendezések védelme;
- Elsősegélynyújtás, mentés;
- Egyéb előírások (pl. helyes biztosítás famászáskor, leeső teher megfogása munkakötéssel, helyes és helytelen munkahelyzet-pozíciók bemutatása, esési tényezők ismerete, ereszkedés stb.).

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk célja az Erdészeti Biztonsági Szabályzat elavult és hiányos részeinek javítása és javaslatok hozzátétele.

Az elmúlt több mint 2 évtized gyakorlati tapasztalatai, a munkavédelmi tapasztalatok rávilágítottak egy új fejezetre. Rendbe kell tenni az EBSZ hiányosságait, létre kell hozni a kor követelményeinek megfelelő szabályzatot, amelyből hazánkban elméleti tudást, tananyagot tud meríteni a lakott területi témával foglalkozó tanuló vagy a már gyakorlott, és éppen vizsgára készülő szakember. A témával kapcsolatban természetesen előfordulhatnak hiányosságok, munkánk során legfőképpen a gyakorlatiasságra törekedtünk. Mindezek és a balesetekre épülő esettanulmányok alapján az EBSZ-be beépítendő javaslatokat tettünk közre.

A jelenleg elérhető EBSZ tárgyalása 1,5 oldal terjedelemtől nem több. Csak a kiegészítendő (és nem módosítandó) javaslatok (teljes anyag ábrákkal együtt) meghaladják a 16 oldalt. A módosítások szintén meghaladják a 11 oldalt. Az EBSZ-ben szereplő 4. fejezet 17 alfejezetéből csak 3 maradt, amelyekhez nem kellett hozzátennünk. Mindezek mellett pedig több javaslatot fogalmaztunk meg a kiegészítésre (Berezky A. [2022] Javaslatok a lakott területi fakitermelésre vonatkozó Erdészeti Biztonsági Szabályzat megújítására szakdolgozat alapján).

El kellene gondolkozni egy új szabályzat kidolgozásán, ahol szakmai oldalról részt vennének a munkavédelmi szakemberek, erdészek, faápolók és az ipari alpintechnika képviselői egyaránt. Figyelembe vennék a kor követelményeit és az elérhető eszközöket, munkavédelmet, természetvédelmi korlátozásokat egyaránt.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] 15/1989. (X. 8.) MÉM-rendelet az Erdészeti Biztonsági Szabályzat kiadásáról
- [2] Berezky, A. (2019): Lakott területi faápolás, fakivágás közben leggyakrabban előforduló védett gerinces állatfajok és védelmük lehetőségei. Szakdolgozat. Szent István Egyetem Kertészettudományi Kar. Budapest, 2019.
- [3] Hutter F. (2018): Arbeiten auf Baumen. Sicherheitsinformation auf Führungskraften. Mplus 520. Sicherheitkompakt. Wien, pp. 1–27.

Lakott területi fakivágás során felmerülő kockázatok és balesetek bemutatása esettanulmányokon keresztül

Case studies to illustrate the risks and accidents associated with felling in populated areas

Dr. Zákányi Balázs^{1*} – Bereczky Attila² – Dr. Zákányiné dr. Mészáros Renáta³

¹ Miskolci Egyetem, Környezetgazdálkodási Intézet, 3515 Miskolc Egyetemváros, hgzb@uni-miskolc

²Egyéni vállalkozó, 3717 Alsódobsza, Rákóczi utca 69.

³Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros

Összefoglaló: Mintegy 4 évtizede még ismeretlen fogalomként szerepelt a lakott területi fakitermelés, a faápolás pedig szinte egy évtizedes fogalom. Egyszerűen csak kivágták vagy kivágatták, visszacsonkoltatták a fákat hozzáértő vagy hozzá nem értő szakemberekkel, olykor károkat, baleseteket okozva.

A munkák során bemutatjuk a jelenlegi jogi szabályozást, majd az általánosan használt és különleges egyéni védőeszközöket. Ezt követően több esettanulmányon keresztül mutatjuk be a lakott területi fakivágás veszélyeit. Ismertetésre kerül, hogyan lehetett volna megelőzni, elkerülni ezeket a baleseteket. Az esetek 1977-től napjainkig terjednek. A bekövetkezett eseményeket statisztikai módszerekkel értékeltük, ami nagy segítség lehet a későbbiekben a 15/1989. (X. 8.) MÉM-rendelet az Erdészeti Biztonsági Szabályzat módosításának a javaslataihoz.

Kulcsszavak: lakott terület, fakivágás, balesetek

Abstract: About 4 decades ago, logging in populated areas was an unknown concept, and tree care is almost a decade old. They were simply felled or cut back, sometimes causing damage and accidents, by competent or incompetent professionals.

The current legal regulations will be presented, followed by the commonly used and specific personal protective equipment. This will be followed by a series of case studies to illustrate the dangers of felling trees in populated areas. How these accidents could have been prevented and avoided will be described. The cases range from 1977 to the present day. The incidents that occurred were evaluated using statistical methods. This can be a great help for future proposals to amend the Forest Safety Regulations (Decree 15/1989 (8.X.)).

Keywords: inhabited area, tree felling, accidents

1. BEVEZETÉS

Ősidők óta gondozza, ápolja az ember a fákat, a fákra való odafigyelés már a vallási kultúrákban is megjelent a különféle keleti kultúrákban vagy a pogány magyarok hitvilágában. A 13. sz. végéig, a magyarországi településrendszer megszilárdulásáig az erdők akadályozták a mezőgazdasági művelést és a letelepülést, ezért nagymértékben irtották őket. A közös erdőkből királyi erdőbirtokok váltak ki, kormányzásukra külön erdőispánságokat szerveztek. A királyi erdőbirtokok a későbbi évszázadokban adományozások révén nagyrészt magánföldesúri kézre kerültek. A magyarországi erdőgazdálkodás első okleveles nyoma 1262-ből a Csallóközből származik, vetett magról nőtt erdőről tesz említést. A földművelés kiterjedése, a bányászat és a kohászat föllendülése következtében a középkor vége felé az erdők nagyarányú pusztulásnak indultak. Az 1769-ben kibocsátott erdőrendtartás erősen megszorította a szabad erdőgazdálkodást. Az 1791. évi LVII. tc., az első igazi erdőtörvény az erdők kötelező védelmét, az 1807. évi XX. tc. a futóhomok fásítását írta elő. A 19. sz. második felében a városépítés fellendülése és a modern közlekedési hálózat kialakulása következtében ugrásszerűen megnövekedett az erdők gazdasági jelentősége. Az 1935. évi erdőtörvény helyes elveit a háború miatt már nem volt mód érvényesíteni. A valóban közérdekű erdőgazdálkodás lehetőségét az erdőket államosító 1945. évi VI. tc. hozta meg [1].

Ekkoriban az Amerikai Egyesült Államokban már ismert volt a faápolás szakterülete, amely már az 1800-as évek végére kialakult. A városiasodás terjeszkedése újabb stresszhatásoknak tette ki a fákat, így a hátrányos következmények már nyilvánvalóvá váltak. Sajnos akkoriban a tudományos ismeretek a növényi szervezetekben fellépő működési zavarokat illetően még hiányosak voltak, és a növényvédelemmel kapcsolatos rendelkezésre álló, megbízható információk is kevésnek bizonyultak. 1901-ben John Davey – a Davey Tree Expert Company (Davey Faszakértő Vállalat) alapítója – megírta a *The Tree Doctor (A Fadóktor)* című könyvet, melynek bemutatójában Mr. Davey így ír: „Eljött az idő, amikor a fa ültetését, a fa termesztését és nemesítését a növényélettan összefüggéseiben szükséges tanulmányoznunk. Ha ezt nem tesszük meg, akkor olyan méretű szerencsétlenség fogja érni a termékeny területek lakóit, mely az emberi elme számára felfoghatatlan” [2]. Több, növényvédelemmel foglalkozó szakember szerte Észak-Amerikában és Európában hasonló véleménnyel állt elő. 1924-ben került megrendezésre a faápolással foglalkozó szakemberek számára

az első konferencia, amely a Shade Tree Conference nevet kapta. Vállalkozók és magánszemélyek már jó ideje foglalkoztak faápolással, de ez az iparág nem volt szabályozva, és a kutatóknak sem volt elegendő szaktudásuk a közterületi díszfák ápolásához.

A fakitermelés – mint a világ egyik legveszélyesebb munkája – szép számú szakirodalommal rendelkezik még hazai szinten is. Elég, ha vásárolunk egy fűrész, a használati utasításában már olvashatunk nemcsak a gép biztonságos működtetéséről, hanem a különféle vágásformákról is, melyet motorfűrész-kezelő tanfolyamon tanítanak [3]. A hazai erdésztechnikus-képzés tankönyvei csak az erdei munkafolyamatokat mutatják be, a lakott területi dolgokra nem térnek ki [4]. A falebontás sokkal veszélyesebb, még sincs hazai szakirodalma, iskolája, nincsenek kialakult, leírt szabályok, minden csapat más szabályok között dolgozik. Külföldi, főleg amerikai, német szakterületen már jól kialakult tanfolyamok vannak, és a szakirodalommal való ellátottsága is bővebb.

A mászóvassal való famászás már régebb óta megjelent a favágók, maggyűjtők és solymászok körében egyaránt. Madárvédelmi munkák alkalmával elengedhetetlen, ezzel egy Magyarországon megjelent ragadozómadár-védelmi könyvnek külön fejezete is foglalkozik [5]. Amerikában, Kanadában már több évtizede hagyománya van az oszlopmászó versenyeknek, ahol időben mérik a mászást, a feladat a 30 méter magas oszlopra mászóvassal és derékövvel minél hamarabb feljutni (általában 30 mp) és a tetején megkogatni a harangot [6].

Amerikában a faápoló megnevezés az 1930-as években terjedt el, azon okból, hogy a faápolás területe elkülönüljön az erdészettől [7]. Hazánkban ekkor nem különült el az erdészettől. Természetesen ekkor is voltak fák a közterületen, melyeket gondozni, ápolni kellett, de ezt általában az erdészeti emberei végezték el. Az 15/1989. (X. 8.) MÉM-rendelet Erdészeti Biztonsági Szabályzatban már különálló fogalom a lakott területi fakitermelés, ami a rendelet 4.1–4.18-as bekezdéseiben tárgyalja a munkákra vonatkozó biztonsági előírásokat [8]. A hegymászók is különösen speciális és nagy veszélyességű munkaként említik a hegymászótechnika alkalmazásával történő munkavégzések között a fakivágást [9].

Az Erdészeti Biztonsági Szabályzat kiadásakor még teljesen elfogadott dolog volt a csonkolás. Solymáskörökben már régebb óta használtak kötélletrát, majd mászóvasat a fészkekhez való feljutáshoz, ami szintén Amerikából terjedt el, és itthoni kovácsműhelyekben próbáltak hasonló dolgokat létrehozni, melynek eredményeként teljesen egyedi modellek alakultak ki tájegységként. A kötéltechnika modernizációjának köszönhetően ma már számos olyan módszer létezik a lombkoronába való feljutáshoz és közlekedéshez, amelyek egyáltalán nem sértik a fát. Ezeket a módszereket akkor alkalmazzuk, ha nincs lehetőségünk emelőkosárból dolgozni. A technika rohamosan fejlődik, mi sem bizonyítja jobban, mint az, hogy egy 15 éve megírt cikk manapság már inkább megmosolyogtató, mintsem biztonságtechnikai útmutató [10].

2010-ben egy maroknyi szakember elhatározta, hogy tenni szeretne a városi fákért. Az alapítók megegyeztek azokban a célokban és értékekben, amelyek a Magyar Faápolók Egyesületének létrehozásához vezettek. Az egyesület céljai között szerepel a városi környezetben lévő fák egészségi állapotának védelme, a személy- és vagyónbiztonság növelése, a kapcsolódó szakértői és faápolási tevékenységek jövőbeni támogatása, szabályozása és tudományos alátámasztása. Kiemelt célja a magánszemélyek, illetve az üzleti és állami szféra számára tanácsadás biztosítása ebben a témakörben [11].

A faápolás a szükségességét tekintve a kertészet, a díszkertészet fiatal ága, híd az erdészeti és a kertészet között [12]. A tengerentúlon éppen akkor bontogatta hajtásait, amikor kitántorgott másfél millió magyar [13]. A Magyar Faápolók Egyesületének nagy vállalása, külföldi mintát követve, a faápolás-mesterség leírása szakmai útmutatók formájában, ami megtalálhatóak az egyesületi oldalon.

2. MEGFELELŐ RUHÁZAT ÉS FELSZERELÉS KIVÁLASZTÁSA, EGYÉNI VÉDŐFELSZERELÉSEK

A fán végzett munkához már forgalomban van olyan vágásvédelemmel ellátott munkaruha, amelyet könnyű a fán is használni, könnyű benne mozogni. Az ára magas, de megéri befektetni. Követelmény a ruházat kiválasztásakor, hogy légáteresztő, testhezálló anyag legyen. Alsóruházatként funkcionális fehérmű, olyan alöltözet szükséges, amely nedvességszabályozó. A hegymászó-alöltözékek – mint alsó réteg – kiválóan megfelelnek az ilyen munkafolyamatokra is, és leginkább télen ajánlatosak. A bakancsnál követelmény, hogy vágásvédelemmel legyen ellátva, a bokán átnyúló legyen. Orrmerezítő acél vagy műanyag betét legyen benne ütés és zúzódás ellen, és átszűrődésnek is ellenálló legyen, valamint az EN ISO 20345-46 követelményeknek is megfeleljen. A védőkesztyű szorosan illeszkedő, csúszásmentes anyagból készüljön!

A felszereléseknek tökéletes állapotban kell lenniük, meg kell felelniük az ide vonatkozó szabványoknak és a törvényi előírásoknak, a gyártói utasításokat, a felülvizsgálati időket szigorúan be kell tartani. Kivételes esetnek tekinthetők az alpintechnikai eszközök, ezekre más szabványok vonatkoznak.

A fakitermelés során legszükségesebb egyéni védőeszközök a teljesség igénye nélkül:

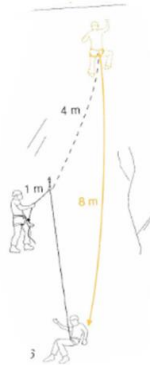
- biztonsági sisak (Y állszíjjal, hallásvédelemmel, arcvédő rostély, plexi),
- testheveder,
- munkahelyzet-pozicionáló,
- mászóvas,
- kötél,
- karabinerek, ereszkedőeszköz,
- kötél tartó zsák, dobózsák, dobózsínór,

- vágásbiztos munkanadrág,
- bakancs,
- kesztyű.

Egyéb alpinechnikai eszközök, eséstényező

Legfontosabb a kötél, ami nem azonos a sziklamászók által használt dinamikus kötéllel. Nagyon széles a paletta, amelyből választhatunk, már megkülönböztetünk famászó, faápoló, teherköteleket egyaránt. A hegyászó köteleknek meg kell felelnie az európai EN 892 szabványnak vagy a még szigorúbb UIAA előírásoknak. Fakivágási munkafolyamatok során kismértékben szükséges a minimum 10,5 mm átmérőjű statikus munkakötelek alkalmazása. Általában 15-34 kN teherbírással rendelkeznek. Ha különösen nehéz rönköket, ágakat akarunk megtartani, már választhatunk a 12–18 mm átmérő közötti és 34–77 kN teherbírással rendelkező különleges teherkötelekből. Kötéltechnikai munkák során szükséges tisztában lennünk az eséstényezővel. Esésnél megnyúlik a kötél, annál nagyobb mértékben nyeli el az esés energiáját, minél hosszabb a megnyúló kötélrész. Az esés keménysége nemcsak az esés magasságától, hanem a kiengedett kötéltől is függ [14].

Eséstényező = az esés hossza / a kiengedett kötéltől. Tehát ha 8 métert zuhan a teher 5 méter kötéltbe, az eséstényező 1,6 (1. ábra).



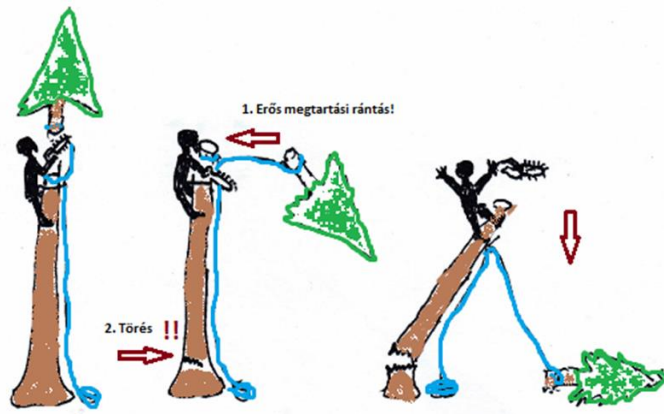
1. ábra. 1,6-es eséstényező

3. KOCKÁZATOK, BALESETEK ÁTTEKINTÉSE – SAJÁT TAPASZTALATOK ÉS ISMERTSÉGI KÖRÖKBŐL GYÚJTOTT BALESETEK ELEMZÉSE

A következő sorokban a felvázolt szakmával kapcsolatos baleseteket mutatunk be részletesen leírva, majd pedig azt, hogy hogyan lehetett volna megelőzni, elkerülni a problémát. A dátumot illetően évszámra szűkítettük az adott esetet, nevet, cégnevet nem említünk, helységként várost, illetve kisebb település esetén a legközelebbi nagyvárost adtuk meg. Időpontot illetően azért tartjuk szükségesnek legalább évszámra megadni az eseményt, mert már pár év alatt is óriási változások következnek be a munkavédelmi eszközök területén, és az alkalmazott munkamódszereket illetően is. A 20 vizsgált esettanulmány közül hármat emelünk ki a következőkben.

Tatabánya, 1997.

Lábon száradt fa kivágását végezte alpinechnikával a favágó. Miután a törzs oldalágaktól való tisztítása megtörtént, mint minden normális esetben, a fa csúcsa maradt hátra, amelyet a beépített környezet védelme érdekében kötéltbe ejtenek bele, hogy ne sérüljön semmi. Ekkor kapja a fa a legnagyobb terhelést, nincsenek oldalágak, amelyek a rezgést csillapítják, egy egyenes oszlopba hirtelen következik be a statikus rántás. A fa töve kitért és kidőlt, a munkavállaló megúsza egy agyrázkódással és kéztöréssel, kisebb anyagi károkkal (2. ábra).



2. ábra. A tatabányai baleset szemléltetése (a szerzők saját szerkesztése)

Az eset sokkal súlyosabban is végződhetett volna. Fontos, hogy ilyen esetekben a száraz fára nem szabad mászni, emelőkosárból kellett volna elvégezni a munkát. Az emelőkosár használata ebben az időszakban ritka vagy szinte elérhetetlen volt, nem beszélve arról, hogy a helyszínt amúgy se lehetett volna emelőkosaras autóval megközelíteni. Ilyenkor mérlegelni kell, mi számít, az anyagi kár vagy az emberélet. Tudjuk, az utóbbi nem pótolható, minden más igen.

A legegyszerűbb megelőzési módszer ilyen esetben, ha egyszerűen kidöntjük a fát, akár a házra is. Természetesen jó, ha van felelősségbiztosításunk az ilyen esetekre, és az önrész dolga esetleg megbeszélhető a megrendelővel. Kisebb kárt okozunk akkor, ha az említett facsúcsot nem kötjük meg kötélbe, hanem szabadon esik le, és törik, ami törik. Jóval drágább megoldás egy daru, amelyen munkavégzésre alkalmas kosár van, és beemel. A másik, legdrágább módszer, amelyet már 1998-ban is alkalmazott először egy cég Magyarországon is, az a helikopteres fakivágás.

Ebben az esetben nem volt megfelelő a munkamódszer-választás.

Budakeszi, 2007.

A 15 méteres jegenyefa felső 5 méterét (kb. 1 mázsa, leveles) egyben akarta levágni a favágó. A hajk (a dőlésirányt meghatározó bemetszés a fában) készítése után megtörtént a döntővágás, beleszámítva a szelet és a szélirányt. Abban a pillanatban megállt a szél, a vágott rész kb. 30 fokkal más irányba esett le. Félre tudott húzódni, de a kezét nekiszorította a fának, csúszott rajta a kötél a fa súlyával kb. 1 métert, mire sikerült kiszabadítania (3. ábra). Csontig égette a csuklóját, mire kiszedte a kezét. Nem megfelelő időjárási körülmények közötti munkavégzés történt.



3. ábra. A budakalászi baleset szemléltetése

Bükk hegység, 2015.

Létráról dolgozott a munkavállaló. A létra nem volt biztosítva, de a munkavállaló se volt kikötve a fához. A leérkező gally visszacsapódott a létrának, és kisodorta alóla, a favágó leesett (3. ábra).

Rengeteg hasonló videó van az interneten. Következmény: súlyos gerinctájéki sérülések, törés, mintegy 6 hónapig kisesett a munkából. A baleset elkerülhető lett volna megfelelő biztosítással, továbbá munkautasítással, pl. a létrát kizárólag a fára való feljutáshoz lehet használni.



4. ábra. A létra helytelen használata **Miskolc, 2020.**

A reggeli órákban történt az eset, decemberben ködös, párás, korlátozott látási viszonyok között. A levágott fadarabok megfogására egy új eszközt vezettek be, amelynek használatához a segítő nem volt kellőképpen kiképezve, továbbá a munkavégzővel nem volt megfelelő a kommunikáció. A lenti segítő arra számított, hogy kisebb farönköt kell

megfognia, ezzel szemben egy természetes, több száz kilós súlyt kellett megfognia. A súlyt az eszközzel meg lehetett volna fogni rendesen, de nem lett kellőképpen áttekerve a kötélféken, így az eszköz odahúzta a munkavállaló kezét (5. ábra), amelyet a kesztyű mentett meg, de így is bekövetkezett 3 ízületi tok radiális szakadása. Minden ilyen esetben egyértelmű jelzést kell adni rámutatással a lenti biztosító embernek, hogy melyik ág vagy rönk fog a kötéltbe esni.

A biztosítóembernek egyértelmű oké kézzel kell jeleznie, hogy értette, a munkavégzőnek szintén egy oké kézzel, hogy következik a vágás. A baleset okozói: rossz látási viszonyok, nem megfelelő kommunikáció, a betanítás hiánya.



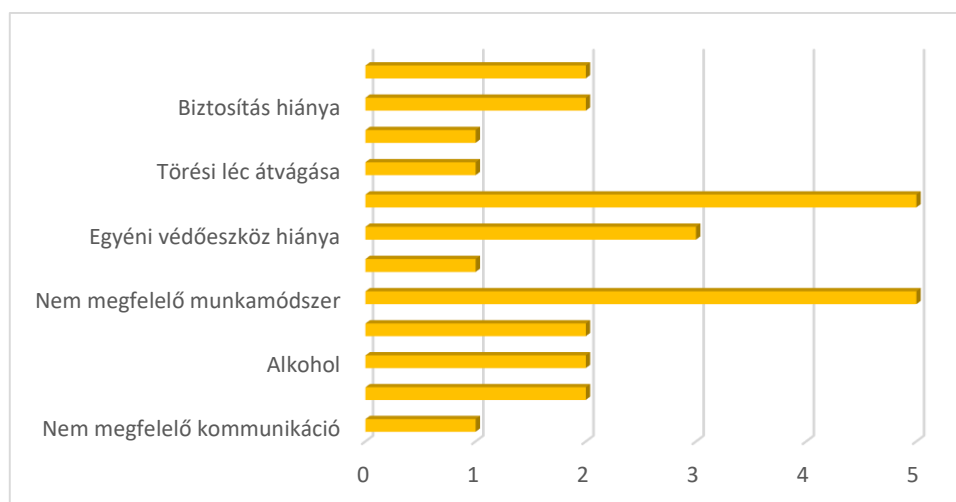
5. ábra. A kötélfék helytelen használata

4. ESETTANULMÁNYOK, A BALESETEK ÖSSZESÍTÉSE

A 20 kiválasztott esettanulmány leírásaiban vannak átfedések, amikor többfajta sérülés keletkezett, vagy többféle ok is közrejátszott a baleset bekövetkezésében. Így azokat külön esetszámnak vettük a következő táblázatban és az összesítő diagramban (6. ábra).

1. táblázat

A baleset típusa	A baleset oka	Esetszám
Ízületi tok szakadása	Nem megfelelő kommunikáció	1
	Nem megfelelő időjárási körülmények	1
Agyrázkódás	A munkaterület lezárásának hiánya	1
	Nem megfelelő munkamódszer	1
Égési sérülés	Gyakorlatlanság, a betanítás hiánya	1
	Egyéni védőeszköz hiánya	1
Törés	Nem megfelelő időjárási körülmények	1
	Nem megfelelő munkamódszer	2
Zúzódás	A biztosítás hiánya	1
	Nap végi fáradtság	4
	Nap végi fáradtság	1
	Törési lécvágása	1
	Figyelmetlenség	1
Vágási sérülés	A biztosítás hiánya	1
	Alkohol	1
	Nem megfelelő eszköz	1
	Egyéni védőeszköz hiánya	2
	Szerszám helytelen használata	1
Medencetájék törése, sérülése	Kapkodás	2
	Alkohol	2
Pszichikai sokk	Nem megfelelő munkamódszer	1
	A munkaterület lezárásának hiánya	1



6. ábra. A balesetek okainak megoszlása

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A 20 kiválasztott baleseti esettanulmány rávilágított, hogy mire kell figyelni. A nap végi fáradtság, kapkodás, sietség az egyik leggyakoribb ok nemcsak a saját, de mások tapasztalatai alapján is. Ezzel is szeretnék rávilágítani arra, hogy az előírt időintervallumnál többet ne dolgozzunk, hagyjuk holnapra, a munka megvár. A munka pótolható, de az egészségünk, a biztonságunk, az életünk pótolhatatlan. Gyakrabban jelent meg még a nem megfelelő munkamódszer vagy az eszköz helytelen megválasztása és az egyéni védőeszköz hiánya.

E tanulmány is rávilágít arra a tényre, hogy a lakott területi fakivágás biztonságos munkavégzéséhez elengedhetetlen az EBSZ frissítése, valamint szükség lenne egy jól megformált szakirodalomra is a témakörben.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Kolossváry Sz. (1975): Az erdőgazdálkodás története Magyarországon, Akadémiai Kiadó, Budapest.
- [2] Davey, J. (1907): The tree Doctor: The Care of Trees and Plants, New York ; Akron, Ohio ; Chicago : The Saalfield Publishing, Co, pp. 1–94.
- [3] Czimmer, B. Farkas, I. Ferenczy, T. Gulyás, I. Horváth, I. Molnár, V. Solt, T. Vizárdy, J. (1990): A Motorfűrész kezelése, karbantartása és alkalmazása a fakitermelésben. Tankönyvpótló jegyzet. Falco fakombinát, Sopron
- [4] Fibrás, O. (2010): Erdőhasználatlan I. Az erdőszaktanús szakképzés tankönyve. FVM Vidékfejlesztési, Képzési és Szaktanácsadási Intézet Budapest
- [5] Haraszthy, L. (1993): Gyakorlati ragadozómadár-védelem. Magyar Madártani és Természetvédelmi Egyesület 5. könyvtára, Budapest, pp. 1–123.
- [6] Philbrick, F. Philbrick, S. (2006): The Backyard Lumberjack. The ultimate guide to felling, bucking, splitting and stacking. Storey Publishing pp. 1–177.
- [7] http://dendrocomplex.hu/common/uploads/article_item/faapolastortenete-
- [8] <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=98900015.mem>
- [9] Pátkai B., Babcsán G., Megyeri I., Meggyes Á., Merza I., Neidenbach Á., Sárközi A., Schmatz B., Singer J., Valcsák M. (1993): Hegymászók könyve. Magyar Hegymászó Oktatók Egyesülete, Budapest, pp 1–159.
- [10] Bereczky A. (2007): A biztonságos fára mászás. Heliaca 2007, 5. évfolyam. MME Ragadozómadár-védelmi Szakosztály közös évkönyve, Budapest, pp 1–121.
- [11] <https://faapolok.hu/celok/>
- [12] <https://magyarmezogazdasag.hu/2019/04/15/faapolas-fa-szeretetenek-muveszete>
- [13] Lukács Z., Szaller V., Divós F., Kelemen G. (2017): Útmutató a vizuális és műszeres favizsgálatok elvégzéséhez és dokumentálásához. Magyar faapolók Egyesületének kiadványa, Budapest.
- [14] Winkler K., Hans P., Haltmeier J. (2011): Hegymászás nyáron. CSER kiadó, és MHSSZ. Mű eredeti címe: Bergsport Sommer. Budapest.

A víziközmű-ágazatban beszállással végzett munkák hazai szabályozása és gyakorlata

Domestic regulation and practice of confined space works in the water utilities sector

Zákányi Balázs Zsolt¹* – Tóth Gyula² – Zákányiné Mészáros Renáta³

¹ Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kar, egyetemi docens hgzb@uni-miskolc.hu

² Beregvéd – Munkavédelem, Tűzvédelem, Környezetvédelem Tanácsadó Iroda

³ Miskolci Egyetem AFKI, tudományos főmunkatárs

Összefoglaló: Magyarországon a közcélú vízellátási létesítményeket – ivóvízműveket és szennyvízelvezető, -tisztító műveket – hatályos víziközmű-szolgáltatói engedéllyel rendelkező gazdasági társaságok üzemeltetik. Az üzemeltetés során az üzemeltetőnek gondoskodnia kell olyan szervezett munkarendről, ügyeleti, készenléti szolgálatról, amely a folyamatos, megbízható szolgáltatáson túl lehetővé teszi, hogy hiba felmerülése esetén azonnal be tudjon avatkozni az üzemi és környezeti károk elhárítása vagy mérséklése, továbbá a szolgáltatás mielőbbi helyreállítása érdekében. Ezek a nem tervezett beavatkozások sok esetben beszállással végzett munkának minősíthetők, ilyenek az aknákban vagy csőhálózaton végzett munkák, a hidroglobuszok (víztornyok) javítási műveletei, de akár a vízművek tározóiban végzett, nem tervezett beavatkozások is.

Munkánk során összefoglaljuk a beszállással végzett munkák magyarországi szabályozását. Ismertetjük a szabályozás részét képező munkáltatói intézkedések lehetőségeit. Összegyűjtjük továbbá a víziközmű-ágazatban leggyakoribb műveleteket, továbbá a beszállással végzett munkák veszélyeit, ami nagy segítség lehet a beszállást engedélyező és a végzők számára egyaránt.

Kulcsszavak: víziközmű ágazat, beszállásos munkavégzés, munkabiztonság

Abstract: In Hungary, public water facilities - drinking water plants and wastewater treatment plants - are operated by companies with a valid water utility licence. During operation, the operator must ensure an organised working schedule, on-call and stand-by service which, in addition to a continuous and reliable service, enables it to intervene immediately in the event of a fault in order to remedy or mitigate operational and environmental damage and to restore service as soon as possible. In many cases, these unplanned interventions can be classified as work with boarding, such as work in manholes or pipelines, repair operations on hydroglobuses (water towers), or even unplanned interventions in waterworks reservoirs.

Our work summarises the regulation of boarding works in Hungary. We describe the possibilities of employer measures that are part of the regulation. We also compile a list of the most common operations in the water utility sector and the risks of boarding, which can be of great help to both those who authorise boarding and those who carry it out.

Space 10 pt.

Keywords: water utilities sector, on-boarding, safety at work

1. BEVEZETÉS

A munkavállalók életének és testi épségének védelme mindig kiemelt feladat volt és lesz a munkáltatók tevékenysége során, hiszen a legértékesebb erőforrás az emberi erőforrás. E munkáltatói feladatnak sikeres végrehajtását két fő tényező befolyásolja alapvetően. Az egyik egy objektív tényező, amely a műszaki, szervezési és megelőzést szolgáló eszközök, intézkedések összességében jelentkezik, amely anyagi erőforrásokat igényel, és alkalmazásuknak határai vannak. A másik a szubjektív tényezők összessége, amely a munkavállalók szakmai és általános műveltségének, magatartásának eredményeként jelenik meg. A munkáltatónak a működése során meg kell felelnie valamennyi munkavédelmi előírásnak, és gondoskodnia kell, hogy a munkavállalók is betartsák az előírt szabályokat [1].

A 2011 évi CCIX tv. hatályba lépését követő víziközmű-integrációval 41 szolgáltató jött létre, mintegy 21.000 fő munkavállalóval. A Nemzetgazdasági Minisztérium felmérése alapján a 2013–2017 év közötti időszakban, a víziközmű-társaságoknál a munkavállalói létszám csökkenése mellett a munkabalesetek száma folyamatosan emelkedett. A vizsgált ötéves időszak alatt az összes munkabalesetek száma az ágazatban 70,27%-kal növekedett, a 2017. évi 252 munkabalesetből 3 súlyos és 2 halálos baleset volt [2].

A következő fejezetekben összefoglaljuk a beszállással végzett munkák hazai szabályozását, illetve ezek szabályozási eszközeit. Ismertetjük a víziközmű-ágazatban végzett veszélyes tevékenységeket és a beszállásos munkák veszélyeit. Utóbbi terület nagy segítség lehet a beszállást engedélyező és a végzők számára egyaránt.

2. A BESZÁLLÁSSAL VÉGZETT MUNKÁK HAZAI SZABÁLYOZÁSA

A munkavédelem szabályozási rendszerét hierarchikusan egymásra épülve több szintre oszthatjuk. Legfelső szinthez tartoznak az országos hatályú jogszabályok, illetve szabványok, alatta helyezkednek el a munkáltató által kiadott helyi szabályozások.

A munkavédelmi előírások rendszere tehát a következőképpen épül fel:

- Országos hatályú szabályok:

- jogszabályok, rendeletek

- szabványok: A szabványtól való eltérés esetén a munkáltatónak bizonyítania kell, hogy az általa alkalmazott megoldás munkavédelmi szempontból legalább egyenértékű a szabványban foglalt követelményekkel [3].

- üzemeltetési dokumentációk: A gépek, berendezések jellemzőit, mozgására, tárolására, rendeltetésszerű használatára, karbantartására és használatbavételére vonatkozó fontosabb információkat az üzemeltetési dokumentációk határozzák meg. A munkaeszközök legjobban a használati utasítások alapján ismerhetők meg, ezért hozzáférhetőségüket az üzemeltető nyelvén kell biztosítani [4].

- Munkavédelemre vonatkozó szabálynak minősül a munkáltató rendelkezése:

- belső szabályzatok az alapkötelezettségek szabályozására:

- munkavédelmi utasítások:

- vezetői utasítások: műszaki előírások, amelyek a munkáltatónál betartandó és alkalmazandó műszaki megoldások dokumentumai [4].

A munkavédelemre vonatkozó szabályok fogalom alá tartozó előírások közös tulajdonsága, hogy megtartásuk kötelező, azaz jogi felelősség terheli a végrehajtásban érintett személyt. A hazai munkavédelmi szabályzástól nem tér el a víziközmű-ágazat sem, miszerint a munkáltatónak a működése során meg kell felelnie valamennyi munkavédelmi előírásnak, és gondoskodnia kell, hogy a munkavállalók is betartsák az előírt szabályokat.

3. A BESZÁLLÁSSAL VÉGZETT MUNKÁK SZABÁLYOZÁSI ESZKÖZEI

Az egészséget nem veszélyeztető és biztonságos munkavégzés biztosításához meg kell határozni a követelményeket, a követelményeknek való megfelelés ellenőrzését és az ellenőrzés módját. A szabványok a konkrét, betartandó (normatív) értékeket rögzítik, ide tartoznak a munkavédelem irányítási és ellenőrzési feladatai is [5].

Magyarországon a veszélyes berendezésekben történő munkavégzés biztonságtechnikai követelményeit jogszabályban a munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. sz. törvény (Mvt.), szabványok közül pedig az MSZ-09-57.0033-1990 szabályozza. Ezenfelül az egyes szakágak is rendelkeznek külön szabályozással. Ilyen pl. Vízügyi Biztonsági Szabályzat jogszabályi meghatározásban a 24/2007. (VII. 3.) KvVM-rendelet. A szabvány alkalmazása az Mvt. 11§-a szerint munkavédelemre vonatkozó szabálynak minősül a nemzeti szabványosításról szóló törvény figyelembevételével a teljes egészében magyar nyelvű munkavédelmi tartalmú nemzeti szabvány. A munkáltatóknak az MSZ-09-57.0033-1990 szabvány előírásait ezáltal minden beszállással végzett munka esetében kötelezően használniuk kell.

3.1. Az MSZ 09-57.0033:1990 szabvány alkalmazása és annak előírásai

A szabványok általános és ismételten alkalmazható eljárásokat és műszaki megoldásokat adnak, amelyeket közmegegyezéssel fogadtak el, és optimális megoldást kínálnak a különböző érdekelt felek számára. A műszaki jogszabályok csak alapvető követelményeket tartalmaznak, a szabványok pedig ezek teljesítéséhez kínálnak alkalmazható megoldásokat. A Mvt. 2019. január 1-től történt változtatása óta nem önkéntes a magyar nyelvű szabványok betartása, attól eltérő megoldás csak akkor lehetséges, ha az a szabvány előírásaival megegyező vagy műszakilag egyenértékű.

A „Munkavédelem. Veszélyes berendezésekben beszállással végzett munkák biztonságtechnikai követelményei” című és MSZ 09-57.0033:1990 hivatkozási számú szabvány egy magyar szabvány, 1990. november 1-től hatályos, helyettesített, helyettesítő vagy módosító szabványa nincs [6].

Az általános követelményeknél a beszállással végzett munkára vonatkozó alaplételeket is meghatározza a szabvány (előkészítés, leválasztás, légtérelvezés, beszállás).

A szabványhozzáférés jelenleg a Magyar Szabványügyi Testülettől – díj ellenében, biztosított. A munkáltatók és a víziközmű-ágazat is a működésük során nem minden esetben használják naprakészen a magyar nyelvű szabványokat, nincsenek birtokukban azoknak. Az Mvt. előírása szerinti kötelező szabványhasználat helyett sok esetben a munkavédelmi szakemberek által készített, belső társasági szabályzóknak rögzítik az egészséget nem veszélyeztető és biztonságos munkavégzés feltételeit, így a beszállással járó munkavégzését is. A munkavédelmi szakemberekre is ezáltal nagy felelősség nehezedik.

3.2. A társasági vagy vállalati szintű szabályozás lehetőségei

A jogszabályi szabályzási szinten az ágazatban legfontosabb jogi szabályzó a Vízügyi Biztonsági Szabályzat kiadásáról szóló 24/2007. (VII. 3.) KvVM-rendelet, amely biztonsági követelmények meghatározása szempontjából kiterjed minden szervezett vízügyi tevékenységre. A Vízügyi Biztonsági Szabályzat 1.03 pontja szerint a helyi adottságokból származó veszélyforrások biztonsági szabályozását munkáltatói utasításban kell kiadni (Vízügyi Biztonsági Szabályzat).

A vállalatirányítás a vállalat eredményes, átlátható és kontrollált vezetését biztosítani hivatott alapelvek összessége, amelyek kiterjednek a vállalat céljaira és a szerveződésére, a folyamataira, a jogi és belső szabályaira, továbbá az érdekelték viszonyaira. A felelős és hosszú távon gondolkodó vállalatok alapvető érdeke az olyan belső szabályozási rendszer, amely maximálisan figyelembe veszi az egészséges és biztonságos munkavégzés szempontjait.

A víziközmű-társaságok esetében leggyakrabban alkalmazott munkáltatói belső szabályzások az alábbiak:

- kollektív szerződés és szervezeti működési szabályzat,
- munkavédelmi szabályzat vagy
- belső folyamatleírások, eljárási utasítások (pl.: MEBIR esetén),
- munkavédelmi utasítások,
- belső társasági szabályzók, vezérigazgatói utasítás, minőségirányítási szabályzók, amelyek rögzítik a munkavégzések engedélyezéseinek eljárásrendjeit is [7].

Amennyiben a munkavédelmi szabályzatban szerepelteti a munkáltató a beszállással végzett munkák feltételeit, úgy a szabályzat mellékleteként kerül kiadásra a beszállási engedély formanyomtatványa.

A MEBIR-szabvány előírásai alapján felépített irányítási rendszerben alapvetően külön eljárásutasításként szerepelhetnek a beszállással végzett munkákra vonatkozó rendelkezések [8].

Az eljárásokat az irányítási rendszerben, az eljárásutasításokban kell rögzíteni, ahol meg kell adni az eljárás megnevezését, célját, az érvényesség határait, az összefüggéseket más eljárásokkal és dokumentumokkal.

Az egyes eljárásokhoz kötődve a munkautasítások szabályozzák a munkafolyamat egy-egy fázisát. Jellemük szerint a munkautasítások lehetnek kezelési utasítások vagy mérési vagy akár ellenőrzési eljárások is. A munkautasítás mellékleteként szerepelhet esetünkben a beszállási engedély mintapéldánya is [9].

4. A VÍZIKÖZMŰ-ÜZEMELTETŐK TEVÉKENYSÉGEI ÉS AZOK VESZÉLYEI

A víziközmű olyan speciális létesítmények elnevezése, amelyek a települések vízellátását, illetve szennyvízelvezetését szolgálják. Víziközműnek nevezzük a kutakat vagy a felszíni vízkivételi műveket, a víztisztító műveket, a víztárolókat, a vízvezeték-hálózatot, a szennyvízesatorna-hálózatot és a szennyvíztisztító műveket is. A víziközművek a magyar állam és a települési önkormányzatok tulajdonában vannak, és különböző szerződések (koncessziós, üzemeltetési, vagy kezelési szerződések) keretében hatályos víziközmű-szolgáltatói engedéllyel rendelkező gazdasági társaságok üzemeltetik. A feladatvégzések során a fokozottan balesetveszélyes körülményekre kell felkészíteni a munkavállalókat, az oktatások és a munkavégzések szabályozása folyamatos feladata a társaságok biztonságtechnikai szervezeteinek.

4.1. A víziközmű-üzemeltetők veszélyes tevékenységei

Az ivóvízellátás legfőbb tevékenységei közé tartozik a vízkitermelési, víztisztítási, vízhálózat-üzemeltetési és -karbantartási, valamint a hibaelhárítási feladatok ellátása. A szennyvíztisztítás és -elvezetés feladatai hasonlóak az ivóvízágazati tevékenységekhez, eltérés a szennyezett víz kezelésében és azzal járó kockázataiban van (vegyi anyagok fajtái, fertőzésveszélyek, gőzök és gázok kockázatai). A víziközmű-társaságoknál különféle létesítmények, berendezések működtetésével találkozhatunk, ilyenek a kútaknak, a hálózati átemelőknak, a magas- és alacsony tározók (hidroglóbuszok és föld alatti tározók), víztisztító tartályok, szennyvízkezelő medencék és akár a gáztalanító tornyok üzemeltetése [10].

Az ivóvízkezelés alapműveleteit egyenként, párhuzamosan vagy egymást követően alkalmazzák a víztisztítás megoldására. A vízkezelés feladata, hogy a vízből megfelelő vízkezelési eljárással egészséges ivóvizet állítsunk elő. Az eljárás 3 főbb alkotóját lehet megnevezni:

- mechanikai kezelés,
- kémiai kezelés és
- fertőtlenítés.

A három főbb területet tovább-bontva beszélhetünk az alábbi technológiai műveletekről:

- gáz-folyadék fázissszétválasztás (robbanásveszélyes metán kiválasztása),
- durva szűrés (szűrők és dobok használatával),
- üleptetés (ülepítőmedencékkel),
- derítés (finomiszap-leválasztás koagulálás és flokkulálás mellett),
- szűrés (nyitott szűrőmedencékkel, zárt tartályokkal),
- fertőtlenítés (klór-, ózonadagolással, UV-sugárzás használatával),
- vas- és mangántalanítás (tartályok által),
- lágyítás (ioncserével vagy meszezéssel),

- arzénmentesítés (vas-III-oxid-adagolással általában),
- íz- és szagártalmak kiküszöbölése (kálium-permanganát vagy klór-dioxid hozzáadással).

A szennyvíztisztítás során is hasonlóan szerteágazó műveletekről beszélhetünk. A víz- és szennyvíztisztításban közös, hogy sok tekintetben hasonló technológiai műveleteket és technológiai műtárgyakat alkalmazunk. Közös tulajdonság, hogy fizikai (mechanikai) és kémiai eljárásokat mindkét esetben, nagy számban alkalmazunk. Azonban lényeges eltérés, hogy biológiai, mikrobiológiai megoldásokat csaknem kizárólag a szennyvíztisztításban használunk. A főbb műveletek az alábbiak:

- rácsok, homokfogók, olaj- és zsírfogók használata
- ülepítés (nyitott medencék által)
- természetes biológiai tisztítás
- csepegtetőtestes biológiai tisztítás
- eleveniszapos biológiai tisztítás (leggyakoribb, itt már zárt rendszereket is használnak, medencék és tartályok alkalmazásával)
- kémiai tisztítás (fém sók, szénforrások adagolása),
- fertőtlenítés (klórra, ózonnal, mésszel vagy nátrium-hipoklorittal),
- szennyvíziszap kezelése (iszapsűrítés akár vegyszerekkel is) [11].

A fentiek alapján a víziközmű-üzemeltetés során általánosan elmondható, hogy veszélyes tevékenységekről beszélünk. A víz- és szennyvízkezelés és a közműhálózati üzemeltetés során az alábbi munkavégzések a leggyakoribbak:

- földmunkavégzés (a csőhálózat karbantartása, fektetése, hibaelhárítása) (1. ábra),
- közúton végzett építőipari és csőhálózati munkák (forgalomkorlátozással),
- hegesztés és vágás,
- magasban és mélyben végzett munkák (hidroglóbuszok, alacsonytározók üzemeltetése és földmunkák során)
- emelőgépek üzemeltetése,
- beszállással végzett munkák (aknák, tározók és tartályok karbantartása és hibaelhárításai)
- vegyi anyagok használata (klórgáz fertőtlenítés),
- mezőgazdasági erőgépek használata (mezőgazdasági vízhasznosítás),
- vízen vagy víz feletti munkavégzés (élővizek és partjainak növényzetirtása).



1. ábra. Csőtörés javítása közúton (forrás: internet_5)

4.2. A beszállással végzett munka és veszélyei

Beszállással végzett munkának minősül minden olyan tevékenység, amely a berendezésben behajlással vagy annak belsejében végezhető, ha ezt a teret emberi tartózkodásra nem tervezték. A munka előkészítése során ismerni kell a veszélyes tér veszélyeit, amelyek károsíthatják a munkavégzők egészségét [12]. A beszállással végzett munkák esetében ismernünk kell a veszélyes tér fogalmát. Az Mvt. veszélyesnek minősít minden olyan létesítményt, munkaeszközt, anyagot/készítményt, munkafolyamatot és technológiát (beleértve a fizikai, biológiai, kémiai kóroki tényezők terhelő hatásával járó tevékenységeket is), amelynél a munkavállaló egészsége, testi épsége, biztonsága megfelelő védelem hiányában károsító hatásnak lehet kitéve [13].

A beszállással végzett munkák egyszerűek és bonyolultak is lehetnek, és bárki bármely iparágban ki lehet téve annak, hogy zárt térben vagy a körül dolgozzon. A legtöbb esetben aknák és tartályok belsejében történő munkavégzésre gondolunk, de ide tartozik az emberi tartózkodásra nem szolgáló területen végzett minden olyan tevékenység, amely:

- behajlással (legalább az arc felülete a veszélyes tér határoló felületein belülre került) vagy
- annak belsejében való tartózkodással végeznek, illetve amikor
- a veszélyes tér kívülről végzett munkáinál a veszélyes anyag kiáramolhat, vagy

- a külső állásról olyan szerszámot (eszközt) használnak a veszélyes tér belsejében, amely a kiürítés után benntartó éghető gázokat vagy gőzöket meggyújthatja [14].

A víziközmű-létesítmények üzemeltetése során beszállással végzett munkának minősülnek az alábbiak:

- ivóvíz- és szennyvízvezetékben, átemelőaknáknál végzett javítások, tisztítások (csőtörés javítása, szivattyúk és szerelvények cseréje, duguláselhárítás):
 - kézi szerszámok használatával különféle anyagú csövek és szerelvények szerelése,
 - hegesztés vagy lángvágás,
 - vágás vágókoronggal,
 - nagynyomású mosók használata,
 - csőkamerázás,
 - szivattyúzás,
 - vegyi anyaggal történő tisztítás, fertőtlenítés.
- ivóvízes alacsonyvíztározók (hengeres fémtartályok) belső javítása, tisztítása hasonló műveletekkel, mint az aknáknál történő munkavégzésnél,
- víztornyok (hidroglóbuszok) belsejében végzett feladatok, hasonló műveletekkel, mint az aknáknál történő munkavégzésnél,
- vas- és mangánszűrő tartályok belső javítása (akár hegesztése) behajlással,
- szennyvíztisztító medencékben (zárt műtárgyak) végzett javítási és tisztítási műveletek az előzőkhöz hasonló módon.

Akkor tekintünk egy veszélyes teret a beszállással végzett munka területének, ha az emberi tartózkodásra nem tervezett, nem kialakított. Sok esetben tévesen a víziközmű-társaságok azokat a műveleteket is beszállásos munkavégzésnek tekintik, ahol a vízelélesztőművek (például: alacsonyvíztározók) kialakítása emberi tartózkodásra alkalmas, és rendeltetészerű használata során ezekben időszakosan munkát kell végezni. Az alacsonyvíztározóknál fél évente belső takarítást és fertőtlenítést végeznek, ezek során nagynyomású mosóberendezéseket és vegyi anyagokat is használnak. Ellenben ezekben a vasbeton létesítményekben a normál gyalogsközlekedésnek megfelelő nyílászáró, létra vagy lépcső és törpefeszültségű világítás is kiépített, így emberi tartózkodásra alkalmasak. Az üzemelési használat során (ivóvíztisztításhoz és fertőtlenítéshez szükséges mennyiségű vegyi anyag-használat mellett) veszélyes koncentrációjú, egészségre ártalmas gázok, gőzök nem szabadulhatnak fel, nem gyűlhetnek össze ezekben a kezeltvíz-tározókban. Meg kell említeni a fentiek miatt, hogy a munkaengedélyek kiadása során a létesítmények szabatos, pontos megnevezése nagyon fontos, mivel alacsonyvíztározó lehet a félig süllyesztett vasbeton medence (50 m³ térfogat feletti) és a hengeres acéltartály is (2. ábra).



2. ábra. Az alacsonyvíztározók fajtái

A veszélyek elkerülésének, kezelésének elengedhetetlen feltétele a veszélyforrások felismerése, azonosítása. A veszélyek általánosságban a következők lehetnek:

- veszélyes koncentrációjú, egészségre ártalmas gázok, gőzök vagy porok jelenléte,
- fulladást okozó oxigénhiány,
- maró vagy mérgező anyagok jelenléte,
- tűz- és robbanásveszélyes gázok, gőzök vagy porok jelenléte,
- forgó, mozgó belső szerkezetek (pl. keverők, szállítóberendezések),
- villamos berendezések jelenléte (pl. világítótestek, kéziszerszámok, hegesztőberendezések),
- radioaktív sugárzás (pl. szintmutató izotóp),
- tűz keletkezésének lehetősége.

A beszállással végzett munkák során kiemelt kockázatot jelent a szűk munkatér. A szűk munkatérben végzett munka szabályait – az építési munkahelyeken és az építési folyamatok során megvalósítandó minimális munkavédelmi követelményekről szóló – 4/2002. (II. 20.) SzCsM-EüM együttes rendelet 4. melléklete is szabályozza, de a beszállásos munkáknál nem minden esetben beszélünk építési tevékenységről. Bizonyos kialakítással kapcsolatos veszélyek meghatározhatók, ilyenek a csúszós felületek, kis nyílások, lejtők, keskeny átjárók, alacsony mennyezet, keresztartók vagy a válaszfalak is, ezekre a veszélyekre a beszállást végző figyelmét fel kell hívni [15].

A víziközmű-ágazat egyik legnagyobb kockázati tényezője a biológiai kóroki tényezők jelenléte. A beszállásos munkavégzés során, főleg a szennyvíztisztítás és -kezelés területén folyamatosan fennálló biológiai kockázatnak van kitéve a munkavállaló (állatok ürülete, szennyvíz, éles tárgyak általi szűrés és vágás miatti fertőzés stb.). A kommunális szennyvizetbe az emberre káros patogén kórokozók is bejuthatnak, ez potenciális veszélyként jelentkezik a szennyvízzel szennyezett létesítményekben történő munkavégzés során. A szennyvíz nagy számban tartalmaz a bélflórából és a környezetből származó mikroorganizmusokat: vírusokat, baktériumokat, gombákat, protozoonokat, férgekét és azok lárváit vagy petéit. A beszállással végzett munkák megelőző intézkedései során figyelembe kell venni ezeket, és fel is kell hívni rájuk a beszállást végző figyelmét (pl.: védőoltások megléte, egyéni védőeszközök használata).

További veszélyforrások:

- a villamos berendezések jelenlétéből adódóak (világítótestek, villamos kéziszerszámok, hegesztőberendezések, villamos energiával működő más eszközök)
- radioaktív sugárzás (szintmutató izotópnál)
- mechanikai veszélyek (munkakörnyezetből, végzett műveletekből adódóan)
- a szervezetlenség miattiak (előkészületek hiánya, információ, felügyelet vagy a mentés hiányosságai)
- veszélyhelyzetek bekövetkezésének gyorsasága (tervtől, utasítástól való eltérés, felkészületlenség).

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A víziközmű-üzemeltetésnél általánosan elmondható, hogy veszélyes tevékenységekről beszélünk. Az üzemeltetés során a beszállással végzett munkák a mindennapi feladatvégzésekhez tartoznak. Magyarországon a veszélyes berendezésekben történő munkavégzés biztonságtechnikai követelményeit jogszabályban a munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. számú törvény (Mvt.), a szabványok közül pedig az MSZ-09-57.0033-1990 szabályozza.

A víziközmű-társaságok legtöbb esetben munkavédelmi szempontú belső utasításban, azon belül is műveleti, technológiai vagy munkautasításban kötik ki az egyes feladatok végrehajtásának menetét, így a beszállással végzett munkáét is. Veszélyes berendezésbe beszállni, ott munkát elkezdni csak a rendeltetésszerűen azt használó üzemeltető által kiállított beszállási engedély alapján és a munka irányításával, illetve állandó ellenőrzésével megbízott vezető jelenlétében szabad. A cikkünk abban nyújt segítséget, hogy összefoglalja a legfontosabb veszélyforrásokat az ágazatban, ami nagy segítség lehet mind az engedélyező és mind munkát végzők számára, mivel a biztonságos beszállás feltételeinek a meghatározása és biztosítása a beszállást engedélyező, míg a beszállással végzett munka biztonságos végrehajtása és annak ellenőrzése a beszállást végző felelőssége.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Módszertani Közlemények, Juhász Gyula Tanárképző Főiskola, 1988
- [2] internet_1: <https://www.liganet.hu/9726-a-vizikozmu-szolgalatas-munkabiztonsaga.html>
- [3] internet_2: <http://www.protectwear.hu/custom/remotex/image/data/leirasok/munkavedelem-bovitett.pdf>
- [4] Bujnóczki Tibor, Munkavédelem munkáltatóknak, munkavállalóknak, Műszaki Könyvkiadó, 2017
- [5] Tasi Miklós, Vállalatirányítási rendszerek, 2012
- [6] Feicht Ferenc, Veszélyes berendezésekben, zárt terekben beszállással végzett munkákhoz ajánlott védőeszközök és felszerelések, FeWe Biztonságtechnikai Kft., pp 1–15., 2015
- [7] Szabó Gyula, Szűcs Endre. (Szerk.), Munkavédelem a szakképzésben, Óbudai Egyetem, Egyetemi kézirat, Budapest, pp 1–149., 2012
- [8] internet_3: <https://solvergroup.hu/sajtoszoba/mebir---munkahelyi-egeszsegvedelem-es-biz-tonsgag-iranyitasi-rendszer>
- [9] internet_4: http://www.sze.hu/~petocz/Minosegiranyitasi%20rendszerek/levelezo/Minoseg_menedzsmnt/8fejezet.pdf
- [10] FGSZ, EBK-kódex kivonata – Munkavégzés engedélyezése és felügyelete, 2018
- [11] Török István, Vízellátás és szennyvízkezelés, 2011
- [12] WorkSafeBC, Hazards of Confined Spaces, WorkSafeBC.com, Canada, pp. 1–19., 2008
- [13] Veasey, D. Alan; McCormick, Lisa Craft; Hilyer, Barbara M.; Oldfield, Kenneth W.; Hansen, Sam; Krayner, Theodore H., Confined Space Entry and Emergency Response, John Wiley & Sons, Inc, Canada, ISBN-] 3 978-0-471-77845-5, pp. 29–54., 2006
- [14] Bujnóczki Tibor, Különleges körülmények közötti munkavégzés, Miskolci Egyetem előadásvázlat, 2019
- [15] 3M Hungária Kft., A beszállásos munka veszélyei, 2019

A víziközmű-ágazatban beszállással végzett munkák beszállási engedélyének kidolgozása és kiadásának gyakorlata

Development and practice of issuing access permits for works in confined spaces in the water utilities sector

Zákányi Balázs Zsolt^{1*} – Tóth Gyula² – Zákányiné Mészáros Renáta³

¹ Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kar, egyetemi docens hgzb@uni-miskolc.hu

² Beregvéd – Munkavédelem, Tűzvédelem, Környezetvédelem Tanácsadó Iroda

³ Miskolci Egyetem AFKI, tudományos főmunkatárs

Összefoglaló: Bemutatjuk a víziközmű-ágazatban leggyakoribb műveletek munkaengedélyezési rendszerét, továbbá a beszállással végzett munkák veszélyeit. A szabályozás részét képező munkáltatói intézkedések lehetőségeinek ismertetése mellett az engedélyezési eljárások mechanizmusa is felvázolásra kerül. Ezek alapján került sor egy részletes beszállási engedély mint formanyomtatvány elkészítésére és az engedélyezésben részt vevő munkáltatók és munkavállalók kötelezettségeit, feladatait felvázoló útmutató kidolgozására.

Kulcsszavak: víziközmű-ágazat, beszállásos munkavégzés, munkabiztonság

Abstract: The work permit system for the most common operations in the water utilities sector is presented, as well as the hazards of boarding work. In addition to outlining the options for employer action as part of the regulation, the mechanism of the authorisation procedures is outlined. On this basis, a detailed form for an access authorisation has been developed and a guide outlining the obligations and responsibilities of employers and workers involved in the authorisation process has been produced.

Keywords: water utilities sector, on-boarding, safety at work

1. BEVEZETÉS

Az általunk készített és mintaként szolgáló beszállási engedély és annak használati útmutatója a víziközmű-társaságok mindennapi munkavégzéséhez tartozó, de veszélyesnek minősülő, beszállással végzett munkáihoz átfogó segítséget nyújthat. A beszállási engedély kiadásakor legtöbbször gondot okoz a megfelelő kitöltés, a felelősségi körök tisztázása és rögzítése a beszállással végzett munka sajátosságainak figyelembevétele mellett. A munkánk által előállított dokumentumok a víziközmű-társaságok technológiai sajátosságait figyelembe véve fogalmazznak meg előírásokat, és ezek alapján adnak javaslatokat a beszállási engedély kiadásának eljárásához. Az előírásoknak megfelelő és a munka jellemzőit figyelembe vevő engedély a beszállással végzett munkák biztonságosabbá tételének alapja.

2. A BESZÁLLÁSSAL VÉGZETT MUNKÁK SZABÁLYOZÁSI ESZKÖZEI

Az egészséget nem veszélyeztető és biztonságos munkavégzés biztosításához meg kell határozni a követelményeket, a követelményeknek való megfelelés ellenőrzését és az ellenőrzés módját. A szabványok a konkrét, betartandó (normatív) értékeket rögzítik, ide tartoznak a munkavédelem irányítási és ellenőrzési feladatai is [1].

Magyarországon a veszélyes berendezésekben történő munkavégzés biztonságtechnikai követelményeit jogszabályban a munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. sz. törvény (Mvt.), a szabványok közül pedig az MSZ-09-57.0033-1990 szabályozza. Ezenfelül az egyes szakágak is rendelkeznek külön szabályozással. Ilyen pl. Vízügyi Biztonsági Szabályzat jogszabályi meghatározásban a 24/2007. (VII. 3.) KvVM-rendelet. A szabvány alkalmazása az Mvt. 11§-a szerint munkavédelemre vonatkozó szabálynak minősül a nemzeti szabványosításról szóló törvény figyelembevételével a teljes egészében magyar nyelvű munkavédelmi tartalmú nemzeti szabvány. A munkáltatóknak az MSZ-09-57.0033-1990 szabvány előírásait ezáltal minden beszállással végzett munka esetében kötelezően használniuk kell.

3. A MUNKAENGEDÉLYEK TÍPUSAI

A szervezett munkavégzés általános követelménye a személyi és tárgyi feltételek megléte mellett a feladatvégzések leszabályozása. A munkavállalók (természetesen a víziközmű-társaságok munkavállalói is) a munkaköri leírásukban meghatározott feladatokat a munkautasításokban meghatározott módon, engedélyezési eljárás nélkül elvégezhetik. Ide tartoznak a víziközművek üzemeltetéséhez szükséges kisebb karbantartási, szerelési munkák is. Ezeket feladatokat csak az a munkavállaló végezheti el, akinek a munkaköréhez tartozik, vagy megbízással rendelkezik a

tevékenységre vonatkozóan, megfelelő szakképesítéssel rendelkezik, és a munkavégzésre vonatkozó elméleti és gyakorlati oktatásban részesült [2]. A víziközmű-társaságoknál általánosságban három típusú munkaengedélyt különböztetünk meg:

- munkavégzési engedély,
- alkalmoszerű tűzveszélyes tevékenység végzése (pl. hegesztés, lángvágás stb.),
- beszállással végzett munka (aknában, tartályban, hidroglobuszban végzett munka stb.) engedélye.

A következő fejezetben az utóbbival foglalkozunk részletesen.

3.1. A beszállási engedély formai és tartalmi követelményei

Veszélyes berendezésbe beszállni, annak tisztítását, karbantartását, javítását vagy átalakítását elkezdni csak a rendeltetészerűen azt használó szervezeti egység vezetője (üzemeltető munkahelyi vezetője) vagy megbízottja által kiállított engedély alapján, a munka irányításával és állandó ellenőrzésével megbízott vezető (a munkát végző munkahelyi vezetője) vagy e munkára vezetői jogkörrel felruházott személy jelenlétében szabad. A beszállási engedély formájára a vonatkozó szabvány 2. függeléké ad javaslatot, de az engedély minden esetben a beszállásos munka jellemzői alapján kell összeállítva legyen [3].

Az engedélyt két példányban kell elkészíteni, az eredeti példányt a munkavégzés helyszínén kell tartani, a munka befejezése után érvényteleníteni kell, és az engedélyezőnél maradó példányt irattározni szükséges (a vonatkozó szabvány alapján legalább egy évig meg kell őrizni).

A beszállási engedélyben minimálisan meg kell határozni (a vonatkozó szabvány 6.2. pontja szerint):

- a berendezést azonosítható módon,
- a végzendő feladatot,
- az engedélyt adó nevét és aláírását,
- a munkát irányító felelős nevét és aláírását,
- a munkavégzésben részt vevők nevét,
- a beszállást előkészítő műveletek felsorolását és
- az előírt védőfelszerelések felsorolását.

A vonatkozó szabvány függelékében szereplő mintában szerepel továbbá:

- a tisztítás módja és ideje, ellenőrzése
- a leválasztási műveletek és annak ellenőrzése
- a légtérelvezési és szellőztetési műveletek eredménye
- a további szükséges intézkedések módjai (tűzoltási feltételek, a világítás módja, szikramentes szerszámok szükségessége, a sugárzási veszélyt okozó technológiai műszerek hatástalanítása) [MSZ-09-57.0033:1990]

A beszállási engedély csak egy műszakra vagy egy munkanapra adható ki, folyamatos munkavégzés esetén naponta meg kell vizsgálni a körülményeket, és új engedélyt kell kiállítani. A beszállási engedély kitöltéséhez a beszállást engedélyezőnek a szabványt, a munkavédelmi eljárásokat, a technológiai jellemzőket jól kell ismernie. Az MSZ-09-57.0033:1990 szabvány az engedélyezési eljárásra vonatkozóan nem tartalmaz döntési folyamatábrát, amely viszont a víziközmű-ágazatban kellő segítséget nyújtana a beszállási engedélyek kiállításához. Az US-OSHA (Egyesült Államok Munkahelyi Biztonsági és Egészségvédelmi Ügynökség) 1910. jelű szabvány 146 A része tartalmaz döntési folyamatábrát, ennek alapján állítottuk össze az alábbi, magyar szabványra vonatkozó általános ábrát. (1. ábra)

A víziközmű-csatornák műtárgyaiban, csővezetékben, de a technológiai tartályokban is jelen lehetnek tűzveszélyes, robbanásveszélyes gőzök, gázok, folyadékok, illetve maró, mérgező vagy fertőző anyagok.

3.2. A beszállási engedély kiállításának és kiadásának eljárása

A munkaengedély határozza meg, milyen munkát végezhetnek a beszállást végző munkavállalók. A beszállási engedély kitöltési segédlete segíti a felelős személyt, hogy a beszállási engedélybe az adatokat megfelelően és pontosan írja be. A víziközmű-társaságok a beszállási engedélyek kiadásához útmutatót, kitöltési segédletet nem alkalmaznak, viszont ezzel a munkahelyi vezetőknél – főleg kellő tapasztalat és ismeret hiányában – „előre kódolt” a hibázás lehetősége. Az alábbi iratminta (2. ábra) megfelelő kitöltéséhez a következő ismertető pontonként részletezve ad útmutatást:

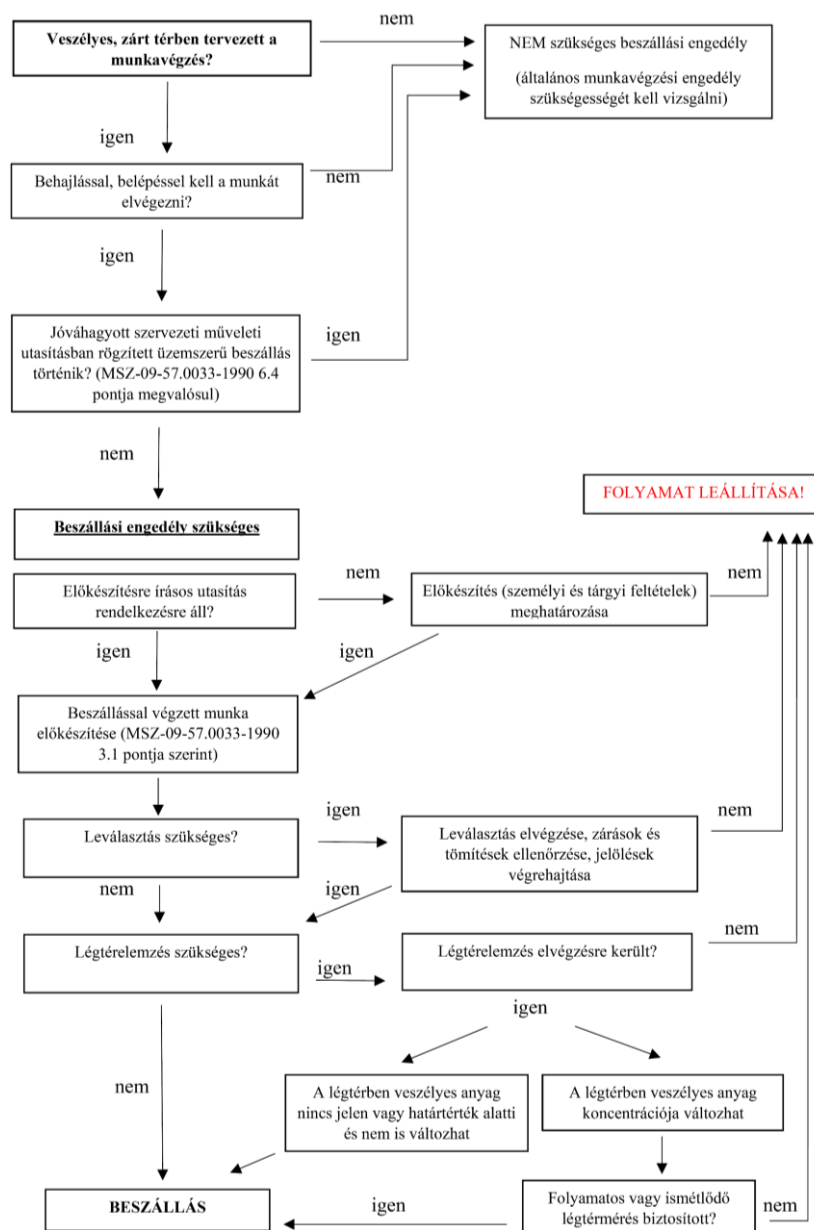
0. Beszállással végzett munka alapadatai:

- A beszállással végzett munka megrendelőjének, az érintett munkaterület, berendezés üzemeltetőjének (mint a beszállási engedély kiállítójának) és a munkát végzőnek mint engedélykérőnek az adatait kell felvezetni.
- A beszállással érintett berendezés, technológia helyét és megnevezését pontosan, szabatos megnevezéssel (mással összetéveszthetetlenül) kell feltüntetni.
- A munkaengedély egy alkalomra, egy műszakra szól, így a munkavégzés idejét ennek tekintetében kell megadni (mikortól meddig).

1. A munkavégzők / felügyeletet ellátók neve és végzettségeikre vonatkozó adatok:

- A beszállásos munkát végzők (beszállók), a figyelők adatainak megadása a szükséges végzettségek (tűzvédelmi szakvizsga) feltüntetésével kell megtörténnjen.

- Az engedély kiadása szempontjából a legfontosabb adatok közé tartozik az engedélyt kiadó, az engedélyt kérő és annak munkairányítója és az esetlegesen szükséges üzemeltetői vagy szakfelügyeletet ellátó személyek adatainak megadása.
 - A beszállási engedélyben rögzítettek elfogadását a résztvevők aláírásukkal igazolják, annak hiányában a beszállást nem lehet elkezdni.
2. A tevékenység jellege, jelen lehet veszélyes körülmények és veszélyes anyagok:
- A munka jellegének megadásával rögzítésre kerül az adott munkavégzés típusa, mivel a beszállási engedély egy adott munkavégzésre szól, az előkészítés, a leválasztás és a feltételek megadása ennek megfelelően történik meg.
 - A veszélyforrások jelölésével a beszállást végző munkavállalók felkészíthetők a kockázatokra, illetve eldönthető, hogy a későbbiekben feltüntetésre kerülő előkészítések és leválasztások teljes körűek.
 - Az anyagjellemzők és veszélyes anyagok listája támpontot ad a szükséges légtérelmzéshez és a védőeszközök kiválasztásához. Az adatok megadásakor a víziközmű-társaságoknak a szennyvízhálózatot érintő beszállásos munkáknál figyelembe kell venniük a hálózathoz csatlakozó kibocsátók technológiáját (pl.: ipari üzemek ipari szennyvizeinek jellemzőit) is.



1. ábra. Döntési folyamatábra

semlegesítés stb.) az egyes előkészítési, tisztítási műveletek megadása mellett a megjegyzés rovatban kell szerepeltetni. Megadásra kerülhet a gépi szellőztetés mértéke, ideje, a kimosás vagy átöblítés mennyisége is.

- A berendezés előkészítését végző személy aláírásával igazolja az elvégzett és ebben a pontban jelölt előkészítő műveleteket.
- A víziközmű-társaságok esetében az előkészítési feladatokat a technológiát és berendezést ismerő és kezelő személynek vagy szervezeti egységnek kell végrehajtania.

5. Az érintett berendezés leválasztási művelete:

- A 4. pontban megadott előkészítési műveletekhez hasonlóan kell a szükséges leválasztásokat megadni. Amennyiben a berendezésnek nincs kapcsolata más technológiával, villamos rendszerrel vagy akár beépített műszerekkel, akkor ezt is jelölni kell az engedélyben.
- Ha a leválasztás során dokumentált (pl.: jegyzőkönyvezett, munkalapon feltüntetett), utasítás szerinti művelet kerül elvégzésre az adott pontban vagy a megjegyzés rovatban fel kell tüntetni.
- A berendezés leválasztását – az előkészítéshez hasonlóan – a technológiát ismerő szervezeti egység végzi, és a végző személy aláírásával igazolja az elvégzett és az engedélyben megjelölt leválasztási műveleteket.

6. Légtérelmezésre vonatkozó adatok:

- A méréshez csak hitelesített, és használat előtt tesztelt és kalibrált műszert lehet alkalmazni.
- A mérés során a mért jellemzőknél, a mért értékek tekintetében, az alábbiakat kell figyelembe venni:
 - mérgező gázok esetében a koncentráció mértékétől (CK, MK érték) függően kell a légzésvédelmet vagy a benttartózkodást meghatározni
 - éghető anyagok esetében az alsó robbanási határérték (ARH) szerint:
 - ha a koncentráció \leq ARH 5%-a, akkor tűzveszélyes munka végezhető
 - ha ARH 5%-a < koncentráció \leq ARH 10%-a, tűzveszélyes munka nem végezhető
 - ha a koncentráció \leq ARH 20%-ig beszállás engedélyezhető, de csak tisztítási és vizsgálati műveletre
 - ha ARH 20% < koncentráció, akkor a munkavégzés tilos.
 - az oxigénkoncentráció mért értékeinek esetében:
 - ha az oxigéntartalom 17 tf % alá csökkenhet, folyamatos mérés szükséges,
 - ha az oxigéntartalom a 17 tf %-ot nem éri el, izolációs légzésvédőt kell alkalmazni.
- Ha a mért koncentráció a megengedett értéknél kisebb és egyértelmű, hogy a munkavégzés során nem változik, akkor csak a beszállás előtt kell elvégezni a mérést, de ha a szennyezettség dúsulhat, akkor munkavégzés során meg kell ismételni a légtérelmezést.
- A folyamatos légtérmérés elvégzése, valamint a személyi légtérmérő eszköz biztosítása a beszállást végző vállalkozó feladata és felelőssége, de a beszállás engedélyéhez szükséges előkészítés során végzett légtérelmezést az engedélyező üzemeltető végezteti el.

7. A munkavégző (engedélyt kérő) által betartandó, alkalmazandó biztonságtechnikai előírások, minimálisan alkalmazandó védőeszközök:

- Ebben a pontban két csoportra oszthatjuk a szükséges adatok megadását, egyrészt a munkaeszközökre, a kollektív védelemre, egyéb védelmi eszközökre és eljárásokra, továbbá az egyéni védőeszközök típusaira.
- Ha a részletes műveleti utasítás rendelkezésre áll, akkor annak számát, azonosítóját fel kell tüntetni az engedélyben, ugyanez vonatkozik a mentési tervre is.
- Meg kell adni a tűzveszélyes tevékenység során alkalmazható tűzoltó eszközöket (típusát, darabszámát), továbbá robbanásveszélyes közeg esetében használható munkaeszközöket, villamos berendezéseket. A beszállási engedélyt kiadó üzemeltetőnek az egyéni védőeszközök esetében a beszálláshoz szükséges védőeszközöket kell meghatároznia, a munkát végző pedig a berendezésben, zárt térben végzett munkához határozza meg azokat. Ellenben mindkét félnek egyeztetni szükséges az egyes védőeszközök tekintetében azok kompatibilitását, használhatóságát (pl. légzésvédelem esetében az álarc és az arc- vagy szemvédelem együttes alkalmazhatóságát).

8. A tevékenység befejezése, az engedély lezárása

- A beszállás végeztével a beszállást végző és az engedélyt kiadó értékeli a munkavégzést, az esetleges veszélyhelyzeteket, és aláírásukkal lezárják a beszállási engedélyt.
- A munkavégzés rendkívüli lezárására is sor kerülhet, amennyiben a beszállási engedélyben kikötött feltételek nem teljesülnek, a beszállás közvetlen veszélyeztetéssel jár.
- Abban az esetben, ha a munkavégzés folytatódik (másik napon vagy műszakban), és új engedély kiadására van szükség, akkor azt is jelölni szükséges.

Az engedély megadja, hogy mely személy vagy személyek felelősek a munka koordinálásáért és a beszállást végző munkavállalóknak adott utasításokért. Igen fontos eljárási folyamat lehet, hogy a munkaengedélyt mindig ellenőrzi egy második személy, aki átolvassa azt, és megerősíti, hogy az engedélyben megadott biztonsági intézkedések megfelelőek, majd ellenjegyzí – ezt nevezik „négy szem elv”-nek. A munkabiztosági szakember részvétele a beszállásos munkák ellenőrzésében ezek alapján fontos szempont lehet.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Veszélyes berendezésbe beszállni, ott munkát elkezdni csak a rendeltetésszerűen azt használó üzemeltető által kiállított beszállási engedély alapján, valamint a munka irányításával, illetve állandó ellenőrzésével megbízott vezető jelenlétében szabad.

A beszállással végzett munka nem megfelelő előkészítésének, a beszállási engedély nem szabályos kiadásának egyenes következménye a munkabaleset vagy akár a haláleset is. A beszállásos munkák nagy száma miatt sok esetben rutinszerűvé válik az engedély kiadása, rosszabb esetben el is maradhat. A víziközmű-társaságok a beszállási engedélyek kiadásához útmutatót, kitöltési segédletet nem alkalmaznak, viszont ezzel a munkahelyi vezetőknél – főleg kellő tapasztalat és ismeret hiányában – „előre kódolt” a hibázás lehetősége. Az eseti feladatok (például csőtörés, havária jellegű javítások) minél gyorsabb elvégzésének kényszere miatt a helyszíni ellenőrzések elmaradhatnak, az előkészítés, leválasztás vagy a légtérelmezés kihagyásával is megtörténhet a beszállás. A dolgozók nem megfelelő felkészítése, a szükséges védőeszközök biztosításának hiánya miatt az ellenőrizetlen munkavégzés súlyos következményekkel járhat.

Az, hogy a beszállásos munka mennyire biztonságos, tehát nagymértékben függ attól, hogy a munkáltató eleget tett-e jogszabályi kötelezettségének, a beszállási engedély szabályos kiadásának. Másrészt függ az engedélyt kiadók felkészítésétől, szakmai tapasztalatától, valamint attól is, hogy a munkavégzési engedély kiadásának eljárását a munkáltató megfelelően szabályozza. A dolgozatban részletezett előírások és feltételek megismerését követően a mellékletben található beszállási engedély és annak kitöltési útmutatójának használatával a víziközmű-társaságok megfelelő gyakorlatot tudnak bevezetni a beszállással végzett munkák engedélyezésére.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Feicht Ferenc, Veszélyes berendezésekben, zárt terekben beszállással végzett munkákhoz ajánlott védőeszközök és felszerelések, FeWe Biztonságtechnikai Kft., pp 1–15., 2015
- [2] FGSZ, EBK kódex kivonat – Munkavégzés engedélyezése és felügyelete, 2018
- [3] Tasi Miklós, Vállalatirányítási rendszerek, 2012

REPÜLÉSTUDOMÁNYI SZEKCIÓ

Új technológiák a repülőgép-karbantartásban

New technologies in aircraft maintenance

Dr. Békési Bertold^{1*} – Láng Károly²

¹Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, 5008 Szolnok, Kilián u. 1., bekesi.bertold@uni-nke.hu

²MH 59. Szentgyörgyi Dezső Repülőbázis, 6000 Kecskemét Reptér út 4., langkarez@gmail.com

Összefoglaló: A karbantartásra fordított pénz teszi ki a légi járművek üzemeltetési költségeinek jelentős részét, közvetve pedig hozzájárulhat a késésekhez vagy a járatok törléséhez. A hosszabb élettartamú repülőgépek és tartósabb hajtóművek ellenére a légitársaságok napjainkban többet költenek a karbantartásra, mint tüzelőanyagra vagy személyzetre. Fontos, hogy a repülő eszközöket úgy tartsuk üzemben, hogy a karbantartási, javítási és nagyjavítási költségek csökkenjenek. A légi járművek üzemeltetői a gyorsabb hibaelhárítást, a repülőgép öndiagnosztikai rendszereinek fejlesztését sürgetik az állásidő csökkentése érdekében.

Kulcsszavak: karbantartás, MRO, a jövő hangárja, kiterjesztett/vegyes valóság

Summary: Maintenance accounts for a significant portion of aircraft operating costs and may indirectly contribute to delays or cancellations. Despite longer-lasting aircraft and more durable engines, airlines today spend more on maintenance than on fuel or crew. It is important to operate aircraft equipment in a way that reduces maintenance, repair and overhaul costs. Aircraft operators are urging faster troubleshooting and the development of aircraft self-diagnostic systems to reduce downtime.

Keywords: maintenance, MRO, hangar of future, augmented/mixed reality

1. BEVEZETÉS

Egy normál gyártóüzemben két elsődleges csoport van: a termelés (vagy üzemeltetés¹) és a karbantartás². Gyakori, hogy a köztük lévő viszonyban feszültség, néha egyenesen ellentét van. A karbantartás és a gyártás ugyanazt a célt szolgálja, de teljesen más irányokból közelíti meg [1]. A karbantartás-irányítás célja a meghibásodások káros (negatív) hatásainak csökkentése és a termelési rendszer rendelkezésre állásának maximalizálása a lehető legkisebb költséggel [2].

A karbantartás nem ugyanolyan fontos, mint a termelési folyamatok, mivel a karbantartás pénzköltséggel jár, míg a termelés pénzt hoz a vállalkozásoknak. Ez a gondolatmenet nem pontos a karbantartást, javítást, felújítást (MRO³) szolgáltatók esetében, mivel ezek a vállalatok a karbantartási, javítási és nagyjavítási szolgáltatásaikat termékként kínálják, így a repülőgépek működésének, megbízhatóságának és légi alkalmasságának biztosítása érdekében a légitársaságok igénylik ezeket a szolgáltatásokat, sőt támaszkodnak rájuk. A Covid-19 negatív hatásai ellenére a Nemzetközi Légi Szállítási Szövetség (IATA⁴) előrejelzése szerint 2023-ra a globális utasszám várhatóan meghaladja a vírus előtti szintet (105%) [3].

A légi forgalom várható növekedése megnöveli a karbantartási munkacsomagok és tevékenységek számát, így az MRO-vállalatoknak nagyobb terhelést kell majd kezelniük, mivel ma már sok légitársaság a karbantartási szolgáltatások kiszervezését választja. A kiszervezés célja a munkaerő-, képzési, szerszám- és eszköz-költségek csökkentése [4]. Egy MRO létrehozása egy légitársaságon belül magas beruházási tőkét igényel, amely egyes vállalatok számára nem feltétlenül áll rendelkezésre, ezért a karbantartási szolgáltatások kiszervezésével az üzemeltetők a figyelmüket az alapkompenciájuk körébe tartozó műveletekre összpontosíthatják, miközben tudják, hogy a legjobb technológiákat és a leghatékonyabb képességeket használják fel flottájuk karbantartásához.

A hozzáadott munkaterhelés mellett az MRO területén még mindig nagy a technológiai fejlődési potenciál és az innovatív folyamatok lehetősége, amelyek egy MRO-vállalatot megkülönböztethetnek az azonos régióban működő többi vállalattól. Minél fejlettebb egy vállalat, annál jobban tudja kezelni a növekvő piacot, és annál jobban tud versenyezni más nagy MRO-létesítményekkel vagy akár a gyártókkal. A cél annak biztosítása, hogy egy repülőgép, hajtómű, légszűrő

¹ Az üzemeltetés a technikai eszközök használatának, különböző szintű kiszolgálásának és javításának összetett folyamata. Az üzemeltetés során az üzemeltetők használják, tárolják, az üzemben tartás keretében kiszolgálják (karbantartják), javítják a technikai eszközöket [5].

² A technikai eszközökön, illetve egyes anyagokon végzett, olyan megelőző jellegű tevékenység, amely az üzemkész állapot fenntartására irányul a megbízhatóság szinten tartásán keresztül. A karbantartás magában foglalja a tisztítást, a kenést, a festést, a megadott szintű ellenőrzéseket és a bizonyos szintű beszabályozásokat. Célja a használat utáni megtisztítás, állagkezelés a jövőbeni biztonságos működés garantálása érdekében [6].

³ Maintenance Repair Overhaul

⁴ International Air Transportation Association

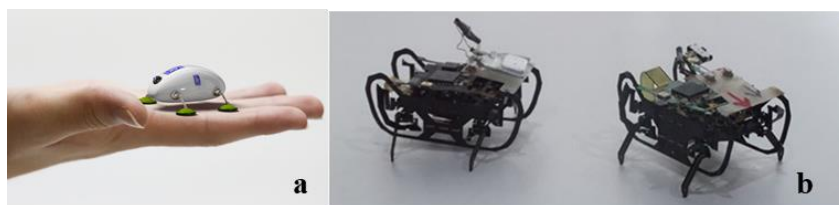
vagy bármely más alkatrész biztonságosan repülhessen, illetve a Szövetségi Légügyi Hivatal (FAA⁵) vagy az Európai Unió Repülésbiztonsági Ügynöksége (EASA⁶) által meghatározott szabályoknak és előírásoknak megfelelően használják.

Az eredeti alkatrészt gyártók (OEM⁷) és az MRO-tevékenységet végzők, a beszállítók számos innovatív technológiával és technikai újítással reagálnak a felmerült követelményekre. Ezek a közelmúltban kifejlesztett és a digitális támogatás robbanásszerű fejlődésével egyre kifinomultabbá váló újítások, mint például a robotok, drónok, a virtuális, a kibővített vagy a vegyes valóság használatán alapuló segédeszközök, amelyek betörték a légijármű-karbantartás piacára is. A gépi tanulást, a neurális hálózatokat, a mesterséges intelligenciát, a 3D nyomtatást, az adalékanyagok gyártását segítő technológiák pedig közelkerültek a napi használhatóság szintjéhez [7]. Ezen új szisztematikus módszerek napi munkafolyamatok működésébe történő integrálásával a munka hatékonyabban és pontosabban végezhető, miközben minimalizálható a repülőgépek földi tartózkodási ideje, valamint a szükségtelen költségek és kapacitások. A több folyamatban lévő fejlesztés vagy már alkalmazott technológia közül kiemelünk néhányat, amelyeknek célja a gyorsabb és olcsóbb légijármű-karbantartás.

2. VIZSGÁLÓ ROBOTOK ÉS DRÓNOK

Manapság a kereskedelmi repülőgépek tipikus szemrevételezése akár több órát is igénybe vehet. A robotok és a drónok drámai módon csökkenthetik ezt az időt, miközben nagyobb pontosságot kínálnak az ellenőrzéseknél, felszabadítják a mérnökök idejét, csökkentik a karbantartási költségeket, és növelik a biztonságot.

A Rolls-Royce által vezetett projekt az (ATI⁸) támogatásával új repülőgépszerviz-technológiákon dolgozik. Ilyen például a bogarak ihlette hajtómű-ellenőrző robot, amely a tervek alapján körülbelül 10 mm átmérőjű lesz (1.a ábra), a sétáló bogarak prototípusa kb. 4,5 cm-es és 1,5 g-os (1.b ábra) [8].



1. ábra. Rolls-Royce hajtómű-ellenőrző robot a) tervezett [9] és b) prototípus [10]

A projekt célja az égéstér ellenőrzésének forradalmasítása. A hajtómű-karbantartáshoz a SWARM⁹ robotokat az égéstérbe fecskendezik (2. ábra). Az égéstér egyetlen kamerával történő ellenőrzése több órát is igénybe vehet. Ehelyett azt az ötletet dolgozták ki, hogy a miniatűr kamerarobotokat rajban alkalmazzák, melyek egymással kommunikálva térképezhetik fel a hajtómű belsejét, hibákat, elváltozásokat keresve, a hajtómű leépítése nélkül. Tehát a miniatűr sétáló „kamerabogarak” csoportját helyeznék be a hajtómű közepébe. A miniatűr kamerákkal felszerelt mikrorobotbogarak ezután átkúsznak az égéskamrán, és együttműködve szemrevételeznek a nehezen elérhető területeket. Ezt az információt azután élő videó segítségével küldik vissza a kezelőnek. Hagyományos módon ez az ellenőrzés akár öt órát is igénybe vehet, ezzel az új eljárással mindössze öt percre tart majd. A Rolls-Royce által fejlesztett robotok egyes példányait képessé akarják tenni például a kompresszorsérülések kijavítására is. Ezeket a robotokat a gyári szakemberek akár a gyárból távirányítással tudnák vezérelni, így az ellenőrzési, javítási, utazási költségek jelentősen csökkennének. A Rolls-Royce, a Harvard Egyetem és a Nottinghami Egyetem közös projektje, a SWARM egyelőre még mindig a fejlesztés korai szakaszában van [7] [11].



2. ábra. Rolls-Royce endoszkópszerű „kígyórobotja” lerakja a SWARM robotokat [8]

⁵ Federal Aviation Administration

⁶ European Union Aviation Safety Agency

⁷ Original Equipment Manufacturers

⁸ Aerospace Technology Institute: Repülés- és Űrtechnológiai Intézet

⁹ Smartly-assembled Wiki-style Argument Marshalling: Okosan összeállított Wiki stílusú érvelésrendezés

A robotok MRO-ellenőrzéshez való használatának előnye, hogy szétszerelés nélkül hozzáférhetnek a repülőgépszerkezeteken belül megerősített terekhez – roncsolásmentes ellenőrzés (NDI¹⁰). Az OC Robotics a Dayton állambeli Wright-Patterson légitámaszponton működő amerikai légierő kutatólaboratóriumával (AFRL¹¹) együttműködve egy NDI kigyókaros robotrendszert fejleszt ki. A távélérésű, roncsolásmentes kiértékelő rendszer (RANDE¹²) egy rugalmas, robotizált kigyókaros eszköz (akár 20 szabadságfokot is elérő), amely szűk és nehezen megközelíthető területekre is képes benyúlni, ahol kereshet sérüléseket és elvégezheti a szükséges ellenőrzéseket [11] [13].

Az EasyJet és a Thomas Cook Airlines kísérleteket végzett az MRO Drone [14] által kifejlesztett autonóm drónokkal.¹³ Ezek 30 perc alatt meg tudják vizsgálni egy keskeny törzszű repülőgép külső felületét, de ugyanez a vizsgálat egy széles törzszű repülőgép esetében sem tart tovább egy óránál. A nukleáris reaktor ellenőrzéséből kölcsönzött technológiát használva a távoli automatizált repülőgép-ellenőrző rendszer, a RAPID¹⁴ (3. ábra) bizonyos struktúrákat is megvizsgálhat, például egy madárral történt ütközés bejelentése után. A koncepció egy korábbi, távoli intelligens sugázmérő berendezés, a Blue Bear a RISER¹⁵ projektből származott, amely drónokkal 3D-s képeket készített a sérült vagy szennyezett területekről, például a fukusimai atomerőműről. A minimális kezelői képzettséggel és korábbi drónozási tapasztalattal nem rendelkező személyzet általi üzemeltetésre tervezett RAPID gyorsan megszerezheti az ellenőrzési adatokat, amelyek elemezhetők és továbbíthatók a légitársaság jelentési rendszerei segítségével. Egy nagy felbontású képalkotó rendszer akár 1 mm²-es részletet is képes rögzíteni.



3. ábra. RAPID MRO felületvizsgáló repülő drón [14]

A zürichi székhelyű SR Technics az Invert Robotics [15] [16] robotját használja, amely szabadalmaztatott szívó mechanizmust alkalmaz ahhoz, hogy mindenfajta felületen megtartsa magát és haladni tudjon, beleértve az alumíniumot, az üveget és a szénszálat is (4. ábra) [7].



4. ábra. Az SR Technics felületvizsgáló robotja [16]

A robot még a repülőgép nedves felületén vagy fejjel lefelé, a gép alján is képes haladni. Minden robot fel van szerelve egy ellenőrző kamerával, amely képes rögzíteni és továbbítani a videófelvételeket a földön tartózkodó mérnököknek, akik a képek segítségével észlelhetik, hol van szükség javításra, és rögzíthetik a repülőgép állapotát az idő múlásával. A nagy felbontású kamerák képesek felmérni a felületeken olyan hibákat, mint például gödrök és repedések, amelyek az emberi szem számára nem észlelhetők. A robotok további szenzorokkal is felszerelhetők az ultrahangos és termográfiai teszteléshez – különösen hasznosak a kompozit alkatrészekből készült repülőgépek sérüléseinek észleléséhez, amelyek szemrevételezéssel sértetlennek tűnhetnek, de belül megsérülhetnek [11].

3. A JÖVŐ HANGÁRJA

¹⁰ Non-Destructive Inspection

¹¹ US Air Force Research Laboratory

¹² Remote Access Nondestructive Evaluation

¹³ A működésükhöz szükséges információkat a környezetükből gyűjtik, szenzorok segítségével érzékelik pozíciójukat, és egy döntési folyamat eredményeként működésüket, helyzetüket, mozgásukat a háromdimenziós térben korrigálják [19] [20].

¹⁴ Remote Automated Plane Inspection and Dissemination

¹⁵ Remote Intelligent Survey Equipment for Radiation

Az Airbus jövőbeli hangárja (HoF¹⁶) a különböző technológiákat ötvözi a karbantartási tevékenységek digitalizálása és automatizálása érdekében, ezzel növelve a karbantartási folyamat hatékonyságát [17] [18].

A HoF ötvözi az innovatív technológiák és az okoseszközök (IoT¹⁷) használatát, mint például a „cobots”, drónok, lapolvasók, kamerák, NDT¹⁸-szenzorok a repülőgép műszaki dokumentációjával és a repülőgép üzem közbeni adataival [21] az Airbus nyílt adatplatformján, a Skywise¹⁹-en [23] összesítve [7]. A teljes rendszer még nem üzemképes, de a rendszer elemei már tesztelés alatt vannak, és működőképeseek. A következő ábrákon egy hibafeltárás és hibajavítás folyamata látható (5. ábra).



5. ábra. A jövő hangárja [18][24]. Szerkesztette és a videó alapján készítette Dr. Békési Bertold

Az Air-Cobot robot (6. ábra) egy földi vizsgálóegység, melyet össze lehet kötni egy repülő drónnal, így egy kétórás hagyományos átvizsgálás elvégezhető 15 perc alatt [24].

¹⁶ Hangar of Future

¹⁷ Internet of Things

¹⁸ Non-destructive Testing: Roncsolásmentes anyagvizsgálat

¹⁹ A Skywise az első nyílt adatplatform, amelyet az Airbus fejlesztett ki a repülési ipar számára. A megfelelő információk megfelelő időben történő rendelkezésre állása a célja.



6. ábra. Air-Cobot felület-ellenőrző egység földi robotja [18]

4. KITERJESZTETT ÉS VEGYES VALÓSÁG

Végül, de nem utolsósorban a sok nagy fejlesztő cég közül egy magyar fejlesztést emelnék ki. Az AerinX [25] által fejlesztett, kiterjesztett valóságon (AR/MR²⁰) alapuló rendszer a repülőgépek és más légi közlekedési eszközök külső felületi átvizsgálását és az ehhez kapcsolódó karbantartási feladatokat lényegesen egyszerűbbé, gyorsabbá és precízebbé teszi (7. ábra), mint korábban. A rendszer rögzíti a korábban feltárt hibákat, automatikusan rögzíti az új felületi sérüléseket, és egyben értékeli is azokat. Ez azt jelenti, azonnal eldönthető, hogy a sérülés mérete igényel-e azonnali beavatkozást, vagy a sérülés tűréshatáron belül van, így a gép forgalomban maradhat a következő időszakos javításig. Az AerinX által kifejlesztett rendszer így 80%-kal rövidebb átvizsgálási idővel és éves szinten 70 000 \$ költségmegtakarítással számol repülőgépenként. A rendszert, mely jelentősen csökkenti az emberi tévedés lehetőségét, az Aeroplex of Central Europe tesztüzemben kezdte el használni 2019 év végén, az eddigi tapasztalataik pozitívak [25] [26] [27].



7. ábra. Az AerinX kiterjesztett valóságon alapuló rendszere [26]

5. BEFEJEZÉS

Jelentős innovatív robotikai kutatásokat végeztek minden iparágban az elmúlt években, évtizedben. A bemutatott robotrendszerek természetesen rendelkeznek előnyökkel és korlátokkal. Az elmúlt években a légi közlekedési ipar jelentős előrelépést tett a légi járművek külső NDT-ellenőrzése felé, a repülőgépek külső vizsgálatára, bár egyre nagyobb az érdeklődés a belső ellenőrző robotok iránt. Jelenleg a moduláris kígyórobotok a leggyakrabban kifejlesztett konstrukciók, a belső, összetett terekbe szánt robotok rugalmasságuknak és miniatűr méretüknek köszönhetően kiválóan alkalmazhatók, amint azt az OC Robotics és a Rolls-Royce példái is szemléltettek. A robotrendszerek miniatürizálásának ötlete a kutatók érdeklődését is felkeltette, mivel egyik nagy előnyük, hogy a robotrendszerek képesek lesznek szűk helyeken mozogni, 40–100 mm átmérőjű területeken is, amelyek számos alkalmazás szempontjából létfontosságúak és

²⁰ Augmented Reality/Mixed Reality

fontosak. A robotrendszerek másik kihívása a rugalmasság, mivel ezek elsősorban merev szerkezetek, amelyek nem elég rugalmasak a manőverezéshez a szűk helyeken. Ezen eszközök alkalmazása megoldhatja ezt a kihívást. Számos előnye és célja van a robotikai rendszerek beépítésének: a napi feladatok, a gyártás és a karbantartás során, mivel képesek csökkenteni az ismétlődő feladatokra fordított időt, és az emberi kezelők számára fárasztóak, ugyanakkor nagyfokú pontosságot alkalmaznak. A robotrendszerek alkalmazása a veszélyes terekben az MRO számára is előnyökkel jár, mivel a biztonság és az emberek által végzett karbantartások, javítások magas szintű kockázatot jelentenek ezeken a területeken, amelyet a robotrendszerek nagymértékben csökkenthetnek. Összességében ebből következően a fő hangsúlyt az ilyen berendezések kutatására és alkalmazására kell fordítani. A bemutatott „legmodernebb” robotikai rendszerek áttekintése kiemeli néhányat a sokféle technológia közül, amelyek a komplex rendszerek létrehozása során a követelmények teljesítése érdekében a különböző ágazatokban használhatók [13].

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] William Jacobyansky: Maintenance vs. Production: How to Mend the Relationship, [Online]. Available: <https://www.reliableplant.com/Read/31692/maintenance-production-relationship>
- [2] Hans Löfsten: Measuring maintenance performance – in search for a maintenance productivity index, *International Journal of Production Economics*, vol. 63, no. 1, pp. 47–58, 2000. [Online]. Available: <https://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/21906.pdf>
- [3] Brian Pearce: IATA forecasts solid long-term aviation recovery; urges digitisation of passenger processing, *The Moodie Davitt Report*, May 27, 2021. [Online]. Available: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/an-almost-full-recovery-of-air-travel-in-prospect/>
- [4] Colin G. Drury, Kathryn P. Guy, and Caren A. Wenner: Outsourcing aviation maintenance: human factors implications, specifically for communications, *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 20, no. 2, pp. 124–143, 2010. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10508411003617771?needAccess=true>
- [5] Békési Bertold: A katonai repülőgépek üzemeltetésének, a kiszolgálás korszerűsítésének kérdései. PhD (Disszertáció), Budapest, 2006. 126 p.
- [6] Krajnc Zoltán: *Hadtudományi Lexikon. Új kötet.* Dialóg Campus, Budapest, 2019. pp. 516–517.
- [7] Uniting Aviation: The future of MRO: emerging technologies in aircraft maintenance, [Online]. Available: <https://unitingaviation.com/news/capacity-efficiency/the-future-of-mro-emerging-technologies-in-aircraft-maintenance/>
- [8] Rolls-Royce demonstrates the future of engine maintenance with robots that can crawl inside engines, [Online]. Available: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/17-07-2018-rr-demonstrates-the-future-%20of-engine-maintenance-with-robots.aspx>
- [9] James Fosdyke: Rolls-Royce's Micro Robots Will Help Maintain Planes' Engines, [Online]. Available: <https://www.motor1.com/news/264159/rolls-royce-micro-robots-engines/>
- [10] Bill Read: Send in the robots, [Online]. Available: <https://www.aerosociety.com/news/send-in-the-robots/>
- [11] Bill Read: Flying, clinging and crawling – using robots in MRO, [Online]. Available: <https://www.aerosociety.com/news/flying-clinging-and-crawling-using-robots-in-mro/>
- [12] Holly Jordan: Robotic arm tool poised to save costly inspection time. [Online]. Available: <https://www.mildenhall.af.mil/News/Article-Display/Article/1088209/robotic-arm-tool-poised-to-save-costly-inspection-time/>
- [13] Manpreet Kaur Dhoot, Ip-Shing Fan, Zakwan Skaf: Review of Robotic Systems for Aircraft Inspection. [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3718054
- [14] Drone based aircraft inspection system [Online]. Available: <https://www.mrodrone.net/>
- [15] Emerging technologies in aircraft maintenance: Robots and drones [Online]. Available: <https://www.prescouter.com/2019/12/emerging-technologies-in-aircraft-maintenance-robots-and-drones/>
- [16] Robots driving innovation at SR Technics [Online]. Available: <https://www.srtechnics.com/news/press-releases/2018/02/robots-driving-innovation-at-sr-technics/>
- [17] Digitising maintenance for end-to-end continuity, [Online]. Available: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2018/02/digitising-maintenance-for-end-to-end-continuity-.html>
- [18] Hangar of the future, [Online]. Available: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2016/12/Hangar-of-the-future.html>
- [19] Szegedi P., Békési B.: Sensors on board of the Unmanned Aerial Vehicles, In *Proceedings of 19th International Scientific Conference Transport Means*, Kaunas, 2015. pp. 219–222.
- [20] Szegedi P., Békési B.: Az UAV-on alkalmazható szenzorok, in *XIV. Természet-, Műszaki és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia*. Szombathely, Nyugat-magyarországi Egyetem, 2015. pp. 175–182. [Online]. Available: http://publicatio.nyme.hu/613/1/TTK_14_Nemzetkozi_Konf_Eloadasok_201500516.pdf
- [21] Purdue University. Hangar of the Future (HOF), [Online]. Available: <https://polytechnic.purdue.edu/facilities/hangar-of-future-hof>

- [22] AIRportal.hu, Ilyen lesz a jövő repülőgépkarbantartó-hangárja, [Online]. Available: <https://airportal.hu/ilyen-lesz-jovo-repulogepkarbantarto-hangarja/>
- [23] Unleashing the potential of data,[Online]. Available: <https://www.airbus.com/aircraft/support-services/skywise.html>
- [24] Yulius Yoma: Pimp my hangar with Airbus, [Online]. Available: <https://www.aerotime.aero/articles/16594-pimp-my-hangar-with-airbus>
- [25] Gyári honlap, [Online]. Available: <http://aerinx.com/>
- [26] Szaszin Ede: AerinX: 700 milliós befektetést kapott a magyar légiipari startup, [Online]. Available: <https://markamonitor.hu/2020/07/23/aerinx-700-millios-befektetest-kapott-a-magyar-legiipari-startup/>
- [27] Debreceni Barnabás: Sikeres karbantartóinnovációk az AerinX-től, [Online]. Available: <https://markamonitor.hu/2019/04/09/sikeres-karbantartoinnovaciok-az-aerinx-tol/>

A drónok konfigurációi, alkalmazásai területei

Drone configurations, areas of application

Dr. Békési Bertold^{1*} – Major Gábor²

¹Nemzeti Közszerológálati Egyetem, Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, 5008 Szolnok, Kilián u. 1., bekesi.bertold@uni-nke.hu

²Nemzeti Közszerológálati Egyetem, Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, 5008 Szolnok, Kilián u. 1., major.gabor@uni-nke.hu

Összefoglaló: Napjainkban egyre nagyobb szükség van a különböző képességekkel rendelkező, sokoldalúan használható drónokra mind polgári, mind katonai területen. Jelentős érdeklődés mutatkozik olyan újszerű drónok kifejlesztése iránt is, amelyek képesek autonóm módon, különböző környezetekben és helyszíneken önállóan figyelni és különböző küldetéseket teljesíteni. Az elmúlt évtizedben e drónok széles körű alkalmazási lehetőségei kapták a legnagyobb figyelmet, ami a különböző méretű és tömegű drónok különböző típusainak feltalálásához vezetett. A drónok alkalmazásait osztályozhatjuk keresés és mentés, távérzékelés, építés és ellenőrzés, precíziós mezőgazdaság, áruszállítás, közúti forgalom valós idejű megfigyelése, felügyelet és vezetékek nélküli lefedettség stb. alapján. A cikkben a légi járművekre vonatkozó alkalmazásokat és követelményeket tárgyaljuk annak alátámasztása érdekében, hogy melyik konfiguráció a legalkalmasabb egy adott alkalmazáshoz.

Kulcsszavak: alkalmazások, osztályozás, konfigurációk, drónok

Summary: Today, there is a growing need for drones with a variety of capabilities that can be used for both civil and military purposes. There is also considerable interest in developing novel drones that can autonomously monitor and perform missions in different environments and locations. Over the last decade, the wide range of applications for these drones has received the most attention, leading to the invention of different types of drones of different sizes and weights. The applications of drones can be classified as search and rescue, remote sensing, construction and inspection, precision agriculture, freight transport, real-time monitoring of road traffic, surveillance and wireless coverage, etc. In this article, the applications and requirements of drones are discussed to substantiate which configuration is best suited for a particular application.

Keywords: applications, classifications, configurations, drones

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedek technológiai fejlődésének köszönhetően a pilóta nélküli rendszerek hatalmas fejlődésen mentek/mennek keresztül, ez a folyamat töretlen, sőt viharos. Ezek az eszközök felépítésükben, működésükben csaknem azonosak az ember által vezetett repülőgépekkel, helikopterekkel [1]. A drónok olyan repülő robotok, amelyek között vannak néhány grammos és többtonnás felszálló tömeggel a levegőbe emelkedő, bázisuktól alig százméternyire eltávolodni képes, valamint akár a kontinensek közötti távolságok átszelésére is alkalmas konstrukciók. Napjainkra kialakultak a merev, a forgó-, sőt a csapkodó szárnyú kis, illetve a hang sebességét is meghaladó sebességgel repülő változataik. A merev szárnyú modell kialakítása megfelel a repülőgépekének, ahol a felhajtóerő a levegőbe emelkedve az előrehaladó szárnyakon keletkezik. Ami a forgószárnyas csoportba tartozókat illeti, működési elvük megegyezik a helikopterekével, tehát az alkalmazott forgószárnylapátok – mint szárnyak – forgás következtében termelnek szükséges felhajtóerőt [2] [3] [4] [5].

Az emberi kezelőszemélyzet nélküli, távolról vagy autonóm módon működő [2], [6] halálos vagy nem halálos hasznos terhet hordozó légi járművek szintén drónoknak minősülnek [7]. A működésükhöz szükséges információkat a környezetükből gyűjtik, szenzorok segítségével érzékelik pozíciójukat, és egy döntési folyamat eredményeként működésüket, helyzetüket, mozgásukat a háromdimenziós térben korrigálják [8] [9]. A ballisztikus vagy félballisztikus járművek, a robotrepülőgépek, a tüzérségi lövedékek, a torpedók, az aknák és a műholdak ugyanakkor nem tekinthetők drónoknak [10].

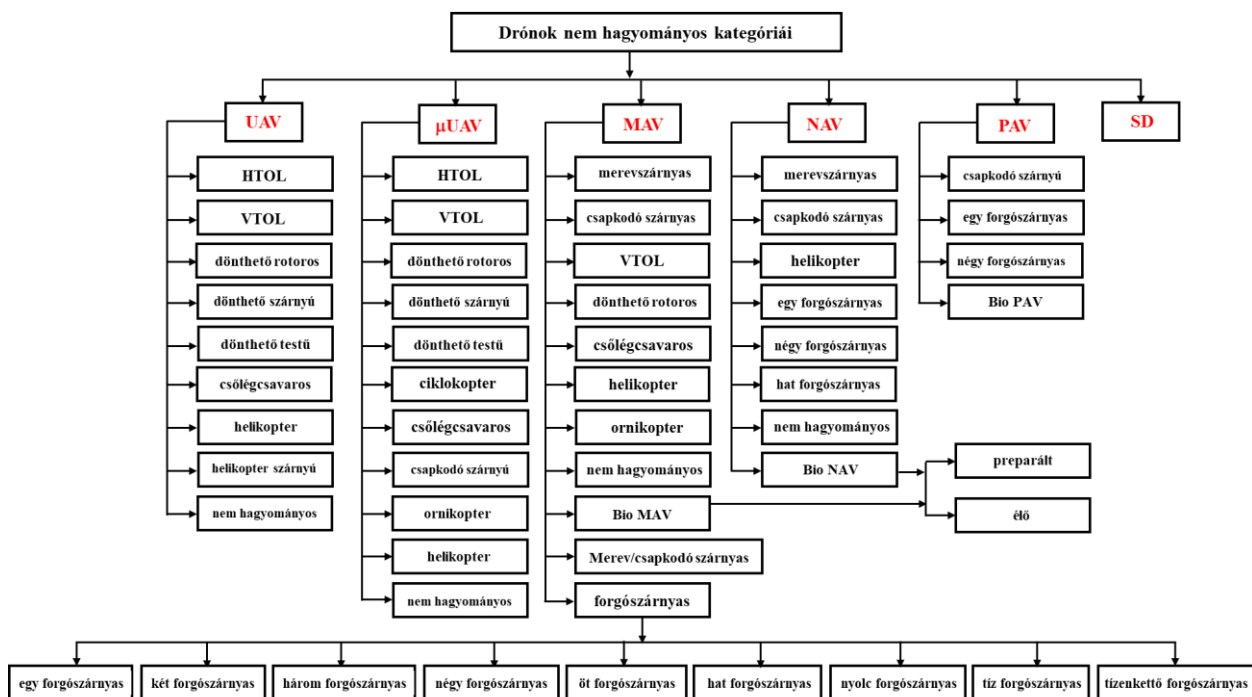
Tehát a ma drónjai, a bombákat hatástalanító robotoktól a mini tengeralattjáróig, a hajófedélzetről indítható felderítő helikopterektől a nagy magasságban tevékenykedő, precíziós támadásokat végrehajtó légi eszközökig a legtöbb esetben a feladatuk végrehajtása, illetve az arra történő felkészítésük (mérnökök, illetve szakemberek által végzett tevékenység) során is igényelnek emberi beavatkozást. Továbbra is szükséges az emberi felügyelet a teljes küldetés ideje alatt, és fokozottan igaz ez a célok kijelölésére. A tudósok szerint rövidesen, de talán még nem a közeli jövőben a mesterséges intelligencia fejlettsége eljut arra a szintre, hogy a drónok olyan, az embertől független döntéseket hozzanak, amelyek kihatással lehetnek életre és halálra. A jelenlegi kutatások középpontjában a „tüzelj és felejtse el” képesség fejlesztése áll, amely a drónokat olyan feladatok elvégzésére teszi alkalmassá, mint például hogy sokáig, órákon át elhúzódóan legyenek a cél közelében, elemezve és várva az alkalmat, hogy majd a másodperc törtrésze alatt döntsenek nemcsak a csapásról, hanem a lehetőségének bekövetkezéséről is [11] [12].

A pilóta nélküli légi rendszer tervezésének, földi és légi üzemeltetésének kulcskérdése a repülésbiztonság és a biztonság általában. Az UAV fedélzeti rendszerei redundanciájának kérdéseit Békési és Wühl [13] [14] munkái vizsgálják, és adnak válaszokat a felmerülő biztonsági kihívásokra. Az UAV megbízhatóságának vizsgálatát [15] [16] [17] [18], a különböző sárkányszerkezeti kialakításokat [2] [3] [4] [10] [19] [20] [21] és a jövőbeni lehetséges megoldásokat a [22] [23] [24] irodalmak foglalják össze.

2. A DRÓNOK OSZTÁLYOZÁSA

Az UAV-k kategorizálásának célja általában az, hogy valamilyen kritériumok szerint rendezett és egységes képet nyújtson a további vizsgálatokhoz [2] [25]. A drónok különböző paraméterek alapján különféle osztályozásokkal rendelkeznek. A felhasználók szempontjából a fő jellemzők, amelyek alapján összehasonlítják és kiválasztják az UAV-eket: a repülés időtartama, a hatótávolság, a hasznos teher felhasználhatósága, alkalmazhatósága, illetve fizikai méretei [26], [27]. Fontos szempont a légi járművek esetében, hogy milyen sebességgel képesek repülni, mekkora a hasznos terhelhetőségük, illetve milyen hatótávolságra tudnak eljutni. Ebben az esetben is a légi jármű feladatkörének megfelelően vannak, amelyeket kisebb vagy nagyobb távolságra alkalmaznak, illetve a sebesség tekintetében is, ha a feladatkör azt kívánja, akkor hangsebesség feletti sebességgel repülő légi jármű is rendelkezésre áll már napjainkban [28].

Az 1. ábrán a drónok nem hagyományos kategória szerinti osztályozása látható. A spektrum két végén különböző típusú drónok vannak, mint az UAV (61 m maximális szárnyfesztávolságú és 15 000 kg tömegű) és a legalább 1 mm-es méretű és 0,005 g tömegű intelligens porszem (SD) méretűek. Ezen kategóriák között helyezkednek el a mikro-, pilóta nélküli (μ UAV), mini- (MAV), nano- (NAV) és piko-légijárművek (PAV). Az ábrán látható osztályozás a mikro- és nano-légijárművek biomodelljeit is figyelembe veszi, amelyeket élő, irányítható madarakként vagy rovarokként és repülő preparált (taxidermiás) madarakként határoznak meg [10].



1. ábra. Drónok nem hagyományos kategóriái [10]. Szerkesztette: Dr. Békési Bertold

3. A PILÓTA NÉLKÜLI LÉGI JÁRMŰVEK ALKALMAZÁSAI ÉS A SZÜKSÉGES SPECIFIKÁCIÓK

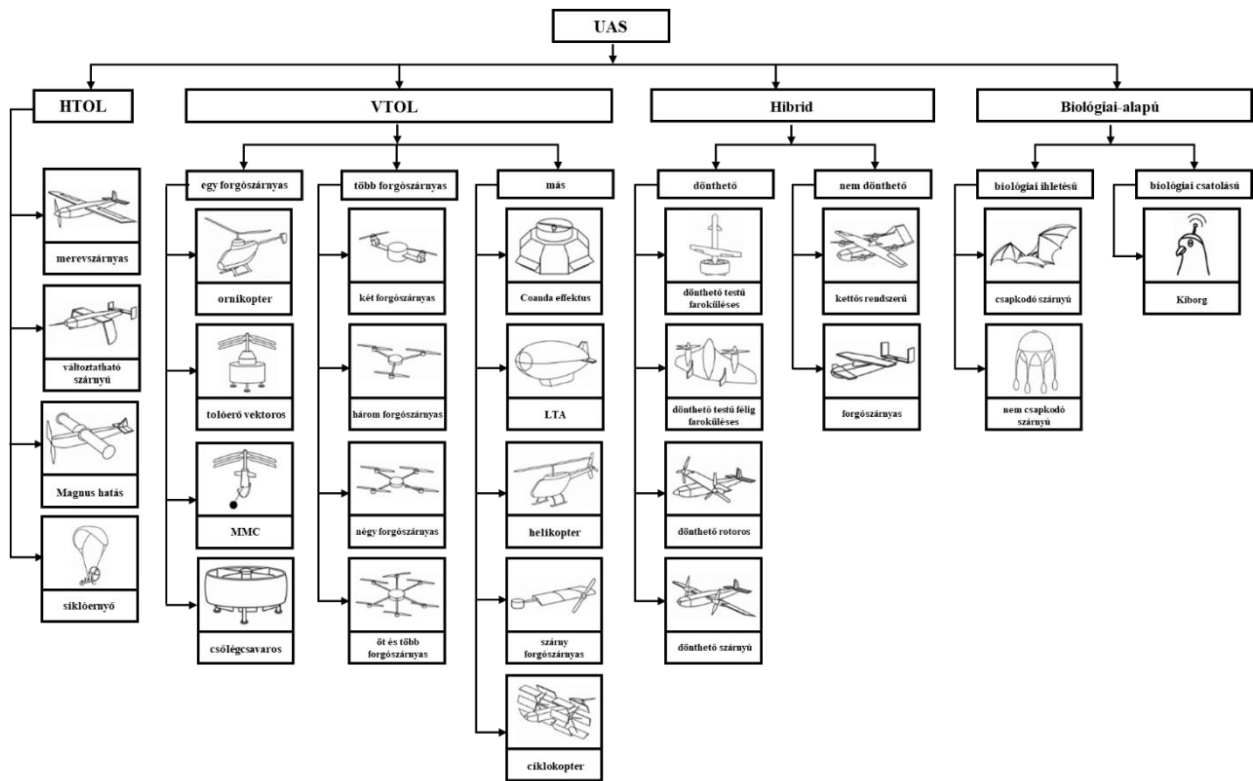
Ebben a fejezetben a légi járművekre vonatkozó alkalmazásokat és követelményeiket tárgyaljuk annak alátámasztása érdekében, hogy melyik konfiguráció a legalkalmasabb egy adott alkalmazáshoz.

3.1. A pilóta nélküli légi járművek rendszereire vonatkozó előírások

A légi járművekre vonatkozó alkalmazások bemutatásához meg kell vizsgálni a légi járművekre vonatkozó előírásokat. Minden egyes alkalmazáshoz saját specifikációk szükségesek. A tipikus előírások, amelyek meghatározzák az UAV egy adott alkalmazásra való alkalmasságát: szerkezeti egyszerűség, méretezhetőség, különböző energiaforrások (SOE¹) hasznosításának képessége (például napenergia, elektromos, kémiai és hibrid energiaforrások), működési

¹ Sources of Energy

magasság és hatótávolság, repülési élettartam, utazósebesség, lebegési képesség, manőverezőképeség és teherszállító kapacitás [21]. A 2. ábra az UAS-ek különböző konfigurációit szemlélteti.



2. ábra. Az UAS-ek különböző konfigurációi [21]. Szerkesztette: Dr. Békési Bertold

A 2. ábrán a különböző típusú, pilóta nélküli légi jármű-rendszerekre vonatkozóan a [21] irodalom a specifikációk minőségi összehasonlítását is tartalmazza (ezek a szerkezet egyszerűsége, a különböző energiaforrások változatossága, skálázhatóság, maximális magasság, maximális hatótávolság, üzemképesség, repülési sebesség, a futópálya igénye, lebegés, manőverezhetőség, teherbírás). Az egyes szakaszokban két kategóriát különböztet meg az egyes jellemzők legalacsonyabb és legmagasabb határértékének, a többi kategóriát pedig ezek közé sorolja alacsony, közepes és magas megjelöléssel. Például a szerkezeti egyszerűség legmagasabb szintjének a merev szárnyú légi járműveket, míg a legalacsonyabb szintjének a csapkodó szárnyasokat és a helikoptereket tekinti. Az összes többi kategória e két (legalacsonyabb és legmagasabb) kategória közé esik. Működési magasságban a legmagasabb szint a levegőnél könnyebb és a merev szárnyú, pilóta nélküli légi jármű-rendszereké, amelyek akár 25 km-es magasságban is repülhetnek, a legalacsonyabb szint pedig a csapkodó szárnyú UAS-oké, amelyek általában 1 km alatti magasságban repülnek [21].

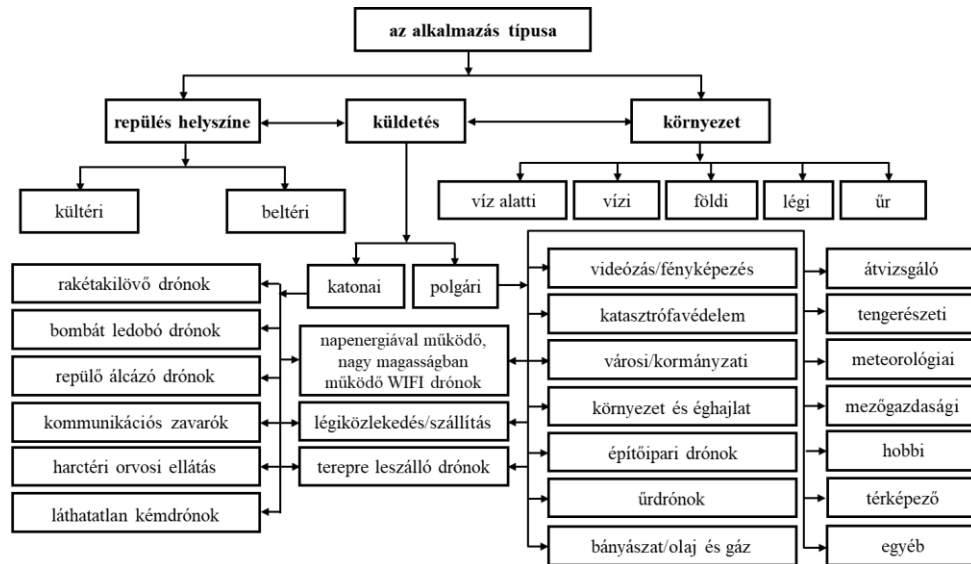
3.2. A légi járművek alkalmazási területei és a szükséges specifikációk

A védelmi ipar talán legfontosabb projektjeinek egyike az elmúlt évtizedben a pilóta nélküli (légi, földi, vízi) járművek fejlesztése. Ahogy a technológia fejlődik, a pilóta nélküli légi járművek (UAV) gyorsan veszik át azokat a feladatokat, amelyek az emberek által vezetett eszközöké voltak, illetve segítenek az emberekre nézve túl nagy kockázatokkal járó feladatok elvégzésében. Néhányan odáig jutottak gondolataikkal, hogy a pilóta által vezetett légi (vagy akár szárazföldi, illetve vízi) eszközöket elavultnak nevezik. Talán még nem érkezett el az idő arra, hogy így vélekedjünk, de az UAV-k szerepe egyre jelentősebb a légi, földi és tengeri műveletekben, tevékenységekben is [11] [29] [30] [31] [32].

A légi járműveket a polgári és katonai műveletek széles skáláján alkalmazzák, ahol kültéri és beltéri feladatokat látnak el különböző környezetekben, a víz alatti (kételtű légi) járművektől az űrről kapcsolatos feladatokig. Különböző érzékelőkkel és kamerákkal szerelhetők fel, hogy megfigyelési, felderítési, kutatási, operatív és hírszerzési feladatokat lássanak el [33]. A légi járműveket különböző módon lehet osztályozni. Alapul szolgálhat a feladat típusa (polgári vagy katonai), a repülési zóna típusa (beltéri és kültéri) és a környezet (víz alatti, vízi, földi, légi, űrbéli). Napjainkban a katonai alkalmazások mellett rutinszerűen alkalmazzák a tűzoltási tevékenységekben, a katasztrófák felmérésében és enyhítésében, a keresésben és mentésben, valamint a multimédia- és mozgóképparban. Alkalmazzák őket a légi megfigyelés minden típusában is, beleértve a rendfenntartást, a terrorizmus elleni műveleteket, a nagyszabású nyilvános szabadtéri rendezvényeket, a fontos

objektumok és nagyon fontos személyek (VIP²) biztonságát, a szárazföldi és tengeri közlekedést, valamint a környezetszennyezés ellenőrzését és megfigyelését. A távközlés, a termésmegfigyelés, az állatfelügyelet, a halászat védelme, az ásványkincsek feltárása, a földi térképezés és fényképezés, a meteorológiai megfigyelés, a csővezetékek és távvezetékek ellenőrzése, a teherszállítás, a postázás és a kiszállítás, a fertőzések terjedése, az emberi fiziológiai, egészségügyi állapot feltérképezése stb. néhány további terület, ahol a légi járműveket alkalmazzák [21] [34].

A drónok alkalmazásainak átfogó osztályozását Hassanalian és Abdelkefi [10] mutatja be, amely a fent említett alkalmazásokat és osztályozásokat párosítja (3. ábra). A drónok alkalmazásait Shakhathreh et al. [35] a következők szerint osztályozták: keresés és mentés, távérzékelés, építés és ellenőrzés, precíziós mezőgazdaság, áruszállítás, a közúti forgalom valós idejű megfigyelése, felügyelet és vezeték nélküli lefedettség.

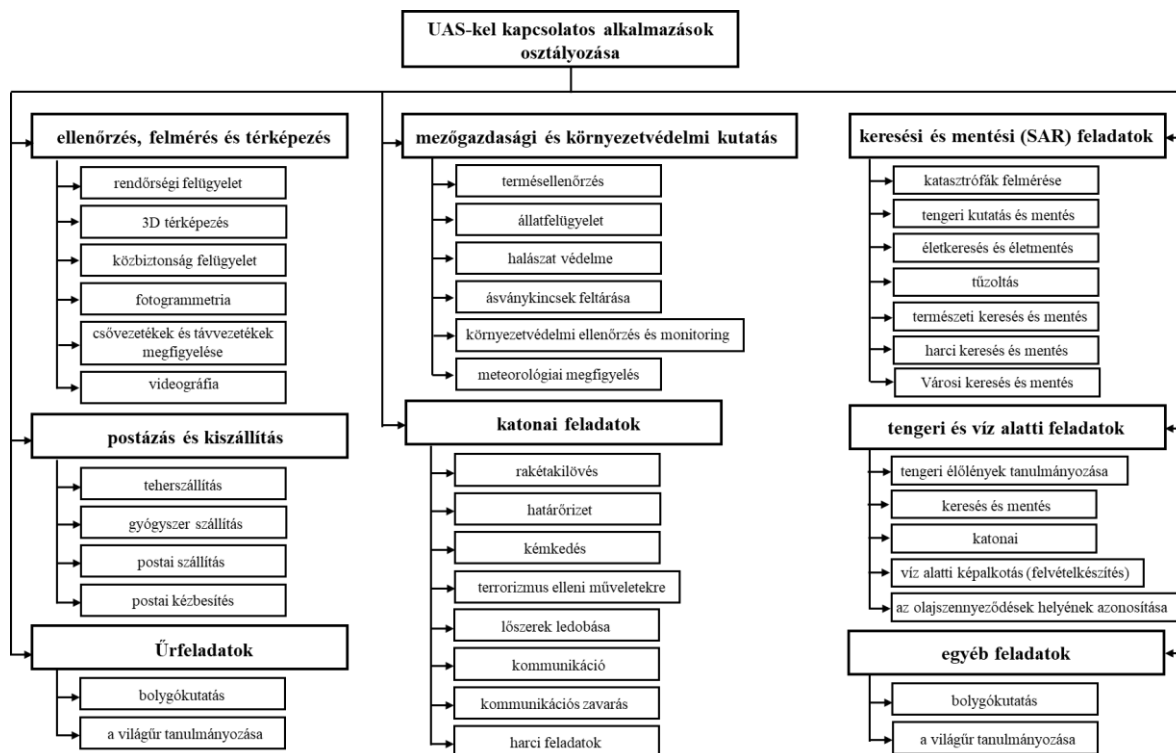


3. ábra. Az alkalmazás típusa alapján [21]. Szerkesztette: Dr. Békési Bertold

A követelmények és a feladatok jellegének hasonlósága miatt az UAS-ek alkalmazásait a következő kategóriák szerint értékeljük: ellenőrzés, felmérés és térképezés; mezőgazdasági és környezetvédelmi kutatás; keresési és mentési (SAR³) feladatok; postai küldemények és egyéb árucikkek kézbesítése; katonai feladatok; tengeri és víz alatti feladatok; űrfeladatok és egyéb alkalmazások (lásd a 4. ábrát) [21].

² Very Important Person

³ Search and Rescue



4. ábra. Az UAS-ekkel kapcsolatos alkalmazások osztályozása [21] Szerkesztette: Dr. Békési Bertold

Ellenőrzés, felmérés és térképezés. A légi robotok használhatóak adatgyűjtéshez számos alkalmazásban, például megfigyelés, ellenőrzés, térképezés és 3D modellezés terén. A klasszikus légi fényképezéshez képest alacsonyabb költségűek, rendszeresen új alkalmazásokat mutatnak be, például a forgó és merev szárnyú drónok különböző típusú kamerákkal képesek fotogrammetriai adatgyűjtést végezni, valamint képesek kontúrok, 3D digitális felületek vagy terepmodellek, texturált 3D modellek és vektoros információk létrehozására egy hatalmas területre vonatkozóan. A térképezéshez használt drónok szükséges fő specifikációi az elfogadható hasznos teherbírás, a szélállóság, az autonóm repülés, a hosszú élettartam és a mobilizálhatóság. A térképezés, a régészet, a mezőgazdaság, az erdészet, valamint az építészeti és környezetvédelmi területek egyik népszerű alkalmazása, továbbá ezek a követelmények az ellenőrzésekre és felmérési feladatokra is felhasználhatók [21].

Mezőgazdasági és környezetvédelmi kutatás. A környezetvédelmi feladatok a felmérésben és az ellenőrzésben foglalhatók össze. A környezetvédelemre kifejlesztett UAV-k többsége kamerával van felszerelve, és lehetővé teszik a kutatók számára, hogy tanulmányozzák, megfigyeljék és nyomon kövessék a vadon élő állatvilágot és az éghajlatváltozás hatásait a nemzeti parkokban, erdőkben, óceánokban és sivatagokban. A légi járműveket a természeti katasztrófák, például erdőtüzek, lavinák stb. vizsgálatára és megfigyelésére is használják. Ezekon túl az amazóniai delfinek felderítésében és a populáció becsléséhez vagy a nagy tengeri állatvilág part mentén történő megfigyelésében is szerepet kapnak. Egyes esetekben az állatok elpusztult vagy preparált testét használják az UAV-k vázaként, hogy az állatok viselkedését zavartalanul nyomon követhessék. Ezek a drónok alkalmazhatóak akár katonai feladatra is, például kémkedés, rejtett megfigyelés céljából. Az ilyen típusú biodrónokat már számos projektben használták [21].

Keresési és mentési (SAR) feladatok. A gyors reagálás elengedhetetlen minden keresési és mentési feladathoz. A drónok mozgékonyak, gyorsak és autonóm módon irányíthatók, és ezek a képességek felhasználhatók a környezet felmérésére és bizonyítékok gyűjtésére. A feladatok során számos korlátozó tényező merülhet fel, például a végrehajtáshoz rendelkezésre álló korlátozott idő, az emberi életek esetleges elvesztése és a barátságtalan működési környezet, pl. katasztrófa helyszínek, erdők stb. Az elmúlt években nagyon sok terv és koncepció került bevezetésre a kereső és mentő UAS-ek számára, beleértve azok vezérlését, útvonaltervezését, forgatókönyveit, képalkotó és emberazonosító algoritmusait, valamint konfigurációi tekintetében. A drónok potenciálisan felhasználhatók különböző természeti és ember okozta katasztrófák és vészhelyzetek, például viharok, árvizek, aszályok, földrengések, vulkánkitörések, tüzek és balesetek esetén [21].

A drónok által végrehajtott keresési és mentési feladatoknak négy típusa létezik, amelyeket a környezetük alapján osztályoznak: természeti, tengeri, harci és városi. A postázás és kiszállítás; katonai, tengeri, víz alatti és űrfeladatok, valamint az egyéb alkalmazások részletezésére a kiadvány terjedelmi korlátai miatt nincs lehetőség, de egy másik cikkben ezt a szerzők megteszik.

5. BEFEJEZÉS

A 4. ábra alapján egy adott alkalmazáshoz/feladathoz illeszkedő UAS-konfigurációk közül a közös követelmények és a megfelelő konfiguráció tekintetében megállapíthatjuk, hogy a merev szárnyú UAS-ek a legnépszerűbb konfigurációk a vállalatok és a kutatók körében, mivel szinte minden alkalmazáshoz megfelelőek, és használhatják is azokat. A második helyen a multitorok és különösen a quadrotorok állnak (még az ürrepülésekhez is bevezettek néhány multitoros konfiguráción alapuló koncepciót). A helikopterek és a hibrid konfigurációk szintén a népszerű konfigurációk közé tartoznak, bár a hibrid UAS-ek az előrejelzések szerint számos előnyük miatt a jövőben népszerűbbek lesznek.

A gyártás, a navigáció, a távvezérlési képességek és az energiatároló rendszerek terén elért fejlődés lehetővé tette a drónok különböző helyzetekben való használatát, ahol az ember jelenléte nehéz, lehetetlen vagy veszélyes. Az elmúlt években a katonai megfigyelésre, bolygó kutatásra és keresésre-mentésre szolgáló repülő robotok kapták a legnagyobb figyelmet. A drónok jelentős előnyei miatt számtalan pályázat foglalkozik e drónok alkalmazásának lehetőségével, mivel a bemutatott és említett jellemzőknek megfelelően számos művelet elvégzésére alkalmasak, többek között felderítésre, járőrözésre, védelemre, teherszállításra és légi közlekedésre is.

A Tématerületi Kiválósági Program TKP2021-NVA-16 azonosítószámú „Alkalmazott katonai műszaki, had- és társadalomtudományi kutatások a nemzetvédelem, nemzetbiztonság területén a Hadtudományi és Honvédtisztképző Karon” című projekt Integrált-mintarepülőter kiemelt kutatási terület Drone Sensor (SEN) kutatócsoport Senior kutatóiként a szerzők az áttekintett irodalmak alapján összefoglalták a légi járművekre vonatkozó különböző alkalmazásokat/feladatokat, valamint a megfelelő követelményeket és előírásokat. Az alkalmazások követelményeit és a különböző konfigurációk specifikációit figyelembe véve az egyes alkalmazásokhoz legmegfelelőbb konfigurációkat a kutatásaink során ezek figyelembevételével alakítjuk ki.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Békési László: A pilóta nélküli légi járművekkel kapcsolatos alapismeretek, Repüléstudományi Közlemények, 28. évf. 3. sz. 2016. pp. 159–176. [Online]. Available: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2016_3/2016-3-11-0354_Bekesi_Laszlo.pdf
- [2] Békési Bertold: Pilóta nélküli légi járművek jellemzése, osztályozásuk, in Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek. Palik M. szerk. Budapest, Nemzeti Közszerződési Egyetem, 2013. pp. 65–109.
- [3] Békési L., Békési B.: Forgószárnyas pilóta nélküli légi járművek, *Economica*, 6. évf. 2. sz. 2013. pp. 88–98. [Online]. Available: <https://doi.org/10.47282/ECONOMICA/2013/6/2/4421>
- [4] Békési L., Békési B.: Merevszárnyú pilóta nélküli légi járművek (UAV-k), *Szolnoki Tudományos Közlemények*, 17. évf. 2013. pp. 7–34.
- [5] Palik M. szerk.: Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek, Budapest, Nemzeti Közszerződési Egyetem, 2013. pp. 7–13. [Online]. Available: www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/UAV_handbook_Secon_edition.pdf
- [6] Major G., „Does an autonomous drone return home at all time?” *Repüléstudományi Közlemények*, 30. évf. 2. sz. 275–284. 2018. [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_2/2018-2-23-0499-Major_Gabor.pdf
- [7] S.G. Gupta, M.M. Ghonge, P.M. Jawandhiya: Review of unmanned aircraft system (UAS), *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 2, Issue 4, April 2013*. (ISSN: 2278 – 1323) [Online]. Available: <https://www.uvuniversity.com/wp-content/uploads/2014/04/Review-of-Unmanned-Aircraft-System-UAS.pdf>
- [8] Szegedi P., Békési B.: Sensors on board of the Unmanned Aerial Vehicles, In *Proceedings of 19th International Scientific Conference Transport Means, Kaunas, 2015*. pp. 219–222.
- [9] Szegedi P., Békési B.: Az UAV-on alkalmazható szenzorok, in XIV. Természet-, Műszaki és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia. Szombathely, Nyugat-magyarországi Egyetem, 2015. pp. 175–182. [Online]. Available: http://publicatio.nyme.hu/613/1/TTK_14_Nemzetkozi_Konf_Eloadasok_201500516.pdf
- [10] M. Hassanalien, A. Abdelkefi: Classifications, applications, and design challenges of drones: A review, *Progress in Aerospace Sciences* 91 (2017) pp. 99–131, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>
- [11] Dr. Békési Bertold, Dr. Szegedi Péter: Napjaink fegyverrendszer fejlesztési trendjei, *Economica (Szolnok)*, 2015. 4/2. szám pp. 158–168. (ISSN: 1585-6216)
- [12] Békési Bertold, Szegedi Péter: Napjainkban fejlesztett fegyverrendszerek megjelenése a jövő hadszínterein, a tudásalkalmazás és fejlesztés szempontjából, *Repüléstudományi Közlemények* 2015/3. pp. 105–116. [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-08-0223_Bekesi_B-Szegedi_P.pdf
- [13] B. Békési, T. Wühl: Redundancy for micro UAVs – control and energy system redundancy, in *Proceedings of the International Conference Deterioration, Dependability, Diagnostics, Brno, Czech Republic, University of Defence, 2012*. pp. 123–130.
- [14] B. Békési: Redundancy on Board of UAVs – Energy Systems, in *Proceedings of the 16th International Conference Transport Means 2012, Kaunas, Lithuania, 2012*. pp. 158–161.
- [15] B. Békési, M. Novák, A. Kárpáti, Gy. Zsigmond: Investigation of the Reliability of UAVs, in *Proceedings of the 16th International Conference Transport Means 2012, Kaunas, Lithuania, 2012*. pp. 101–103.
- [16] Békési B., Novák M., Kárpáti A., Zsigmond Gy.: Egyszerűsített UAV irányító rendszer megbízhatósági vizsgálata, *Repüléstudományi Közlemények*, 2013/2. pp. 224–231.

- [17] Békési B., Papp I., Szegedi P.: UAV-k légi és földi üzemeltetése, *Economica*, 6. évf. 2. sz. 2013. pp. 99–117. [Online]. Available: <https://doi.org/10.47282/ECONOMICA/2013/6/2/4422>
- [18] Békési B., Papp I.: Pilóta nélküli légi járművek megbízhatósága, in *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban*, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Szolnok, 2014. pp. 223–230.
- [19] Békési B.: Pilóta nélküli légi jármű típusok sárkányszerkezeti megoldásai, in *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban*, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 2013. pp. 122–132.
- [20] Békési B.: UAV-k sárkányszerkezeti megoldásai, *Szolnoki Tudományos Közlemények*, 15. évf. 2011. pp. 1–11.
- [21] S. Darvishpoor, J. Roshanian, A. Raissi, M. Hassanalian: Configurations, flight mechanisms, and applications of unmanned aerial systems: A review, *Progress in Aerospace Sciences*. 121 (2020) pp. 1–59, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100694>
- [22] B. Békési, I. Papp: UAV Future Development, in *Proceedings of the International Conference Deterioration, Dependability, Diagnostics*, Brno, Czech Republic, 2013. pp. 63–76.
- [23] Békési B.: UAV-fejlesztések, új alkalmazások, in *Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek*. Palik M. szerk. Budapest, Nemzeti Közszoigalati Egyetem, 2013. pp. 299–315.
- [24] Békési B.: Az UAV-k jövőbeni fejlesztési irányai, in *XII. Természet-, Műszaki és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia*, Szombathely, Nyugat-magyarországi Egyetem, 2013. pp. 101–113.
- [25] Ujjady A., Major G.: „A civil drónszabályozáson innen, a katonain túl” *Repüléstudományi Közlemények*, 33. évf. 2. sz. 167–180. 2021. DOI: 10.32560/rk.2021.2.12 [Online]. Available: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/5596/4738>
- [26] Békési B., Szegedi P.: Pilóta nélküli légi járművek – biztonság vagy fenyegetés. XV. Természet-, Műszaki és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia. Szombathely, Nyugat-magyarországi Egyetem, 2016. pp. 130–141.
- [27] B. Békési, P. Koronváry: Are drones a boon or bane? *Scientific Research and Education in the Air Force – AFASES*, no. 1, 55–64. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.19062/2247-3173.2017.19.1.5>
- [28] Csóré Attila, Major Gábor: A pilóta nélküli légi járművek (UAV) evolúciója. *Repüléstudományi Közlemények*, 33. évf. 1. sz. 2021. pp. 171–191. DOI: 10.32560/rk.2021.1.13
- [29] Békési Bertold, Szegedi Péter: Gondolatok a jövőbeni fegyverek alkalmazási lehetőségeiről. XIV. Természet-, Műszaki és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia, Szombathely, Nyugat-magyarországi Egyetem, 2015. pp. 183–188.
- [30] Major G.: A pilóta nélküli légi jármű rendszerek használata az elektronikai hadviselésben, *Repüléstudományi Közlemények* 29. évf. 3. sz. 309–312. 2017. [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_3/2017-3-22-0490_Major_Gabor.pdf
- [31] Major G.: A természetes vízbázisok jellemzőinek feltérképezése és védelme drónok segítségével. *Polgári Védelmi Szemle* 14.: DAREnet projekt Különszám 2022 pp. 50–63., 14 p. 2022. [Online]. Available: <http://www.mpvsz.hu/pv-szemle>
- [32] Gajdács L., Major G., „Az UAV alkalmazásának kockázatai a biztonságtechnika területén,” *Repüléstudományi Közlemények*, 30. évf. 2. sz. 101–112. 2018. [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_2/2018-2-09-0497_Major_Gabor-Gajdacs_Laszlo.pdf
- [33] Major G.: A pilóta nélküli légi jármű rendszerek nemzetbiztonsági célú felhasználásával kapcsolatos kutatások, *Repüléstudományi közlemények* (2015), pp. 115–120., [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_1/2015-1-10-0181-Major_Gabor.pdf
- [34] Kiss B., Major G., *Légből kapott segítség a Covid-19 ellen*, *Repüléstudományi tanulmányok*, *Repüléstudományi Szemelvények* 2020, 280-306. 2021. [Online]. Available: <http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem-2020.pdf>
- [35] H. Shakhtrah et al.: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEEAccess*, Volume 7. 2019. pp. 48572–48634. [Online]. Available: 10.1109/ACCESS.2019.2909530

Az Airbus H145M helikopter robotpilóta-rendszere

The robotpilot system of helicopter's Airbus H145M

Békési Bertold^{1} – Marosi Márk²*

¹Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, 5008 Szolnok, Kilián u. 1., bekesi.bertold@uni-nke.hu

²Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék, 5008 Szolnok, Kilián u. 1., marosimarcus@gmail.com

Összefoglaló: Egy évszázad alatt rengeteget fejlődött a repülés, és ennek az egyik eleme az automatizálás volt. A helikoptergyártók hosszú évek óta alkalmazzák az automatizálást – stabilitás növelése és helyzetmegtartás –, amely jelentősen hozzájárult a repülésbiztonság tartós javulásához. Megfelelő használat esetén megkönnyíti a helikopter irányítását, és növeli a rutinjáratok pontosságát, hogy csökkentsék a hibák lehetőségét és a repülés biztonságát veszélyeztető, kapcsolódó kockázatokat. A technológia gyors fejlődése az elmúlt 30 évben azt jelenti, hogy az ilyen rendszerek jelentős képességeket fejlesztettek ki. A bonyolult repülésvezérlő rendszerek és az automatizálás nem megfelelő kezelése jelentős tényezők, amelyek hozzájárulnak a légi eseményekhez és balesetekhez. Ez is indokolta a biztonság előmozdításának szükségességét ezen a területen. Fontos, hogy a pilóták tisztában legyenek az automatizálás különböző szintjeivel, amelyek a napi repülésükhöz kapcsolódnak. A Magyar Honvédségben megjelent H145M helikopterünk egy igencsak korszerű konstrukció, mely nagyon komplex, automatizált repülésvezérlő és stabilitást növelő rendszerrel rendelkezik, illetve rengeteg olyan hasznos funkcióval, amelyekre egy pilótának szüksége lehet. A cikkben ezen helikopter-robotpilóta rendszerét mutatjuk be.

Kulcsszavak: helikopter, robotpilóta, H145M, AFCS, APCP,

Abstract: Aviation has evolved a lot in a century, and one element of that has been automation. Helicopter manufacturers have been using automation for many years - to increase stability and maintain position - which has made a significant contribution to the lasting improvement of aviation safety. Used properly, it facilitates helicopter control and increases the accuracy of routine procedures to reduce the potential for errors and associated risks to flight safety. The rapid development of technology over the past 30 years means that such systems have developed significant capabilities. Improper handling of complex flight control systems and automation are significant factors that contribute to air incidents and accidents. This also justified the need to promote security in this area. It is important for pilots to be aware of the different levels of automation associated with their daily flight. Our H145M helicopter, launched in the Hungarian Armed Forces, is a state-of-the-art design with a very complex automated flight control and stability enhancement system, and plenty of useful features that a pilot may need. The paper presents the autopilot system of this helicopter.

Keywords: helicopter, autopilot, H145M, AFCS, APCP,

1. BEVEZETÉS

A repülőgépek tervezésének korai szakaszában a kormányzás alapvető eszközei a pilóta és a kormányzervek közötti, mechanikus erőátviteli eszközök voltak. Ebben az időben a repülőgép térbeli helyzetének meghatározása vizuálisan, beállítása a földi horizonthoz képest manuálisan, illetve egyszerű műszerekkel történt [1]. A robotpilóta-rendszereket segédeszközként vezették be a pilóta számára a repülőgépen. A repülés „hajnalán” a repülőgépek a pilóták folyamatos figyelmét igényelték a biztonságos repüléshez. Ahogy a repülőgép hatótávolsága megnőtt, többórás repülést tett lehetővé, az állandó figyelem komoly fáradtsághoz vezetett. Az első rendszert 1912-ben fejlesztette ki a „Sperry Corporation”. Ez egy merev szárnyú repülőgépnél egy giroszkópos irányjelzőt és egy műhorizont műszert kötött össze a hidraulikusan működtetett magassági- és oldalkormányhoz [2]. A Piasecki HUP-2 Retriever volt hivatalosan az első olyan helikopter, melyben robotpilóta is üzemelt és „hands-off” (kéz nélküli) repülésre és függésre volt képes [3]. Az irányítás és a magasság szabályozásával, és ezáltal a nyugodt repülési fázisokban a munkaterhelés csökkentésével ezek a rendszerek időt adnak a személyzetnek, hogy olyan feladatokkal foglalkozzanak, mint a rádiókommunikáció, a navigáció, az ellenőrző listák vagy az üzemanyag-ellenőrzések elvégzése. A növekvő légi forgalom a légterekben egy másik tényező, amely növeli a helikoptervezető munkaterhelését. A repülés bonyolultabb fázisaiban – például rossz látási viszonyok esetén, a műszeres megközelítés során – ezek a rendszerek megkönnyítik a légijármű-vezető számára a szituációs helyzetek fenntartását és a helyes döntések gyors meghozatalát váratlan események bekövetkezése esetén.

2. A HELIKOPTER AUTOMATIKUS REPÜLÉSVEZÉRLŐ RENDSZER

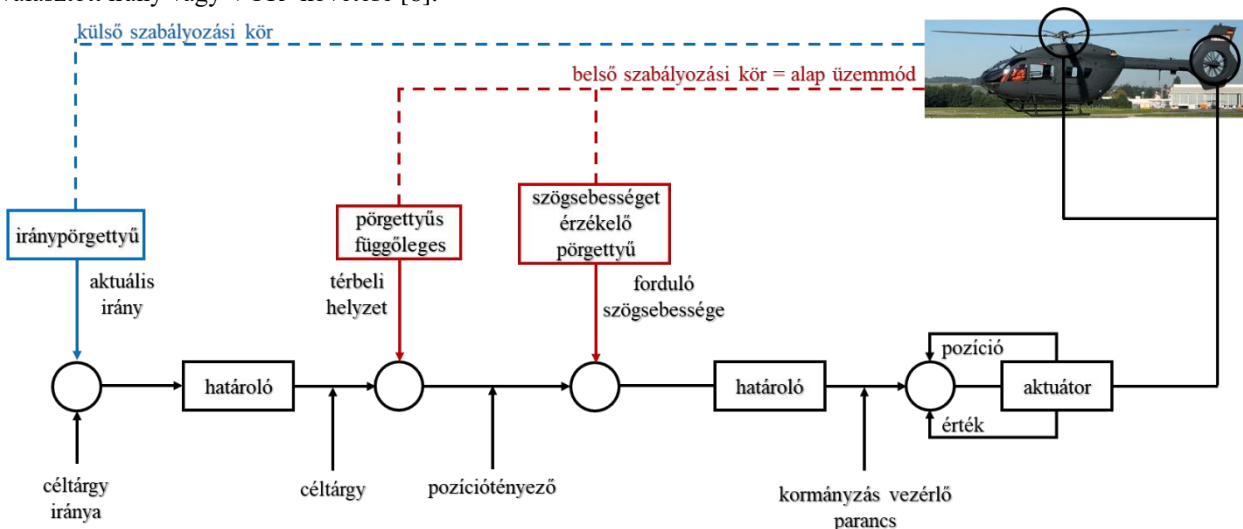
A repülőeszközök fejlődésével a fedélzeti berendezések, többek között a robotpilóták is korszerűsödnek. Ezek az eszközök a repülőgép mozgásjellemzőit állandó értéken tartó vagy előírt módon megváltoztató, automatikus berendezések. Napjainkban a robotpilóta elnevezés mellett az automatikus repülésvezérlő rendszer megnevezés is teret nyert. A repülőgép-

vezetés automatizálása során fontos a repülőgép mozgását meghatározó paraméterek pontos meghatározása és időbeli változásának megismerése. Elsődleges feladat a repülőgép stabilizálását biztosító vezérlési törvények definiálása (a robotpilóta által létrehozott kormánylap-kitérítés és a repülőgép elmozdulása közti kapcsolat), valamint a kormánysszervek megadott pontosságú és sebességű kitérésének létrehozása a vezérlési törvények szerint. A korszerű robotpilóták már nemcsak a stabilitás növelését végzik, hanem képesek előre programozott útvonalrepülésre, önálló manőverezésre és navigálásra, automatikus fel- és leszállásra, a meghatározott nagyságú külső zavarok hatásainak csökkentésére, vagyis aktív repülésszabályozásra [1]. A helikoptereken alkalmazott robotpilótának alkalmasnak kell lennie:

- a helikoptervezető által beállított bármilyen térbeli helyzet vagy mozgásforma stabilizálására;
- a helikopter lengéseinek csillapítására;
- a barometrikus repülési magasság megtartására;
- repülési sebesség stabilizálására;
- a Föld felszín feletti repülési magasság stabilizálására;
- a szélsősebesség figyelembevételével – adott magasságon – a függési üzemmód stabilizálására;
- előre beállított útvonal irányszög szerinti végigrepülésére;
- meghibásodott – repülés szempontjából veszélyessé vált – csatornáinak kikapcsolhatóságára;
- közös beállítási szög növelése esetén a járulékos „y” tengely körüli elfordulás megakadályozására;
- rendkívüli esetben (pl. autorotáció) automatikusan vészüzemmódra való átállásra [1], [4], [5].

Egy robotpilóta-rendszer az irányítási bemeneteket a térbeli helyzetből és a pályajelekből számítja ki, akárcsak a repülésvezérlő rendszer, de tényleges vezérlőbemeneteket ad a vezérlőrendszer működtető egységeire (kormánygép, szervomotor). Ezek a bemenetek a kiszámított ideális állapotnak megfelelően állítják be a repülőszerkezet térbeli helyzetét és repülési útvonalát, zárják a szabályozási kört, és a pilótát a célértékek lehetséges forrásává teszik. A szabályozási kör összehasonlítja a cél- és a tényleges értékeket, és a különböző értékeket (változókat) addig állítja, amíg a két érték meg nem egyezik. Egy zavar (pl. turbulencia) csak átmenetileg változtatja meg a tényleges értéket, mivel a vezérlőberendezés a repülési állapotváltozásra vezérlőjelek küldésével reagál, és így visszaállítja a repülőszerkezet eredeti repülési állapotát [6].

Más vezérlési folyamatok esetén hiányzik a visszacsatolás, ezért nem tudják olyan jól beállítani a zavarokhoz. Ezekben a rendszerekben, az úgynevezett „nyitott hurkú rendszerekben” a tényleges értéket a zavarok befolyásolják. Az automatikus repülésvezérlő rendszereknek (1. ábra) van egy belső szabályozási körük a helikopter irányításához (mozgás a súlypont körül), és egy külső szabályozási körük a helikopter irányításához (a repülési út mentén). A belső szabályozási körön belüli irányítás magában foglalja bizonyos értékek felismerését és fenntartását, például a bedöntési és bőlintási helyzetjelzést. A külső szabályozási kör irányítási funkciójának teljesítéséhez az értékeket nemcsak állandó értéken kell tartani, hanem olyan módon kell megváltoztatni, hogy a repülőszerkezet súlypontja a kívánt irányba mozduljon el. A helikopter-vezetés példái közé tartozik egy meghatározott magasság vagy függőleges sebesség fenntartása vagy egy kiválasztott irány vagy VOR¹ követése [6].



1. ábra. Robotpilóta-rendszer blokkvázlata [6]. Szerkesztette: Dr. Békési Bertold

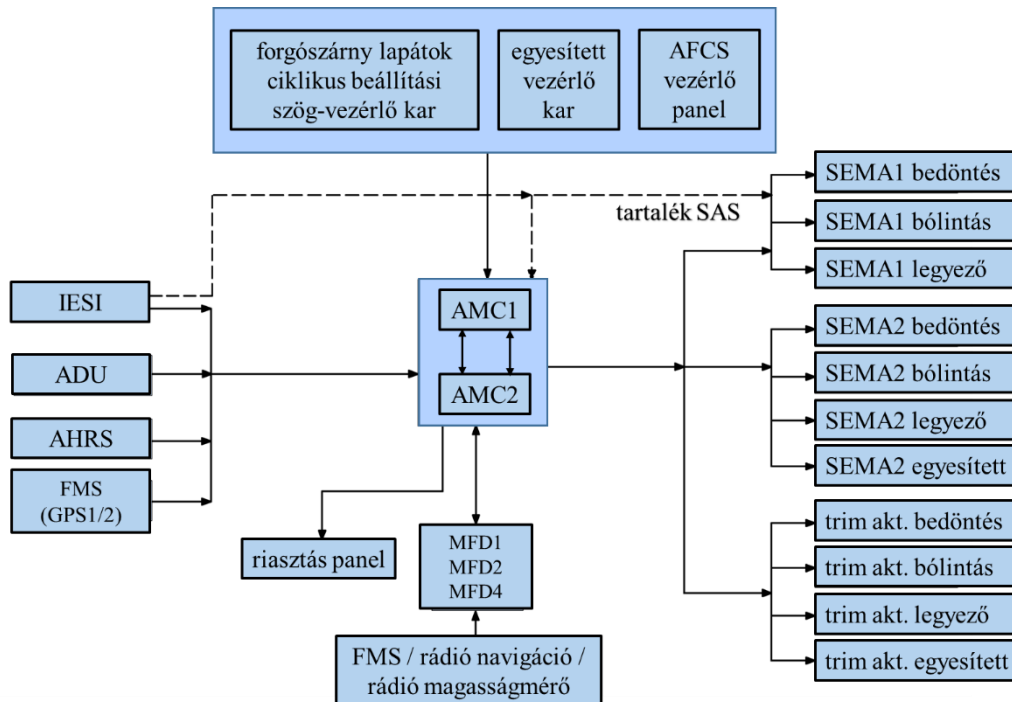
A repülésmechanika főbb pontjai a helikopter két jellemzőjéhez kapcsolódnak: a stabilitáshoz és a kormányozhatósághoz. A helikopter stabilitása olyan tulajdonság, hogy a repülés közben keletkezett külső behatások (pl. szélhőkés) megszűnése után a helikopter visszatér eredeti helyzetébe (állapotába) a helikoptervezető beavatkozása nélkül. A helikopter kormányozhatósága az a tulajdonság, hogy a kormánysszervek (botkormány, láb kormány, egyesített vezérlőkar) mozgatására (kitérésére) a helikopter a megfelelő elfordulásokkal reagál. Különbözik a dinamikus és a

¹ VOR – Very high frequency Omni-directional Radio Range: Ultra-rövidhullámú körsugárzó adóberendezés (URH-tartományú körsugárzó rádióirányadó)

statikus stabilitás között. A statikus stabilitás a test hajlama arra, hogy visszatérjen a kiindulási állapotba, miután elmozdult az egyensúlyról, míg a dinamikus stabilitás a mozgás folyamatára vonatkozik [6] [7] [8].

A repülőgép eltér az eredeti repülési állapotától, ha külső hatások érik. Ebben a konkrét példában a helikopter instabillá válik a Z tengely körül a turbulencia miatt. A stabilitási funkció kijavítja ezt a repülésiállapot-változást, de nem állítja vissza a repülőgépet a kezdeti magasságba (mielőtt turbulencia érte volna). A viszonyítási magasság tehát a helyzetkorrekció során változik. A repülési tulajdonságokat a stabilitásjavító rendszer (SAS²) és/vagy az automatikus repülésvezérlő rendszer (AFCS³) „alapüzemmódja” ideiglenes helyzetstabilizációt („Attitude Hold”) kínál a helikopter számára [6].

A „stabilitás” kifejezéssel szemben a „kormányozhatóság” azt jelenti, hogy lehetségesek a repülési állapot és a repülési út változásai, amelyek célja a helikopter célirányos mozgatása a légtérben. Erre a célra a helikoptereket állítható aerodinamikai felületekkel látják el [6]. A forgószárny és a Fenestron alkotják a helikopter alap-vezérlőrendszerét. A 2. ábrán a BK-117 D-2 helikopter automatikus repülésirányító rendszer (AFCS) blokkvázlata látható.



2. ábra. AFCS blokkdiagram BK-117 D-2 [9], [10]. Szerkesztette: Dr. Békési Bertold

A 2. ábrán található rövidítések jelentései:

- SEMA – Smart Electro-Mechanical Actuators: intelligens elektromechanikai végrehajtó mechanizmusok (aktuátorok);
- MFD – Multi-Function Display: többfunkciós kijelző;
- AMC – Aircraft Management Computer: az avionikai rendszer fő számítógépei;
- IESI – Integrated Electronic Standby Instrument: integrált elektronikus tartalékműszer;
- ADC – Air Data Computer: levegőparaméter-adatok számítógépe;
- AHRS – Attitude and Heading Reference System: térbeli helyzetet és irányszöveget adó referenciarendszer;
- FMS – Flight Management System: Repüléskoordináló és -optimalizáló rendszer.

Ezek a rendszerek ezenfelül irányítást is biztosítanak, de az emberi pilótához hasonlóan csak akkor tudják ellátni feladatukat, ha a repülőgép kellően stabil. Ezért a SAS- vagy CSAS⁴-rendszerrel felszerelt helikopterekbe magasabb hatáskörű rendszerként vannak beépítve. A DSAS (digitális SAS) funkciót a robotpilóta számítógépe tartalmazza, amely a SAS-nál jobb, fokozott stabilizálást végez. A robotpilóták lehetővé teszik a hands-off (kéz nélküli) működést, és a pilóta kívül maradhat az irányítási körön [9] [10].

² Stability Augmentation System

³ Automatic Flight Control System

⁴ Command and Stability Augmentation System: Vezérlő- és stabilitásnövelő rendszer

3. A H145M ROBOTPILÓTA RENDSZERE

A H145M helikopter elektromos rendszere alapvetően 28,5 V egyenáramú rendszer. Az AFCS-t a létfontosságú fogyasztók 1. és 2. sínje (ESS BUS 1 and 2) táplálja [9]. Az automatizált repülésvezérlő rendszerünknek a HELIONIX® rendszer⁵ vagy más néven az integrált moduláris avionikai rendszert (IMA⁶) is része. A helikopter energetikai rendszerével a [11] irodalom, illetve a műszerezettségével pedig a [12] irodalom foglalkozik részletesebben.

A robotpilóta funkcióinak vezérléséhez számos kapcsoló- és nyomógomb áll rendelkezésre a pilótafülkében. Ezek a következők:

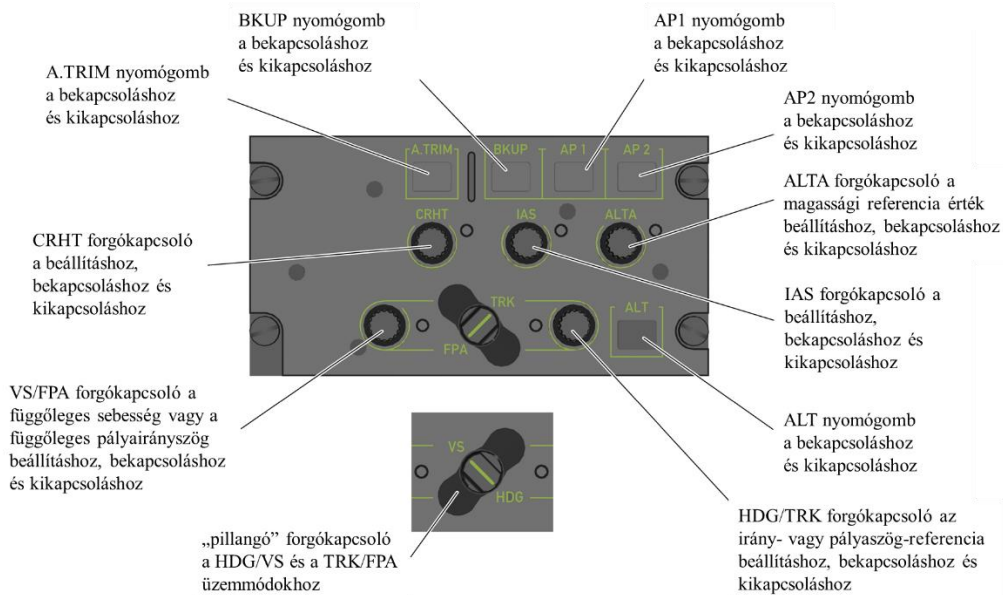
- robotpilóta-vezérlő panel (APCP⁷) – A pilótafülkék középkonzolja a pilóta és a másodpilóta között van telepítve. Az APCP biztosítja a fő vezérlési funkciókat.
- botkormánymarkolat kapcsolók – Az AFCS a botkormányon található gombokat és kapcsolókat használja az AFCS-hez kapcsolódó üzemmódok és funkciók aktiválására/deaktiválására vagy referenciabeállítására.
- egyesített vezérlőkar (EVK) markolat kapcsoló – Az itt található gombokat és kapcsolókat használja az AFCS-hez kapcsolódó üzemmódok aktiválásához/deaktiválásához vagy referenciabeállításához.
- MFD⁸-keret gombok NAV⁹ módokhoz kapcsoló – A NAV-forrásokat az MFD előlapjára szerelt keretgombokkal lehet kiválasztani vagy élesíteni [10].

3.1. A robotpilóta-vezérlő panel

A robotpilóta-vezérlő panel (APCP) a következő funkciókat biztosítja (3. ábra):

- robotpilóta be- és kikapcsolása (AP1, AP2);
- automatikus trimmelési funkció be- és kikapcsolása (A.TRIM);
- tartalék SAS bekapcsolása/kikapcsolása (BKUP);
- kiegészítő üzemmódok bekapcsolása/kikapcsolása;
- kiegészítő üzemmód referenciavértékének beállításai.

Az összes nyomógomb és jelölés zöld háttérvilágítással van felszerelve az éjszakai üzemmódhoz. Ezeket a kiegészítő (upper) üzemmódokat egy zöld LED, míg a kikapcsolt rendszereket a sárga színű nyomógomb feliratainak világítása jelzi [10].



3. ábra. H145M robotpilóta-vezérlő panel [9], [10]. Szerkesztette: Dr. Békési Bertold

A robotpilóta-vezérlőpult az AFCS aktuális konfigurációjának vezérlésére, a különféle üzemmódok be- és kikapcsolására, valamint a referenciáik beállítására szolgál. A „pillangó” forgókapcsolóval a hagyományos (HDG/VS) és a GPS-alapú (TRK/FPA) üzemmódok között választhatunk. Az AFCS újrakonfigurálására az alábbi nyomógombok állnak rendelkezésre:

- AP1 nyomógomb az 1. számú AFCS feldolgozóegység be- és kikapcsolásához (AMC1-ben található);

⁵ „Nagy rugalmasságú rendszer, amely több platformon (helikopter típuson) lát el több funkciót és alkalmazást” [12]

⁶ IMA – Integrated Modular Avionics: integrált moduláris avionikai rendszer

⁷ APCP – Auto Pilot Control Panel: robotpilóta-vezérlő panel

⁸ MFD – Multifunctional Display: multifunkcionális kijelző

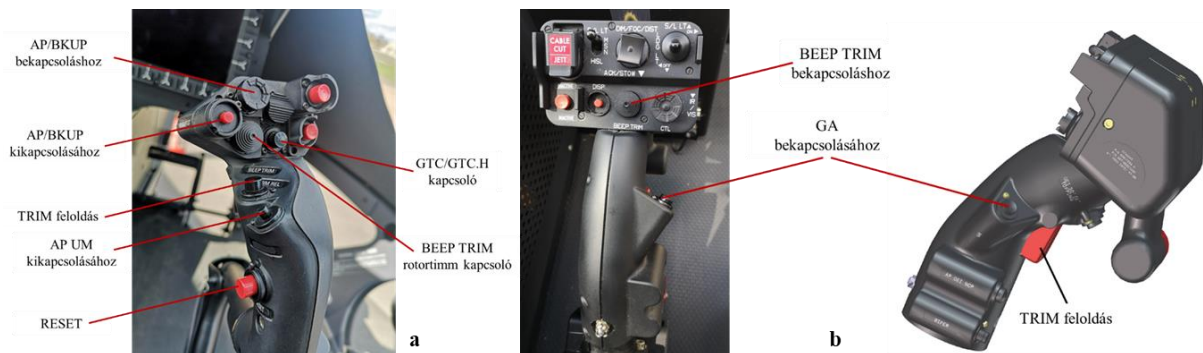
⁹ NAV – Navigation: navigáció

- AP2 nyomógomb a 2. számú AFCS feldolgozóegység be- és kikapcsolásához (AMC2-ben található);
- BKUP nyomógomb a tartalék SAS be- és kikapcsolásához, amelyet az IESI szolgáltat;
- A.TRIM nyomógomb a bólintási, bedöntési, legyezési és az EVK funkciók be- és kikapcsolásához [10].

3.2. Botkormánykapcsolók (forgószárnylapátok ciklikus beállítási szög-vezérlő kar)

A botkormány markolatán gombok és kapcsolók vannak (4.a. ábra), melyek azonos módon elérhetőek a pilóta és a másodpilóta számára. Ezek a kapcsolók aktiválják vagy deaktiválják az AFCS-üzemmódokat, és az AFCS-hez kapcsolódó üzemmódok és funkciók referenciabeállítására szolgálnak. A botkormányon található markolatgombok és az AMC-k közötti interfészeket külön jelekkel valósítják meg. Az olyan kritikus kapcsolók, mint például az AFCS gyors kikapcsolása és a trimm kioldása, duplex érintkezős kapcsolók. A botkormányon a következő gombok és kapcsolók találhatóak:

- AP/BKUP CUT nyomógomb az AFCS gyors kikapcsolásához;
- AP/BKUP ON négyirányú kapcsoló az AFCS bekapcsolásához;
- BEEP TRIM négyirányú rotortrimm (forgószárnytrimm) kapcsoló;
- TRIM REL nyomógomb a ciklikus trimmerő feloldásához;
- AP UM OFF nyomógomb az AFCS kiegészítő üzemmódjainak kikapcsolásához;
- RESET a főlista nyugtázási (jóváhagyási) funkciójához [10].



4. ábra. H145M a) forgószárnylapátok ciklikus beállítási szög-vezérlő kar ; b) egyesített vezérlő kar (EVK).
Szerkesztette és készítette: a szerzők a [9], [10] irodalom alapján

3.3. Egyesített vezérlőkar- (EVK)¹⁰ kapcsolók

Az AFCS az EVK markolatán (4.b. ábra) található gombokat és kapcsolókat is használja a kiegészítő üzemmódok aktiválásához/deaktiválásához. Az AFCS-hez kapcsolódó üzemmódok és funkciók referenciabeállítása szintén lehetséges. A következő gombok és kapcsolók találhatóak az EVK-n:

- négyirányú rotortrimm kapcsoló;
- a lapátok közös beállítási szög-vezérlő trimm-motor erőtrimmjének feloldása;
- nyomógomb a „Go-around” (átstartolás) kiegészítő üzemmód aktiválásához [10].

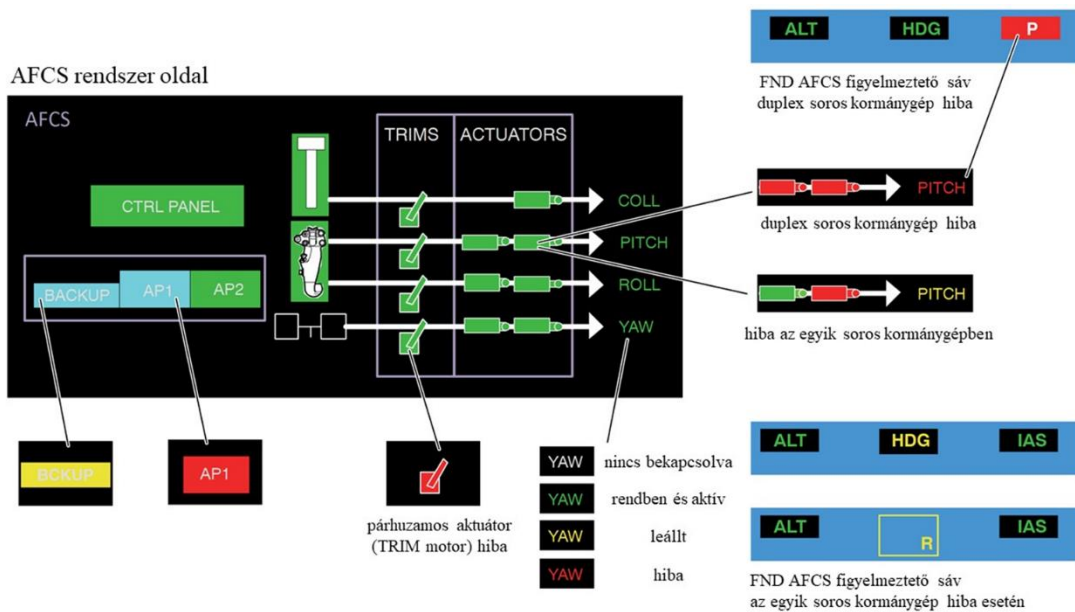
3.4. AFCS rendszerállapot-oldal az MFD kijelzőn

A robotpilóta működéséről (AFCS hibák/állapotjelzésekről) a multifunkcionális kijelzőn láthatunk információkat. Az MFD 4-en megjeleníthető egy AFCS rendszerállapot-oldal (6. ábra), amely a teljes AFCS rendszer szintetikus blokkdiagramját mutatja. Az egyes dobozok színe a működési állapotuknak megfelelően változhat. A színjelzés a következő:

- szürke: inaktív;
- zöld: rendben és aktív;
- ciánkék: rendben és készenléti állapotban;
- sárga: leállt;
- piros: hiba.

¹⁰ Az egyesített vezérlőkar (collective lever grip) azért kapta ezt az elnevezést, mert a forgószárnylapátok közös beállítási szögével együtt, azzal szinkronban a hajtómű teljesítményét is vezérli, méghozzá úgy, hogy a forgószárny fordulatszámáig mindaddig állandó maradjon, amíg azt a pilóta külön meg nem változtatja. Az EVK-val való kormányzásnak a forgószárny összes lapátjának minden helyzetében a beállítási szög azonos értékekkel megnövelését vagy lecsökkentését értjük. Ezt a kar felemelésével vagy lenyomásával érik el. Korrekció alkalmazása nélkül az EVK fel-le mozgatása esetén a forgószárny fordulatszámáig tehát állandó marad [13].

Sikertelen repülés előtti teszt esetén ajánlott ezt az oldalt felkeresni, hogy gyors és világos áttekintést kapjunk az érintett rendszerről [9] [10].



5. ábra. AFCS rendszerállapot-oldal az MFD kijelzőn [9], [10]. Szerkesztette: Dr. Békési Bertold

A H145M helikopter AFCS rendszere az egypilótás műszeres repülési szabályok (SPIFR¹¹) igényeit meghaladó automatikus repülési üzemmódokat és funkciókat biztosítja. Ez a polgári tanúsítás magában foglalja:

1. Az alapstabilizálást (ATT, trimm-újrastabilizáló funkció, digitális SAS).
2. a tartalék SAS üzemmódot (BKUP/SAS). A tartalék üzemmód stabilitásnövelést biztosít a bólintási, bedöntési és legyezési tengelyeken kettős AFCS-meghibásodás esetén, amelyet az IESI szolgáltat;
3. Normál kiegészítő üzemmódok: (ALT¹², HDG¹³, IAS¹⁴, VS¹⁵, ALT.A¹⁶, GA¹⁷, CRHT¹⁸);
4. Navigáció és megközelítés üzemmódokon (LOC¹⁹, GS²⁰, VOR, NAV);
5. GPS-alapú üzemmódokon (FPA²¹, TRK²²) [10].

¹¹ Single Pilot Instrument Flight Rules

¹² Altitude: Az a magasságtartási mód, amely az adott barometrikus magasságot fogja megtartani, amint az ALT módot bekapcsoljuk. Ha a helikopter emelkedésben vagy süllyedésben van, akkor is vissza fog térni arra az adott magasságra, amit korábban beállítottunk.

¹³ Heading: A HDG mód bekapcsolásának pillanatában az adott irányt a robotpilóta fogja tartani. A HDG megtartja, vagy rátér az előre kiválasztott irányra. Az APCP-n lehet bekapcsolni, illetve állítani, illetve a botkormány beep trim gombjával lehet referenciaértéket választani.

¹⁴ Indicated Air Speed: Itt az indikált repülési sebességet tudjuk beállítani. Hasonlóan a HDG módhoz, ugyanúgy működik, szintén az APCP-n lehet bekapcsolni, állítani, és a beep trim segítségével lehet értéket változtatni.

¹⁵ Vertical Speed: függőleges sebesség beállításához, bekapcsolásához és kikapcsolásához.

¹⁶ Altitude Acquire Mode: Ez az úgynevezett magassági referenciaérték-elérési mód, ami úgy működik, hogy kiválasztjuk a kívánt magasságot, és a V/S móddal együtt beállítjuk, hogy milyen sebességgel emelkedjünk, vagy süllyedjünk a kívánt értékre. Ezt kizárólag az APCP-n tudjuk kezelni.

¹⁷ Go-Around: Az EVK-n lévő nyomógombbal ha bekapcsoljuk, akkor automatikusan elkezd a helikopter emelkedni. Ezt használjuk még műszeres bejövethetnél, amikor a kötelező pontnál úgy döntünk, hogy megszakítjuk a bejövethet, és csinálunk egy új bejövethet. Általában csak pár másodpercig aktív (15 s-ig útvonalrepülékör és 25 s-ig függéskor), ezután a VS/FPA és az IAS mód váltja le. A GA mód, ha eléri és megtartja az 5,08 m/s (1000 láb/perc) előre meghatározott emelkedési sebességet, vagy ha ennél az értéknél magasabb, akkor a GA bekapcsolásának pillanatában a függőleges sebességet a robotpilóta tartja fenn.

¹⁸ Cruise height: Az utazómagasságot tudjuk állítani vele, ami a radar-magasságmérő műszerünk által adott értékekkel dolgozik. A helikopter korlátjainak megfelelően bármelyik repülési sebességgel használható, egészen a függésig, vagyis a 0 haladó sebességig. A javasolt minimummagasság a talajtól számított 200 láb. Ugyancsak az APCP-n lehet állítani.

¹⁹ Localizer: iránycsávadó

²⁰ Glide slope: siklópálya

²¹ Függőleges pályairányszög beállításához, bekapcsolásához és kikapcsolásához

²² Track Angle: A repülési pályairányszöget tudjuk állítani vele. Amint bekapcsoljuk, megtartja az éppen adott vagy előre beállított szöget. Hasonlóan működik a HDG módhoz 30 csomós sebesség alatt. Ez egy GPS által generált TRK mód,

A kiegészítő üzemmódok (upper modes) esetén vízszintes és függőleges irányítási módokat határoznak meg. A vízszintes üzemmódok azok, amelyeket az oldalirányú helyzet változásával vezérelnek. A függőleges üzemmódok azok, amelyeket a hosszirányú vezérlés irányába történő bemenetek vezérelnek.

Rendszerint ezek a rendszerek a repülési helyzetet a bedöntési és bőlintási tengelyen (2 tengelyes) szabályozzák, mint minimum. Ezenkívül a magassági tengely is szabályozható (3 tengelyes). A gyakorlatban a 3 tengelyes robotpilótáknál általában egy vízszintes és egy függőleges üzemmódot használnak egyszerre (pl. iránytartás és magasságtartás).

Két függőleges üzemmód egyidejű használata (pl. a jelzett sebességtartás és a függőleges sebességtartás) csak akkor lehetséges, ha az AFCS-nek van jogosultsága az EVK felett (4 tengelyes AFCS).

1. táblázat. A H145M AFCS üzemmódjai és funkciói [10]. Szerkesztette: Dr. Békési Bertold

üzemmódok	vízszintes	függőleges
kiegészítő	géptengelyirányszög-tartás/stabilizálás (HDG)	magasságtartás, magasságstabilizálás (ALT)
		műszer szerinti sebességtartás (IAS)
		függőleges sebesség tartása (VS)
		magassági referenciaérték (ALT.A)
		utazómagasság (CRHT)
továbbfejlesztett	repülési pályairányszög (TRK) kiválasztása és tartása	függőleges pályairányszög (FPA) kiválasztása és tartása
	földre vetített repülési pálya (GTC ²³) kiválasztása és tartása	utazómagasság (CR.HT) kiválasztása és tartása
	földre vetített repülésipálya-függés (GTC.H ²⁴) kiválasztása és tartása	
teljes repülési profilú	iránysávadó (LOC)	siklópálya (GS)
	Ultra-rövidhullámú körsugárzó adóberendezés (VOR)	átstartolás (GA)
	Navigáció (útvonali fordulópont, repülési terv) (NAV)	

5. BEFEJEZÉS

A H145M helikopter robotpilóta-rendszere korszerű, a kornak megfelelő színvonalon áll, így nagyban hozzájárul a helikopter működési paramétereinek folyamatos ellenőrzéséhez és kiértékeléséhez. Az AFCS számos hasznos funkciót ellát a helikopter működésében. Az AFCS az analóg robotpilótával ellentétben, amely pörgettyűs, váltakozó árammal működik, nehezen beállítható, és sok esetben a javítása csak alkatrészcserevel oldható meg. Digitálisan jobb teljesítményt képes nyújtani, folyamatosan figyeli a rendszer saját magát, öntesztet végez, és képes a szoftveres karakterisztika módosításra is. Tehát így egy meghibásodás nem képes kritikus helyzetet előidézni. További pozitívum, hogy szinte majdnem minden alkatrész és betáplálás duplázva van. Ez a rendszer továbbá rendelkezik még egy olyan biztonsági funkcióval is, hogy a beprogramozott teljes úthoz képest nem térítheti el a helikoptert 5-10%-nál jobban, vagyis nincs nagymértékű túlvezérlés.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Szegedi P., Békési B.: Az UAV-on alkalmazható szenzorok, in XIV. Természet-, Műszaki és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia. Szombathely, Nyugat-magyarországi Egyetem, 2015. pp. 175–182. [Online]. Available: http://publicatio.nyme.hu/613/1/TTK_14_Nemzetkozi_Konf_Eloadasok_201500516.pdf

mely nem használ mágneses irányt, szóval a szél által okozott irányeltérést automatikusan kompenzálásra kerül. Az APCP-n lehet állítani, illetve a botkormány beep trim gombjának segítségével jobbra, illetve balra.

²³ Ground Trajectory Control: A helikopter földre vetített repülési pályáját egyenes vonalon tartja. Ehhez szüksége van egy minimum repülési sebességre, de ez az üzemmód nem igényel ilyet, be lehet kapcsolni alacsony sebességnél is bármikor. Úgy próbálja irányítani a helikoptert, ahogy azt a pilóta tenné. Haladó repülés közben fordulási koordinációt biztosít, alacsony repüléskor pedig tartja az irányt és az adott föld feletti sebességet. A botkormányon lehet be- és kikapcsolni.

²⁴ Függéskor biztosítja a stabilitást és a helyzetet. Ilyenkor az AFCS GPS és a mágneses irány segítségével tartja a gépet 0 sebességen és normál függési helyzetben. A botkormányon lehet a GTC nyomógomb kétszeri megnyomásával bekapcsolni. Ezt a függési helyzetet lehet változtatni is, a botkormányon a beep trim gombbal. Amelyik irányba megnyomjuk egyszer ezt a gombot, a helikopter abba az irányba fog elmozdulni 1 métert.

- [2] Popular Science 1930. febr. [Online]. Available: https://books.google.to/books?id=4ykDAAAAMBAJ&printsec=frontcover&hl=hu&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [3] HUP-1 Retriever/H-25 Army Mule Helicopter, [Online]. Available: <https://www.boeing.com/history/products/hup-h-25-army-mule.page>
- [4] Szegedi P., Békési B.: Sensors on board of the Unmanned Aerial Vehicles, In Proceedings of 19th International Scientific Conference Transport Means, Kaunas, 2015. pp. 219–222.
- [5] Óvári Gyula: Helikopter Szerkezetan I. rész. Forgószárnyak, forgószárnyak vezérlőrendszerei, MN KGYRMF, 1986.
- [6] Instrumentation, EASA ATPL Training, Boeing Services Deutschland GmbH, Jeppesen, 2016. ISBN: 978-0-88487-600-7
- [7] Szelestey Gyula: Áramlástan III. kötet, Helikopter aerodinamika jegyzet, KGYRMF, Szolnok, 1974.
- [8] Helikopter aerodinamika, Honvédelmi Minisztérium, 1965.
- [9] BK117 D-2 Training Manual CAT B1 Chapter 12 Autopilot System, 2018. 11, Airbus Helicopters Training Academy
- [10] BK117 D-2 Training Manual CAT B2 Chapter 6 Autopilot System, 2019. 07, Airbus Helicopters Training Academy
- [11] Békési Bertold, Horváth Gergely: A H145M helikopter elektromos energiaellátó rendszere. Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2021 Konferencia. 2021.06.24. MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Debrecen, pp 70-76 (2021) ISBN: 9789637064425 [Online]. Available: https://tab.mta.hu/files/9816/3241/4622/DAB_Muszaki_Tudomany_az_Eszak-kelet_Magyarorszagi_Regioban_2021_konferencia_Kornyezet-es_Foldtudomanyok_Muszaki_Hidrologia_es_Repulestudomanyok_szekcio_eloadasok_kiadvanya.pdf
- [12] Békési Bertold, Horváth Gergely: A H145M helikopter műszerrendszere. Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2021 Konferencia. 2021.06.24. MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Debrecen, pp 42-48 (2021) ISBN: 9789637064425 [Online]. Available: https://tab.mta.hu/files/9816/3241/4622/DAB_Muszaki_Tudomany_az_Eszak-kelet_Magyarorszagi_Regioban_2021_konferencia_Kornyezet-es_Foldtudomanyok_Muszaki_Hidrologia_es_Repulestudomanyok_szekcio_eloadasok_kiadvanya.pdf
- [13] Dr. Gausz Tamás: Autogírók és helikopterek. Válogatott fejezetek, Budapest, 2015, [Online]. Available: <https://doksi.net/hu/get.php?lid=21529>

Drónok a jövő korszerű repülőterein

Drones at the modern airports of the future

Major Gábor^{1*}

¹Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, 5008 Szolnok, Kilián u. 1., major.gabor@uni-nke.hu

Összefoglaló: A tudomány, a technológia és az ipar által megalkotott eszközök és rendszerek az élet számos területét teszik könnyebbé, hatékonyabbá és biztonságosabbá. Elgondolkodtató az, hogy a napjainkban robbanásszerű fejlődést mutató, pilóta nélküli légi jármű rendszerek lassan „betörnek” a repülőterekre is, hogy azt biztonságosabbá, üzemeltetését gazdaságosabbá tegyék. Miután a felhasználó igényeinek és az elérendő célnak legjobban megfelelő szenzor elkészül, már „csak” a rendszert szállító felépítményt kell „alárakni”, így a megtérülés és az elégedettség garantált. A cikkben a pilóta nélküli légi járművekkel a repülőtéren végrehajtható munkafolyamatokat és azok megvalósíthatósági követelményeit tárgyalom annak érdekében, hogy a költségesebb és helyenként lassabb emberi erőt miként lehet észszerűen kiváltani.

Kulcsszavak: repülőtér, repülőtéri feladatok, pilóta nélküli légi jármű, szenzorok, drónok

Summary: The devices and systems created by science, technology and industry make many aspects of life easier, more efficient and safer. It is thought-provoking that unmanned aerial vehicle systems, which are currently experiencing explosive growth, are slowly 'invading' airports to make them safer and more economical to operate. Once the sensor best suited to the user's needs and the objective to be achieved has been created, all that is left is to "sub-assemble" the superstructure that will carry the system, thus guaranteeing a return on investment and satisfaction. In this article, I discuss the workflows and feasibility requirements that unmanned aircraft can perform at the airport in order to reasonably replace the more costly and sometimes slower human power.

Keywords: Airport, airport tasks, unmanned aerial vehicle, sensors, drones

1. BEVEZETÉS

Hogy mitől korszerű egy repülőtér, de akár egy használati tárgy vagy bármilyen eszköz, azt az adott kor dönti el, amelyekben használják és viszonyítják az addig megismert „korszerűhöz”.

Kijelenthetjük, hogy a repülés őskorában, amikor a gravitáció „megcsúfolása” csupán fantázia és szép ábránd volt, már az is korszerűnek hatott, ha volt akkora füves terület, amely elegendő volt egy levegőnél nehezebb tárgy levegőbe emelkedéséhez. Ez a feltevés, amióta a repülés gondolatával kacérkodott az ember, csupán egy esetben nem állja meg a helyét, mégpedig az ókori mondában olvasható Daidalosz és Ikarosz esetében. Azóta minden légi járművet üzemeltető törekszik egy, a járművének megfelelő méretű és minőségű felszállóhelyről és egy biztonságos leszállóhelyről gondoskodni. Hogyan is néz ki az a terület, ahol legalább az előzőekben leírt feltétel teljesül, sőt még annál is több? A repülőgépek legkorábbi fel- és leszállóhelyei füves mezők voltak. A repülőgép bármilyen szögben – ami kedvező szélirányt biztosított – megközelíthette. Kisebb javulást jelentett a csak földdel borított pálya, amely megszüntette a fű miatti surlódási ellenállást. Ezek azonban csak száraz körülmények között működtek a célnak megfelelően. Később a kor és a megnövekedett forgalom szükségessé tette a fejlesztéseket, ezért az így kialakított betonfelületek már lehetővé tették a leszállást a meteorológiai viszonyoktól függetlenül [1]. A legkorábbi repülőtereket a repülés születésének korához, az 1900-as évek elejéhez datálja a történelem, így a „világ legrégebbi repülőtere” címet a Párizs melletti Toussus-le-Noble¹ repülőtér, a Hamburg Airport², a bukaresti Aurel Vlaicu³ és a Wilbur Wright által alapított College Park⁴ repülőtér egyike kaphatja meg. Magyarország vonatkozásában a repülőterek története Rákosmezőn kezdődött (helyszínrajz az 1. ábrán), ahol 1909-ben az egykori lovassági gyakorlóterén indult útjára a légtér meghódítása [2]. Mivel ebben az időszakban a hazai repülőgépgyárak saját repülőteret létesítettek a kísérleteikhez és a légi járműveik berepüléséhez, így Mátyásföld vette át az első repülőtér hanyatlásnak következtében a hazai repülő élet központi helyét.

¹ A repülőtér Franciaország egyik legrégebbi regionális repülőtere, amelyet 1907-ben alapítottak. A francia légierő az I. világháborúban és a II. világháború korai szakaszában (1939–1940) is használta.

² 1911 januárjában nyitották meg a Hamburger Luftschiffhallen GmbH (HLG) magánfinanszírozásából. Az I. világháború alatt a repülőtér léghajóhangárját a német hadsereg széles körben használta, mígnem 1916-ban tűz pusztította el.

³ Románia, Băneasa kerületében található repülőtér térségében 1909. október 18-án került sor az első repülésre, amelyet a francia pilóta, Louis Blériot hajtott végre.

⁴ Az 1909 augusztusában alapított és 1911 decembere óta üzemelő repülőtér az Amerikai Egyesült Államok, Maryland állam, Prince George megye College Park városában található.



1. ábra. Az első magyar repülőtér [2]

Az ember által vezetett légi járművek az 1900-as évek óta tartó nagy ívű modernizáció mellett rohamosan fejlődve jelentek meg a pilóta nélküli repülőeszközök, a drónok⁵, amelyek nagy segítséget jelentenek az élet számos területén, a legkülönbözőbb körülmények között [3] [4] [5]. Ezzel az elterjedéssel az eredeti céltól eltérően, amikor is három csoportba lehetett sorolni a fejlődési irányt, fegyverként alkalmazva, célrepülőgépként hasznosítva, valamint rajta különféle szenzorokat elhelyezve tették alkalmassá a levegőből történő információszerzésre és -továbitásra, elősegítve ezzel a különböző vezetési szinteken a megalapozott döntések meghozatalát [6], így olyan területeken is megjelentek, ahol nemkívánatos volt a jelenlétük. A megjelenő „problémát” megértve egymástól függetlenül több nemzetközi légi közlekedési, repülésbiztonsági szervezet, valamint nemzeti hatóság kezdte kutatni – az élet szinte minden területén egyre nagyobb szerephez jutó – pilóta nélküli légi jármű-rendszerek szabályozási kérdéseit. Mint repülőeszköz, elsősorban a légi közlekedéssel foglalkozó hatóságoknak okoz fejtörést a drónok légtérbe történő integrálása [7]. A jogi „értelmezés” és a használható kategóriákba sorolás [8] mellett a drónok technikai fejlődésének íve, iránya és az eszközök képessége, kinézete, felszereltsége, felszerelhetősége és a tudása is megjósolhatatlan jelen pillanatban. A folyamatos fejlődésnek köszönhetően akár rövid időn belül is hatalmas változások következhetnek be, amelyek nagymértékben befolyásolhatják a légi járművek jövőjét és a repülésről alkotott véleményünket, elképzeléseinket [9]. Ilyen befolyásoló tényező lehet az is, ami az elmúlt néhány évben a „pilótás” repülés és a repülőterek ellenségévé tette ezeket a légi organizmusokat. A békés és hasznos felhasználás mellett megjelent az említett területeken az ártó szándék is, mint például a repülőterek légtérébe az amúgy „csak” felvételek készítésére alkalmazott drónok, amelyek repülőeseményhez, olykor katasztrófához vezethetnek, vezetnek. Ilyen eset lehet például a 2. ábrán bemutatott találkozás pillanata.



2. ábr.: Repülőgépszárny-belépőél, kontra drón [10]

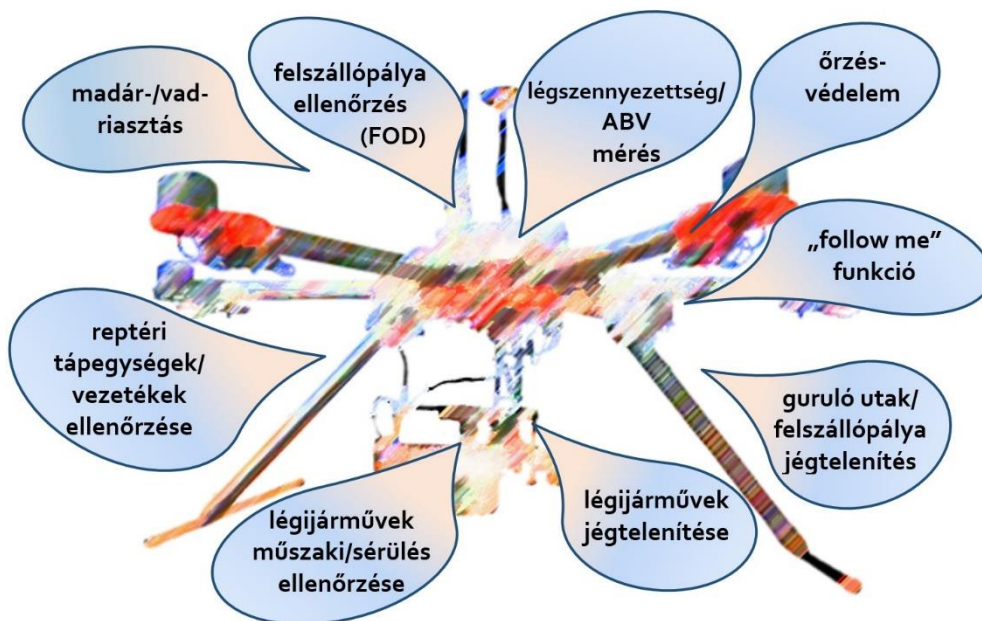
⁵ Unmanned Aerial Vehicle (UAV)/Unmanned Aerial System (UAS)/Unmanned Aircraft (UA) – Pilóta nélküli légi jármű. ICAO Circular (2011) 328. 1–38.

Ez a felvétel is tükrözi, hogy a repülés veszélyes üzem, számos körülménnyel és eszközzel számolni kell, amelyek működésének összehangolása és a kockázatok minimalizálása egy jól, hatékonyan működő szimbiózist teremt a repülésben élők, dolgozók között. Mivel a repülés a földön kezdődik, így első lépésként a földön lévő lehetőségekkel érdemes foglalkozni. A publikációm következő fejezetében bemutatok néhány lehetőséget, amelyek hatékonyabbá, egyszerűbbé és olcsóbbá tehetik a repülőterek és környezetük működését, természetesen a lehető legnagyobb odafigyeléssel és szabálykövető magatartással érhetik el céljaikat.

2. DRÓNOKKAL KORSZERŰBB LEHET EGY REPÜLŐTÉR?

A fejezet elején kérdésként fogalmazom meg azt, amit reményeim szerint a bemutatott lehetőségeket követően, a publikáció végén már felkiáltó jellel tehetünk a helyére, miközben egyértelműen vághatjuk rá, hogy IGEN... A jelentőségteljes fejbiccentés és a határozott pozitív határozószó után következő vessző és a „de” szócska után pedig a megvalósíthatóság tanulmányozása kell, hogy következzen. A bemutatásra kerülő részfolyamatok egyes elemeit tekintve jelenleg is folynak kutatások, mint például a Tématerületi Kiválósági Program TKP2021-NVA-16 projekt Integrált-mintarepülőter kiemelt kutatási terület keretében, egyes komponensek megvalósíthatóságát pedig tovább vizsgálom kutatótársaim segítségével.

A repülőter biztonságos működéséhez számos elengedhetetlen részmunkafolyamat szükséges. Ezek végrehajtása jelenleg emberi erő bevonásával és egy erre felkészített gépjármű segítségével történik. A 3. ábrán bemutatok néhány munkát, szolgáltatást, amiket véleményem szerint az arra „felkészített” pilóta nélküli légi járművekkel hatékonyan lehet elvégezni. A felkészítés alatt a megfelelő szenzorok, kiegészítőelemek megtalálását, kalibrálását, „megtanítását”, mindezeknek a megfelelő hordozóplatformra történő illesztését, diverzifikálását és a szükséges jogi környezet, eljárási, alkalmazási módok kidolgozását értem.



3. ábra. „Drónképességek” (saját szerkesztés)

2.1. Felszállópálya-ellenőrzés (FOD)

Az idegen tárgy, törmelék okozta sérülés (FOD)⁶ a repülőtereken magába foglal minden olyan nem megfelelő helyen talált tárgyat, amely az adott helyen való tartózkodás következtében károsíthatja a berendezéseket, vagy megsebesítheti a személyzetet. Az FOD az anyagok széles skáláját tartalmazza, beleértve a járdadarabokat, a vendéglátóipari kellékeket, az építőanyagokat, a sziklákat, a homokot, a poggyászdarabokat, a műanyag-, és papírdarabokat, a lapokat, a csavarokat, az üres olajos- és hidraulikafolyadék-kannákat, az üres üdítőital-dobozokat, az áruöngző gyűrűket, a törött, fából készült tárgyakat és egyéb lakossági szemeteket, de még a vadon élő állatokat is. Az FOD a terminálkapuknál, a rakományátrakodóknál, a gurulóutakon és a felszállópályákon (például a 4. ábra) is megtalálható.

⁶ Foreign Object Damage (idegen tárgy okozta kár) – minden olyan részecske vagy anyag, amely idegen a légi járműtől vagy bármelyik rendszertől, amely potenciálisan kárt okozhat.



4. ábra. FOD a felszállópályán [11]

Ezek számos problémát okozhatnak a repülőtéren, mint a légi járművek hajtóműveinek károsodása, a futómű gumibroncsainak vágása, a repülőgép mozgó alkatrészei közé ékelődés, személyi sérülés a hajtóműsugarba bekerült, felkapott törmelékdarab által. Ezt okozhatja az épületek, berendezések, légi járművek rossz, felületes, elhanyagolt karbantartása; a nem megfelelő személyzeti képzés; a szoros időrend be nem tartása; az időjárás; idegen, ellenőrizetlen gépjárművek.

A repülés történetének talán legismertebb, ehhez kapcsolódó eseménye a 2000. július 25-én a párizsi Charles de Gaulle repülőtéren felszálló Concorde tragédiája, amely felszállása után alig néhány kilométerre a reptértől a földbe csapódott. A Concorde előtt felszálló DC-10-es repülőgép hajtóművéről levált egy kis fémlemez, amely a felszállópályán maradt. A lehullott lemezdarabról ekkor még senki sem tudott. Öt perccel a DC-10 után az Air France 4590-es, New York-i charterjárata, egy Concorde készült felszálláshoz ugyanezen a 4217 méter hosszú pályán. A 43 centiméter hosszú, 3 cm szélességű lemezcsík (lásd 5. ábra) szétvágta a bal oldali főfutón lévő első, belső abroncsot. Ennél a sebességnél a gumibroncs szinte szétrobbant, és egy négy és fél kilós darabja eltalálta a bal oldali felszárny alsó borítását, amely alatt az 5-ös számú, 9000 literes tartály volt, amelynek aljáról egy nagy lemezdarab leszakadt, és ömleni kezdett a kerozin, kisebb darabjai pedig a bal oldali hajtóművekbe, illetve a futóaknába jutva okoztak sérüléseket.



5. ábra. A katasztrófát okozó lemezdarab [12]

Ezek a jól felismerhető, idegen tárgyak kiválóan detektálhatók, így a megfelelő kamerarendszer a szükséges számítástechnikai háttértámogatással, az elegendően erős és gyors hordozóplatformmal és körültekintően kidolgozott eljárásrenddel hatékony segítség lehet ennek a problémának a minimalizálására.

2.2. Madár- és vadriasztás

Ismeretes, hogy a madarak (és más vadon élő állatok) és a repülőgépek ütközései minden évben jelentős veszteségeket okoznak a légi közlekedési ágazatnak károk és késések tekintetében. Léteznek technikák a madarak

számának ellenőrzésére a repülőtereken, és ezáltal a vadon élő állatokkal való ütközések számának csökkentésére, de ezeket repülőterenként nagyon eltérő szinten alkalmazzák.

Ilyen, több-kevesebb sikerrel alkalmazott módszer lehet a madárrajok ellen a madarak vészjelzéseit imitáló hangsugárzók, telepített hangágyúk alkalmazása riasztóalakok, valamint solymászok segítségével. Igaz, a repülőgép madarakkal történő találkozása 65%-ban nem okoz jelentős sérülést, de ennek ellenére a fennmaradó 35% még így is több tíz-száz milliárdos veszteséget jelent a légitársaságoknak.

John R. Allan és Alex P. Orosz 2001-ben készült tanulmánya azt mondja, hogy érdemes lehet pénzt fektetni a madárvédelembe, és ezáltal nagyobb összeget lehet megtakarítani a madárcsapás költségeinek csökkentésével. Következtéseiket két adathalmaz eredményeire alapozták. Az egyik, egy 1999-es felmérés, ahol 2 milliárd USD kárt és késéseket számoltak ki a kereskedelmi légitársaságoknak, amely nem tartalmazza az általános repülést végrehajtó repülőgépekben vagy helikopterekben okozott károkat, a másik pedig a 2000. évi, nyilvánosan elérhető adatsorok felülvizsgált, 1,28 milliárd USD-os veszteségének elemzése [13].

A repülésbiztonság érdekében a megfelelő eszközökkel felszerelt pilóta nélküli légi járművek rendszertelen időszakokban, főképpen a földet érési zóna közelében hajtanak végre repüléseket, amelyek alkalmával fény- és hangeffektusok segítségével történik meg a riasztás. Az ilyen repüléseknek az előnye a telepített hangágyúval vagy egyéb más riasztóbaúval szemben a rendszertelenség, a váratlanság és a meglepetés. Ebben az esetben is megvalósítható a kézi irányítású, de a teljesen autonóm üzemű végrehajtás, ami az adott repülőtér sajátosságait „megtanulni” képes számítástechnikai támogatással rendelkezik.

A jövőben a telepített kamerák detektálhatják a repülőtéren veszélyt jelentő madár- és vadpopulációt, és autonóm üzemmódban drónokat indíthatnak a kijelölt területre, hogy elűzzék a repülés biztonságát veszélyeztető és az emberi életre veszélyes élőlényeket, majd visszatérjenek a kiindulási helyükre. Mindezt közvetlen emberi beavatkozás nélkül [14].

2.3. „Follow me” funkció

Ebben az alfejezetben olyan szolgáltatással foglalkozok, amely a repülőtéren földi kiszolgálási tevékenységek körébe, a forgalmi előtérben előforduló feladatok közé sorolandó. A légi jármű földi beállítása induláskor és érkezéskor elvégzendő feladat. Ennek elősegítésére a repülőtereken jól látható sárga/fekete megkülönböztető festéssel, alacsony intenzitású kettős villanófényű fénytechnikai berendezéssel és nagy méretű kijelzővel ellátott gépjárművel nyújtanak segítséget a légi jármű vezetőjének a légi járművek biztonságos földi mozgása és pontos beállása érdekében. A jelenleg használt, hagyományos felvezető gépjármű abban az esetben kerül alkalmazásra, amikor különleges körülmények kezelésére van szükség, illetve a légi jármű-vezető helyismerettel nem rendelkezik. A felvezetésre különleges időjárási körülmények, a légi jármű rádióhibája, illetve csökkent szárnyvégtávolság esetén is sor kerülhet.



6. ábra. „Follow me” koncepció (saját szerkesztés)

A hatékony működés érdekében a megfelelő méretű és láthatóságú kijelző, a figyelemfelkeltő jelzőfény és egy olyan platform szükséges, amely a felépítményt a megfelelő dinamikával és biztonságban képes mozgatni, amely példaként a 6. ábrán látható. A kamera és szenzorrendszere segítségével a légi robot a meghatározott helyen azonosítja a guruló légi járművet, majd a számára meghatározott várakozási vagy parkolóhelyre irányítja. Mivel a drónnak a méretéből adódóan kisebb a láthatósági felülete, mint a hagyományos gépjárműnek, ezért a pilótától mért megfelelő távolság és az ideális magasság kijelölése fontos eleme ennek a munkafolyamatnak.

5. BEFEJEZÉS

A publikáció elején megfogalmazott kérdésre, bízom benne, sikerült annyi választ bemutatnom, amelyeket követően már csak a megvalósíthatóság mikéntje az, amelyre a közeljövőben keresni kell a válaszokat. Igaz, a publikáció terjedelmi korlátai miatt nem volt lehetőségem minden szolgáltatástípus bemutatására, de a kimaradt tételek hasonló gondolati elven és technikai tartalommal kerülhetnek megvalósításra, ezekkel egy későbbi írásomban foglalkozok.

A gyártás, a navigáció, a távvezérlési képességek és az energiatároló rendszerek terén elért fejlődés lehetővé tette a drónok különböző helyzetekben való használatát, ahol az ember jelenléte nehéz, lehetetlen vagy veszélyes. Az elmúlt években a katonai megfigyelésre, bolygó kutatásra és keresés-mentésre szolgáló repülő robotok kapták a legnagyobb figyelmet. A drónok jelentős előnyei miatt számtalan pályázat foglalkozik e drónok alkalmazásának lehetőségével, mivel a bemutatott és említett jellemzőknek megfelelően számos művelet elvégzésére alkalmasak. Igaz, továbbra is a katonai fejlesztések fognak a „csúcstechnológiák” kategóriájába tartozni, úgymint a felderítés, a járőrözés, a terület- és csapatvédelem, a taktikai/stratégiai teherszállítás vagy akár a harci drónok harci drónok elleni csatája. Ennek ellenére a védelmi fejlesztések jelentős befolyást, hatást gyakorolnak az egyéb polgári hasznosítás területére is [15].

A Tématerületi Kiválósági Program TKP2021-NVA-16 azonosító számú „Alkalmazott katonai műszaki, had-, és társadalomtudományi kutatások a nemzetvédelem, nemzetbiztonság területén a Hadtudományi és Honvédtisztképző Karon” című projekt Integrált-mintarepülőter kiemelt kutatási terület Drone Sensor (SEN) kutatócsoport Senior kutatójaként a szerző az áttekintett irodalmak alapján a cikkben összefoglalta a pilóta nélküli légi járművekkel a repülőtéren végrehajtható munkafolyamatokat és azok közül néhányat a megvalósíthatósági lehetőségeit annak érdekében, hogy a költségesebb és helyenként lassabb emberi erőt miként lehet észszerűen kiváltani.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Thomas, Andrew R. Soft Landing: Airline Industry Strategy, Service, and Safety. Apress (2011). p.154.ISBN 978-1-4302-3677-1.
- [2] AeroNews: Budapest repülőterei [Online]. Available: <https://www.aeronews.hu/index.php/aerohistory/repueloter/181-budapest-repueloterei>
- [3] Kiss B., Major G., Légből kapott segítség a Covid-19 ellen, Repüléstudományi tanulmányok, Repüléstudományi Szemelvények 2020, 280–306. 2021. [Online]. Available: <http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem-2020.pdf>
- [4] Major G.: A természetes vízbázisok jellemzőinek feltérképezése és védelme drónok segítségével. Polgári Védelmi Szemle 14.: DAREnet projekt Különszám 2022 pp. 50–63., 14 p. 2022. [Online]. Available: <http://www.mpvsz.hu/pv-szemle>
- [5] Gajdács L., Major G., „Az UAV alkalmazásának kockázatai a biztonságtechnika területén,” Repüléstudományi Közlemények, 30. évf. 2. sz. 101–112. 2018. [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_2/2018-2-09-0497_Major_Gabor-Gajdacs_Laszlo.pdf
- [6] Major G.: A pilóta nélküli légijármű rendszerek nemzetbiztonsági célú felhasználásával kapcsolatos kutatások, Repüléstudományi közlemények (2015), pp. 115–120., [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_1/2015-1-10-0181-Major_Gabor.pdf
- [7] Major G.: Észszerű szabályozás vagy tiltás, avagy mit lehet kezdeni a drónokkal? Repüléstudományi Közlemények, 27. évf. 1. sz. 2015. pp. 168–169. [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_1/2015-1-15-0218-Major_Gabor.pdf
- [8] Ujjady A., Major G.: A civil drónszabályozáson innen, a katonáin túl, Repüléstudományi Közlemények, 33. évf. 2. sz. 167–180. 2021. DOI: 10.32560/rk.2021.2.12 [Online]. Available: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/5596/4738>
- [9] Csóré A., Major G.: A pilóta nélküli légi járművek (UAV) evolúciója. Repüléstudományi Közlemények, 33. évf. 1. sz. 2021. pp. 171–191. DOI: 10.32560/rk.2021.1.13
- [10] Столкновение дрона и самолета на большой скорости показали на видео, [Online]. Available: <https://www.yugopolis.ru/news/stolknovenie-drona-i-samoleta-na-bol-shoj-skorosti-pokazali-na-video-115576>
- [11] Seyrüseferim: FOD Nedir? [Online]. Available: <https://seyruseferim.com/fod-nedir/>
- [12] RepülniJó: Concorde-katasztrófa: egy legendás gép tragédiája, [Online]. Available: <http://www.repulnijo.hu/concorde-katasztrofa/>
- [13] John R. Allan, Alex P. Orosz: The cost of birdstrikes to commercial aviation (2001). [Online]. Available: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=birdstrike2001>
- [14] Washington State University: Automated drones could scare birds off agricultural fields, [Online]. Available: <https://news.wsu.edu/press-release/2022/06/01/automated-drones-could-scare-birds-off-agricultural-fields/>
- [15] Gajdács L., Major G.: Katonai célú drónok fejlesztése a jelenkorban, a jövőt vizionálva, Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből III. (2022) Budapest: Ludovika Egyetemi Kiadó, pp 101–120.

Drónpilótának lenni nem megterhelő semmilyen módon..., vagy mégis?

Being a drone pilot is not stressful in any way... or is it?

Major Gábor^{1} – Tóth Zoltán²*

¹Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, 5008 Szolnok, Kilián u. 1., major.gabor@uni-nke.hu

²Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, 5008 Szolnok, Kilián u. 1., tothz1101@gmail.com

Összefoglaló: A pilóta nélküli légi járművek 1900-as évekbeli megjelenése a légvédelmi alakulatok célgépei képében történt meg, majd a felmerülő igényeknek megfelelő átalakításuk és fejlesztésük során felismerték, hogy nem csupán „áldozati bárány” lehet ez az autonóm jármű, hanem önmaga lehet akár a farkas is. A portyát követően a falka megpihen, de a „háborús élmények” örökre megmaradnak.

Kulcsszavak: pilóta nélküli légi jármű, UAV, UAS, drón, katonai műveletek, pszichológia

Abstract: Unmanned aerial vehicles first appeared in the 1900s in the form of target aircraft for air defence forces, and as they were adapted and developed to meet emerging needs, it was recognised that this kind of airplane could be not only a "sacrificial lamb" but also the wolf itself. After the ambush, the pack rests, but the "war experience" will be eternal.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, UAV, UAS, drone, military operations, psychology

1. BEVEZETÉS

Minden ember életében van olyan gyermeki korszak, amikor rendőr, tűzoltó vagy pilóta szeretne lenni. A 20. század ipari forradalmainak és technikai fejlődésének köszönhetően még nehezebb helyzetbe kerültek a gyerekek, mivel már abban is döntenünk kell, hogy a repülőgép fedélzetén vagy attól távol szeretnének pilóták lenni, miközben mégiscsak ők irányítják azt a bizonyos légi eszközt. Nagy dilemma ez, és nem csupán ennek a korosztálynak, hiszen tudományos tényekkel, érvekkel sem egyszerű alátámasztani, hogy a légi jármű vezetésének melyik változata a megterhelőbb.

A repülőtechnika terén elért jelentős fejlődés eredményének köszönhetően a drónok¹ mint speciális repülő eszközök megjelenése, elterjedése jelentősen alakítja át az élet számos területét, a honvédelmet, a katasztrófavédelmet, a bűnmegelőzést, a nemzetbiztonsági eljárásokat és természetesen a polgári felhasználást egyaránt. A „*változás kézenfekvő, a fejlődés pedig garantált*”, hiszen a levegőben közlekedő járművek nélkül, legyen az ember által a fedélzeten tartózkodva vezetett vagy akár távolról irányított, netalán teljesen önállóan, autonóm módon működő, nem tartana itt az emberiség [1] [2] [3].

Alkalmazásuk lehetővé teszi olyan feladatok elvégzését, amelyek túl hosszán tartónak bizonyulnak, és egy pilóta sem lenne képes a sikeres végrehajtásukra, vagy túl veszélyesek a pilóták részére, és testi épségüket veszélyeztetné a küldetés megvalósítása. A pilóta nélküli légi járművek alkalmazása kiterjedhet felderítésre, megfigyelésre, rádiótechnikai átjátszásra, rádióelektronikai zavarásra, támadásra és még számos más katonai célok megvalósítására is [4] [5].

A technológia fejlődik, ám tisztán látható, hogy a kutatás és a fejlesztés egyre inkább a harci feladatokat ellátó drónok autonóm működése, többcélú feladatainak ilyen jellegű végrehajtása irányába tolódik, amelyet kétségkívül a mesterséges intelligencia kutatása és további fejlesztése tud megfelelően támogatni. Ennek a két kutatási területnek (a pilóta nélküli légi járművek és a mesterséges intelligencia) a kedvező elegye olyan légi képességeket hozhat létre a harcászati felhasználás terén, amely nem csupán a harctéri, de hadászati vagy úrkörülmények között is rendkívül hasznos és hatékony megoldásokat lesz képes adni az emberiségnek. Kijelenthető, hogy a légi robotok megérkeztek a katonai műveletek minden szegmensébe, miután minden körülmények között a technológia és tudomány vívmányait felhasználva tökéletesen kiegészítik vagy szükség esetén helyettesítik az embert a veszélyes küldetések során [6]. Ám az is látható, hogy az autonóm működés során is valakinek „meg kell húznia a ravaszt...” Pillanatnyilag az emberiség sem erkölcsi, sem etikai, sem pedig technológiai tudásban nem áll azon a fejlettségi szinten, hogy a tűzparancsot átadja egy robotnak.

Amíg nem jön el az a korszak, amikor a robotok robotok ellen vívják meg az emberiség harcát, addig valakinek felügyelnie, irányítania kell a légi harci organizmusokat, és a végén a tűzparancsot kiadva megsemmisítő csapást kell mérnie az ellenségre. Mint mindennek, ennek is megvannak a következményei és az utóhatásai, úgy az ellenséget nézve, mint azt, aki a célt megjelölte és megsemmisítette.

A következő fejezetben a szerzők bemutatják, hogy milyen érzelmi körülmények között dolgozik, él az, aki „meghúzza a ravaszt”.

¹ Unmanned Aerial Vehicle (UAV)/Unmanned Aerial System (UAS)/Unmanned Aircraft (UA) – Pilóta nélküli légi jármű. ICAO Circular (2011) 328. 1–38.

2. A TÁVOLRÓL MEGVÍVOTT HARC UTÓHATÁSAI

„A harc lehet közvetett, de a trauma az valóságos.”

Annak ellenére, hogy az UAV-operátorok nincsenek közvetlen harci érintkezésben az ellenséggel, a tetteik következményét élőben, akár „jobb minőségben” is láthatják, mintha valóságban ott lennének. A harcok következményein, az élet eltűnésén, az anyagi javak enyészetté válásán és a rakéták pusztításain túl teljesen más, brutális erőszakot is láthat a kezelőszemélyzet.



1. ábra. Egy MQ-9 drón pilótafülkéje [7]

Az amerikai légierő egyik felmérése szerint az ilyen jellegű munkát végzők közül majdnem minden ötödik volt szemtanúja például nemi erőszaknak, egyesek közülük több mint 100 nemi erőszaknak vagy kínzásnak egy egyéves ciklusban. Ezek az operátorok nem tudnak csak úgy félrenézni, elfordítani a tekintetüket az erőszak láttán, hiszen a munkájuk miatt nem is szabad. Ők támogatják és segítik az amerikai szárazföldi csapatok és szövetségeseik védelmét a levegőből azáltal, hogy figyelik a fenyegetéseket, és irányítják a repülő drónokat. A távoli hadviselés azért is egyedülálló, mert az operátoroknak hosszú műszakokat kell végigülniük, gyakran éjszakánként, majd miután vége, gyorsan át kell váltaniuk a munka és a hétköznapi élet között. Ami, lássuk be, nem egyszerű. Sok esetben olyan lehet, mintha a missziós katona minden egyes bevetés után hazatérne a családjához, majd vissza a terepre. Ahogy teltek az évek, tisztán kirajzolódott, hogy a drónpilóták kiegészi aránya valójában magasabb, mint a hagyományos pilótáké. Egy korai elképzelés szerint ezek a pilóták valamilyen poszttraumás stresszbetegségben szenvednek. Ahogy azonban egyre több pilóta szenvedett ettől, a szakemberek kissé megváltoztatták az álláspontjukat. A PTSD² helyett azt állították, hogy ezek a pilóták az úgynevezett „mesterlövész-szindrómában”³ szenvednek. A mesterlövész-szindróma esetén a katona érzelmileg szenved attól, hogy embereket öl nagy távolságból, és ennek kimenetelét a fegyverének optikáján keresztül végig is kíséri. Mivel a célpont gyakran nem jelentett közvetlen veszélyt a mesterlövészre, erkölcsi diszsonanciát jelent, hogy kioltja valaki életét, aki rá, az életére nem is jelent közvetlen veszélyt. Ebből az aspektusból vizsgálva nyilvánvaló párhuzamot lehet húzni a drónpilóta és a mesterlövész munkája között. Ahogy egyre több kutatást végeztek a drónkezelők bevetéseivel kapcsolatban, két egymást kiegészítő ok-okozati összefüggésre is rájöttek.

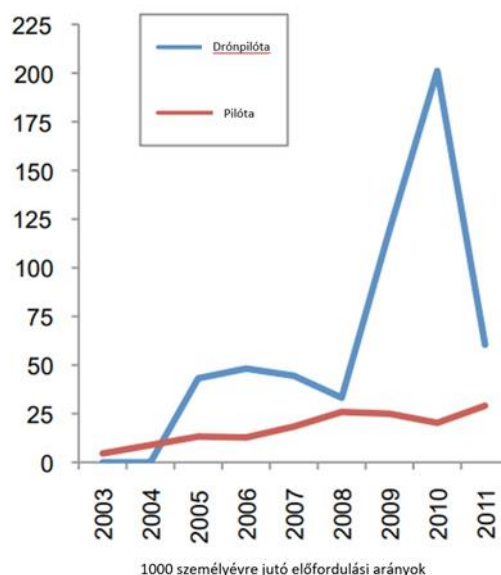
Először is annak ellenére, hogy a pilóta jellemzően fizikailag távol van a harctól, néha ez teljesen más kontinenst jelent, információs szempontból azonban a lehető legközelebb van a célpontokhoz. A pilóta napokig vagy hetekig megfigyelés alatt tarthatja a kijelölt célterületet, célszemélyt vagy célpontot, mielőtt elindítja a támadást. Ez idő alatt a koordinátákkal, technikai paraméterekkel meghatározott célpont „élővé kezd válni”, emberi jellemzők párosulnak a kamera túloldalán megfigyelt egyénhez, személyiséggé formálódik, ismerőssé válik. Látják a célpontjukat étkezni és a családjával és barátaival együtt lenni. Miután végrehajtották a támadást, a drónpilótától gyakran elvárják, hogy elvégezze a harci kárfelmérést, hogy megbizonyosodjon a célpont likvidálásáról. Ráadásul az ilyen kárfelmérő események nagyon fontos információkat szolgáltathatnak a célpontokról. Például: Ki megy a holttesthez? Ki gondoskodik a temetésről? Hogyan reagálnak a családtagok? Ha mindezt összekapcsoljuk azzal a ténnyel, amelyet a drón pilótája a hosszú távú megfigyelés

² Post-Traumatic stress Disorder – A poszttraumás stressz zavar vagy poszttraumatikus stressz-szindróma egyfajta védekezési mechanizmus, amely traumatikus események után lép fel.

³ Mentális betegség, szorongásos zavarral járó lelki szindróma.

során kialakíthatott, akkor a célpont egy információban gazdag emberré válik, nem pedig egy pusztá jelenséggé a képernyőn. A leírtak alapján megállapítható, hogy a drónpilóta információs szempontból sokkal közelebb áll a célpontokhoz, miközben jelentős erkölcsi disszonanciát tapasztalhat ellentétben egy „hagyományos” pilótával szemben. Az erkölcsi zavar abból adódhat, hogy az operátor a szolgálatának ideje alatt az „élet-halál” jogával rendelkezik, ő dönti el, hogy lecsapjon-e, vagy sem, majd a „műszak” után visszatér a civil életébe, ahol az előbb felsorolt tényezők már tiltottak, és ezt nehezen vagy egyáltalán nem tudja a megfelelő módon kezelni. Ez létrehozta azt az állapotot, amelyet az emberek most „erkölcsi sérülésnek” neveznek, ami egy pszichológiai deviáns állapot, pszichológiai probléma. A hagyományos PTSD-től eltérően a drónok szenzorai által alkotott adatok, tények, képi megjelenő tartalmak információban gazdag, de földrajzilag távoli jellege olyan helyzetet teremt, amelyben a harcér és a normalitás közötti morális disszonancia jelentős pszichológiai és érzelmi ártalmakat okozhat az UAV-pilóták számára. Fontos felismerni, hogy az ilyen erkölcsi sérülés nem függ attól, hogy a pilóta ténylegesen elkövet-e valami erkölcsileg tiltott dolgot.

A katonai etikának van egy olyan történelmi hagyománya, amely egészen az ókori Hellászig nyúlik vissza, és amelyben a katonák vagy parancsnoki beosztásban lévő személyek bizonyos erőszakos cselekedeteit megengedhetőnek tekintették. Ha például egy katonának halálos erőszakot kell alkalmaznia, hogy megvédjen egy ártatlan családot a család tagjainak életét fenyegető ellenséges katonától, a katona tetteit ezen „szabályok” alapján jogosnak tekintették. Ezzel párhuzamba állítva, ha egy drónhadjárat felhatalmazással, egy alapos indokkal indított háború része, valamint a felvonultatott erő alkalmazása szükséges és arányos az ellenség által jelentett fenyegetéssel, az UAV-pilóta cselekedetei potenciálisan indokoltak tekinthetők [8] [9].



2. ábra. Nem korrigált előfordulási arányok, a lelki/mentális eredmények aránya pilótatípusonként, U.S. Air Force, 2003. október 1. – 2011. december 31.
Készítette Major Gábor a [10] alapján

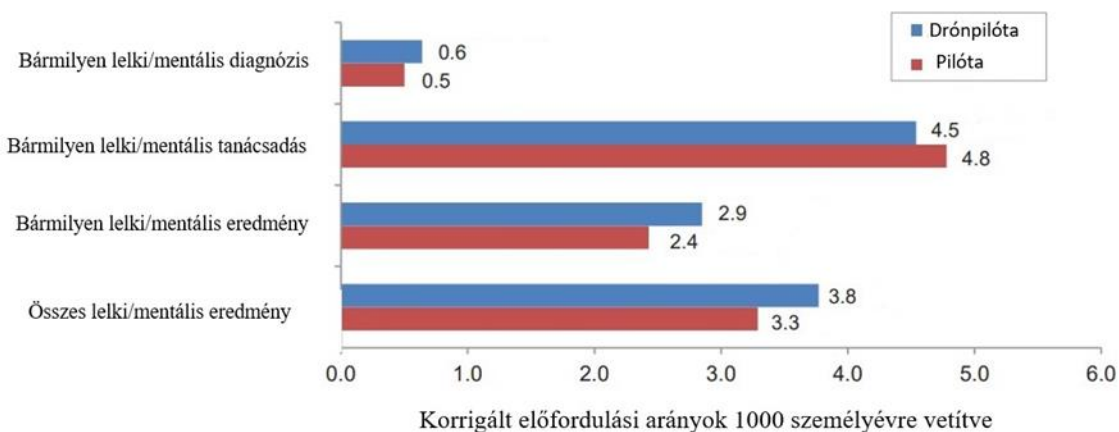
Az Egyesült Államok légierijének repülőorvosi iskolája számos tanulmányt végzett [10] az amerikai drónpilóták mentális egészségéről. A 2. ábra megmutatja az összefüggést a felfegyverzett drónok bevetésének száma és az operátorok mentális állapota között. A 2001 szeptemberi amerikai eseményeket követően a megnövekedett bevetésszám markánsan megfigyelhető, a drónfegyverzet-kezelők között addig nem látott számban fordultak elő mentális zavarok, míg a pilótás repülőgépek bevetéseinél nem volt ilyen szembetűnő az összefüggés. A hivatkozott tanulmány ebből a felismerésből kiindulva vizsgálta és értékelte az érzelmi kimerültséget, a cinizmust és a szakmai hatékonyságot, névtelenül, három csoportra osztva, de már csak a pilóta nélküli légi járművek pilótái között: felfegyverzett UAV-operátorok, a fegyvertelen felderítődrón-operátorok és a nem harcoló pilóták. Megállapították, hogy a fegyvertelen felderítő UAV-operátorok csoportjában magasabb volt a foglalkozásból adódó stressz aránya, valamint magasabb volt a magas érzelmi kimerültség és a cinizmus aránya, ami vélhetően a hosszú munkaidőnek, a több műszakos munkarendnek, az extra feladatoknak/adminisztratív feladatoknak, a szakmai előmenetel késedelmének volt betudható. A megkérdezettek 11%-a számolt be magas szintű pszichológiai distresszről⁴, és kevesebb mint 2%-uk esetében az eredmények összhangban voltak a PTSD diagnózisával.

Ugyanennek a csoportnak egy későbbi tanulmánya összehasonlította a klinikai distressz és a poszttraumás stressz arányát egy anonim, standardizált önbevallásos kérdőív segítségével a fegyveres UAV-operátorokkal és a

⁴ Káros stressz, ami már teljes mértékben egészségtelen.

nem harcoló operátorokkal. Megállapították, hogy a klinikai distressz és a PTSD aránya magasabb volt a fegyveres UAV-kezelők körében (20% és 5%), mint a nem harcolóknál (11% és 2%). Bár a PTSD ezen aránya más amerikai tanulmányokhoz képest alacsony volt, úgy tűnik, hogy az UAV-kezelők körében a klinikai distressz megemelkedett szintje aggodalmat keltett a kritikus képesség fenntartásáért aggódó parancsnokokban.

Ennek eredményeképpen az amerikai légierő magas szintű biztonsági engedélyekkel rendelkező klinikai pszichológusokat vezényelt az aktív szolgálatot teljesítő drónegységekhez, hogy javítsák a mentális egészségügyi ellátáshoz való hozzáférést, és megpróbálják csökkenteni a potenciálisan traumatikus események hatásait.



3. ábra. Korrigált előfordulási arányok, a lelki/mentális eredmények aránya pilótatípusonként, U.S. Air Force, 2003. október 1. – 2011. december 31. Készítette Major Gábor a [10] alapján

További tanulmányok visszamenőlegesen vizsgálták az amerikai légierő drónpilótáinak és a pilótáknak a mentális egészségi állapotát 2003 és 2011 között az elektronikus egészségügyi nyilvántartásokon keresztül, aminek egyszerűsített eredménye a 3. ábrán látható. Megállapították, hogy a drónpilóták 8,2%-ának és a pilóták 6%-ának volt nyilvántartott mentális egészségügyi betegsége, amelyek diagnosztizált mentális zavarokból és mentális egészségügyi problémákból álltak, mint például párkapcsolati vagy családi körülményekkel kapcsolatos problémák, amelyek csak tanácsadást igényeltek. Az alkalmazkodási zavar és a depressziós zavar volt a két leggyakoribb diagnózis mindkét csoportban. A PTSD előfordulási aránya 1000 főre vetítve 0,9 volt a drónpilóták esetében, míg a pilóták esetében 0,7. Az adatok feldolgozása után állapították meg azt, hogy mindkét csoportban statisztikailag egyenértékű volt a mentális egészségi kimenetelű kórképek aránya, annak ellenére, hogy a drónpilóták önbevallásuk szerint magas stressz- és fáradtságszintről számoltak be. Emellett a két pilótacsoportban a mentális egészségügyi állapot bármely kimenetelének előfordulása alacsonyabb volt, mint a különböző foglalkoztatási csoportokhoz tartozó egyéb légierős tagoké.

Ahhoz, hogy megfelelő egészségügyi támogatást lehessen nyújtani a drónoperátoroknak, pontos mentális követelményeket lehessen megfogalmazni ehhez a szakmához, meg kell ismerni a drónműveletek minden egyes jellemzőjét. A drónüzemeltetők vegyenek részt megfelelően célzott pszichológiai oktatásban és felkészítésben, amely szorosan kapcsolódik a betöltött beosztásukhoz! Hosszú távon nyomon kell követni őket a foglalkozásukból eredő „harc” stressz mérése és tanulmányozása céljából, valamint azok valószínűsíthető hatásainak nyomon követése érdekében. Ez magában foglalhatná egy olyan, akár a bevetés közepén végzett szűrési tevékenység végzését, amely a végzett beosztás pszichológiai kockázati profiljára van szabva. Végül pedig lehetőséget kell biztosítani számukra, hogy részt vehessenek egy személyre szabott és szabványosított stresszlevezető és reintegrációs szakaszban, miután „visszatértek a műveleti környezetből”. Igaz, ezeknek az intézkedéseknek a bevezetéséhez jelentős érdekérvényesítésre és erőforrásokra van szükség. Ez a felülvizsgálat egy lépés annak az irányába, hogy megteremthető legyen a megfelelő toborzási, kiválasztási, képzési és támogatási rendszer, amelynek következtében a drónpilóták képesek lesznek megfelelni a modern drónhadviselés kezelőivel szemben támasztott, mentális egészségügyi elvárásoknak [10] [11].

3. KONKLÚZIÓ

Miután a pilóta nélküli légi járművek megjelenését követően mind szélesebb körben történt a hasznosításuk, törvényszerűnek mondható, hogy olyan helyen, olyan munkakörben is megjelennek ezek a légi eszközök, ahol a szerepük a fegyveres harc. Ezt a pusztítást egy távoli helyről, zárt, ingerszegény környezetből hajtja végre az erre kiképzett személyzet, amelynek szakmai felkészítése minden vitán felülállóan, tökéletesen megtörtént. Vajon ugyanez mondható el a lelki/mentális felkészítésükről is? A publikációban leírtak alapján ebben a cikk írói nem tudtak egyértelműen állást foglalni. Egy katona, aki a haza védelmére felelős, amit az élete árán is megvéd, felkészül, hogy szemtől szembe az ellenséggel megvívja a harcát, és megteszi, ami a kiképzésében szerepelt. A drónpilóták is ugyanezt teszik, csak a speciális környezetük miatt a félelemérzetük a fizikálisan veszélyes ellenség jelenlétének hiánya miatt elveszett, ezáltal a

videójátékban megismert „game over” felirat nem jön törvénytörően egy virtuális bevetést követően. Erről az érzésről számol be Brandon Bryant⁵ is, aki a következőket mondta:

„Mi csak egy csomó kukkoló nebuló vagyunk, akik a technológiát használva pusztítást zúdítanak azokra az emberekre, akik a saját országukban élnek, és megpróbálják a lehető legjobban leélni az életüket” [12].

Ez a publikáció a Tématerületi Kiválósági Program TKP2021-NVA-16 azonosító számú „Alkalmazott katonai műszaki, had- és társadalomtudományi kutatások a nemzetvédelem, nemzetbiztonság területén a Hadtudományi és Honvédtisztképző Karon” című projekt Integrált-mintarepülőter kiemelt kutatási terület Drone Sensor (SEN) kutatócsoport munkájaként valósult meg.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Ujjady A., Major G.: A civil drónszabályozáson innen, a katonain túl Repüléstudományi Közlemények, 33. évf. 2. sz. 167–180. 2021. DOI: 10.32560/rk.2021.2.12 [Online]. Available: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/5596/4738>
- [2] Kiss B., Major G., Légből kapott segítség a Covid-19 ellen, Repüléstudományi tanulmányok, Repüléstudományi Szemelvények 2020, 280–306. 2021. [Online]. Available: <http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem-2020.pdf>
- [3] Major G.: A pilóta nélküli légi jármű rendszerek nemzetbiztonsági célú felhasználásával kapcsolatos kutatások, Repüléstudományi közlemények (2015), pp. 115–120., [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_1/2015-1-10-0181-Major_Gabor.pdf
- [4] Major G.: A pilóta nélküli légi jármű rendszerek használata az elektronikai hadviselésben, Repüléstudományi Közlemények 29. évf. 3. sz. 309–312. 2017. [Online]. Available: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_3/2017-3-22-0490_Major_Gabor.pdf
- [5] Csóré Attila, Major Gábor: A pilóta nélküli légi járművek (UAV) evolúciója. Repüléstudományi Közlemények, 33. évf. 1. sz. 2021. pp. 171–191. DOI: 10.32560/rk.2021.1.13
- [6] Gajdács L., Major G.: Katonai célú drónok fejlesztése a jelenkorban, a jövőt vizionálva, Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből III. (2022) Budapest: Ludovika Egyetemi Kiadó, pp 101–120.
- [7] 174th Fighter Wing, Mock MQ-9 Cockpit Featured at 174th Fighter Wing Display at New York State Fair. [Online]. Available: <https://www.174attackwing.af.mil/News/Article-Display/Article/439358/mock-mq-9-cockpit-featured-at-174th-fighter-wing-display-at-new-york-state-fair/>
- [8] Adam Henschke, „Modern soldiers can kill a target on computer, then head home for dinner – and it’s giving them ‘moral injury’ [Online]. Available: <https://www.abc.net.au/news/2019-09-29/unmanned-combat-drone-pilots-moral-injury-warfare-dissonance/11554058>
- [9] npr, The Warfare May Be Remote But The Trauma Is Real [Online]. Available: <https://www.npr.org/2017/04/24/525413427/for-drone-pilots-warfare-may-be-remote-but-the-trauma-is-real?t=1639522401495>
- [10] Jean L. Otto, DrPH, MPH; Bryant J. Webber, MD (Capt, USAF): Mental Health Diagnoses and Counseling Among Pilots of Remotely Piloted Aircraft in the United States Air Force. [Online]. Available: https://nation.time.com/wp-content/uploads/sites/8/2013/04/pages-from-pages-from-msmr_mar_2013_external_causes_of_tbi.pdf
- [11] TIME USA, Drone Pilots: No Worse Off Than Those Who Actually Fly [Online]. Available: <https://nation.time.com/2013/04/02/drone-pilots-no-worse-off-than-those-who-actually-fly/>
- [12] ABC News: What it's really like to live with drone warfare, [Online]. Available: <https://www.abc.net.au/news/2017-08-18/perspectives-from-the-front-line-of-the-drone-war/8793400?nw=0&r=HtmlFragment>

⁵ 2006 és 2011 között az Amerikai Egyesült Államok Légierében drónkamera-kezelő volt. Feladata a célzott gyilkosságok volt.

Analysis on Seaplane Drag Components and Reduction

Rozgonyi László¹

¹Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézet 4400, Nyíregyháza Sóstói út 31/B
e-mail: rozgonyi.laszlo@nye.hu

Abstract: Seaplanes need meticulous design to be able to operate from water. Despite this, a seaplane suffers high weight and drag penalties mainly due to take-off and landing segment requirements, which consist of the lowest ratio of a whole flight mission as a consequence of which climb, cruise, decent performance is strongly impaired making seaplane operations less popular. This paper studies the criteria set against sea hulls or floats, analyses land and seaplanes mass data and shows possible optimisation ways.

Keywords: Seaplane, Hull Design, Drag Penalties, Hydrofoil Utilisation

1 INTRODUCTION

Amphibians and Floatplanes need to compromise numerous factors to sustain the ability to take-off from or to land on water surface including drag and weight penalties, which make the operation of such aeroplanes much less effective hindering their wide-range operations. There are several methods to minimise these penalties, however they are still pronounced. The question may arise, whether it is advantageous to install hydrofoils to improve efficiency or not. Basically, the aim of this paper is to discuss flying boat's design principles, their associated penalties and to list the advantages, drawbacks and limitations of hydrofoil application.

2 HULL AND FLOAT DESIGN REQUIREMENTS

Most importantly, the shape of hull and floats need to fulfil the following criteria:

- Buoyancy
- Low water-drag
- Suppressed water spray
- Static and dynamic stability on water
- Manoeuvrability and control on water
- Adequate versatility

Buoyancy is obviously provided by static lift generated by the volume of the hull or float. In case of floats, a single float shall be enough to support the maximum structural weight of the aeroplane submerged in freshwater (density $\rho=993 \text{ kg/m}^3$), having an optimum 7.5-8 length/maximum diameter ratio [1].

The shape of the hull and float is governed by three main aspects, low wetted area in case of hydrodynamic lift, suppressed water spray and stability.

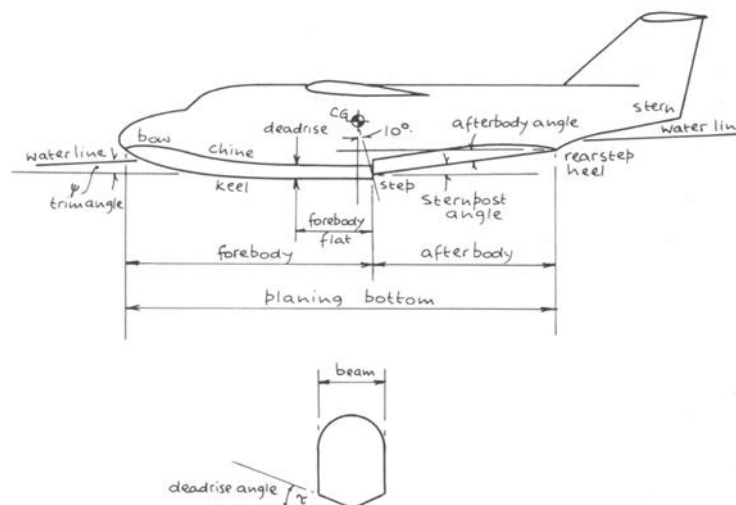


Figure 1. Terminology [1]

Low water drag is addressed by low wetted area when speed builds up. This is attained by applying the step illustrated in Figure 1 creating separation, which guarantees the low wetted area, thereby low amount of skin friction drag in water. Based on [6], the lift coefficient of the step:

$$c_{LS} = \frac{m}{\rho b_s^3} \leq 0,5 \quad (1)$$

where:

- c_{LS} : lift coefficient of the step
- m : craft mass [kg]
- ρ : water density [kg/m³]
- b_s : width of the step

Optimum rear step heel shall be between 0.04-0.05 b_s [2].

Another intriguing feature is the so-called deadrise, which serves two purposes, water impact reduction on the one hand, and spray suppressions on the other [3].

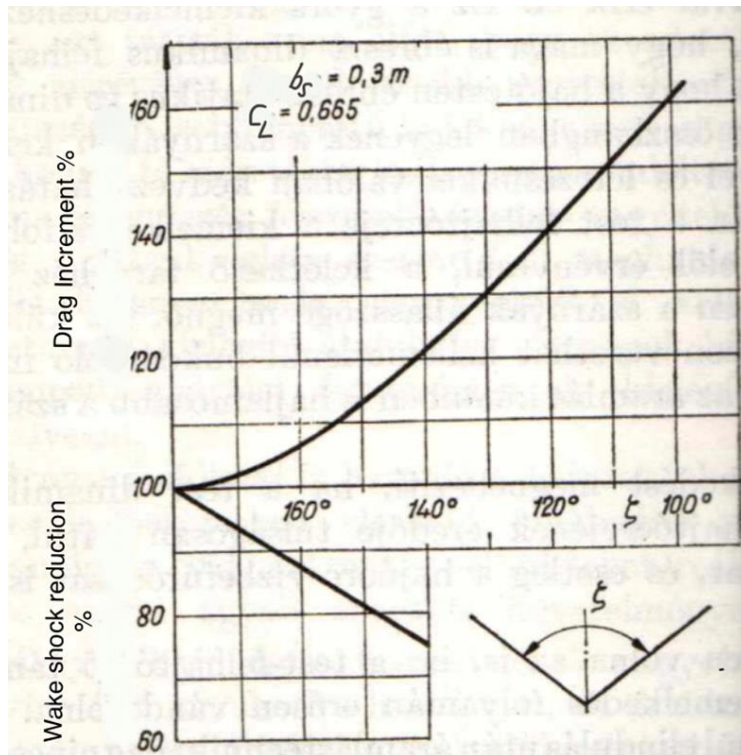


Figure 2. Drag penalty and shock load reduction versus inverse deadrise angle [2]

The function of the water impact strength and $\zeta = \pi - 2\tau$ inverse deadrise angle can be determined from Figure 2, consequently increasing the deadrise angle reduces water loads linearly, however drag penalty increases in a close-to-parabolic manner. The deadrise angle τ shall not be less, than 15 degrees to reduce landing impact.

2.1 Spray Suppression:

High-speed motion through water causes liquid spray in two forms, ribbon and blister spray. Blister spray is relatively damaging, since it consists of high-momentum water thrown upwards, which may reach engines, wing leading edges, etc. The blister spray height usually determines the position of wings, engines and tailplane. To reduce blister spray height, the “V”-shaped forebody is hollowed or so-called spray dams are utilised.

2.2 Static Stability:

Static stability depends on the distance between the metacentre and the centre of gravity. The metacentre is defined as the point of intersection of the line of buoyancy and the plane of symmetry (Figure 3). If the metacentre is located above the centre of gravity, the craft is said to be stable, if it is below the vessel, bank generates a destabilising moment,

consequently it is unstable. The nominal values for the metacentre-centre of gravity distance is between 0.4-1 meters [2]. To obtain the required level of positive stability (metacentre-centre of gravity distance), the centre of buoyancy shall be shifted in a pronounced way laterally in case of a bank as apparent from Figure 3. This requires a combination of struts, cables, auxiliary floats, etc.

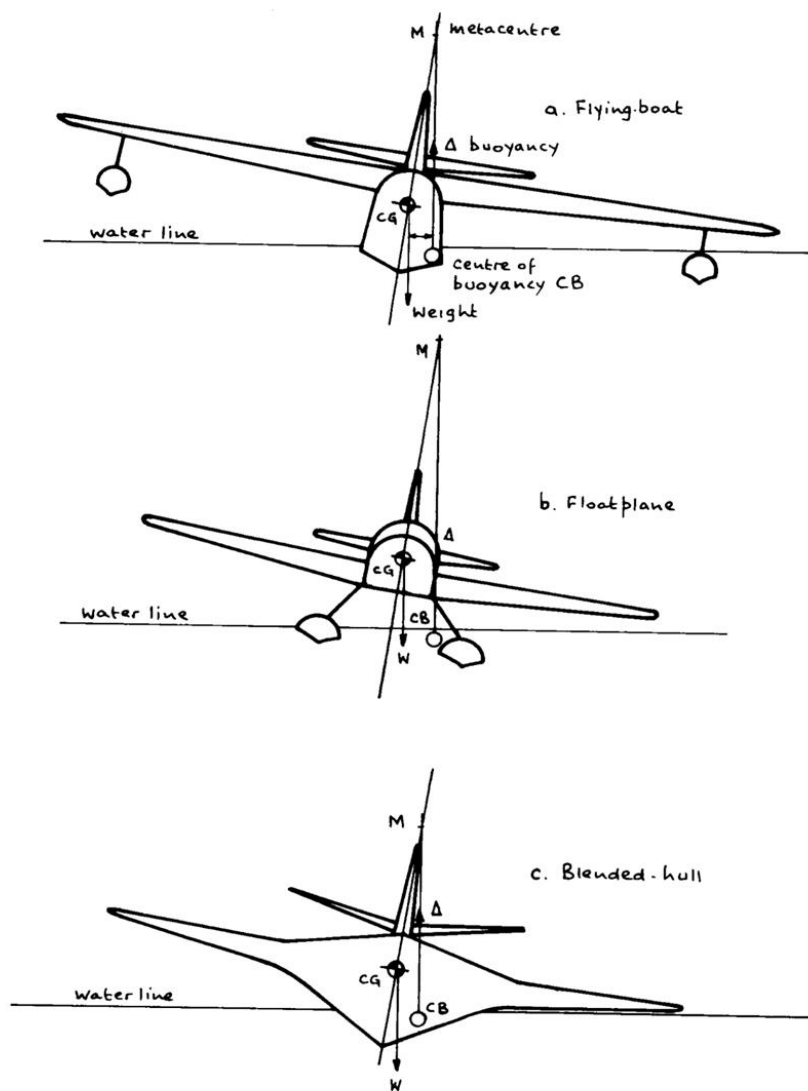


Figure 3. Metacentre definition and location for different configurations [1]

2.3 Dynamic Stability:

Solution to equations of dynamic stability may result in three different categories of instability for a planning hull or float [1]:

- Pattering: small amplitude oscillations in pitch
- Skipping: “flat stone bouncing” effect
- Porpoising: high amplitude oscillations in pitch, which may become divergent.

Porpoising is caused by the afterbody dipping into the water, which at higher speeds can result in being thrown into the air below the stall speed. Porpoising is mitigated by using a flat forebody, high afterbody keel and sternpost angles, forebody-warp (increasing τ deadrise angle towards the nose of the aeroplane).

The above summary of hull design principles strictly determines the shape and of the hull or float. This shape however creates high parasite drag airborne, due to the blunt body with sharp edges and the required struts, cables, additional floats (for flying boat category as well). It is also apparent that a floatplane’s parasite drag penalties are further increased by having even less proper aerodynamic shape.

3 PENALTIES

3.1 Weight Penalties

Weight increments are difficult to calculate due to the “snowball effect”, i.e. a change of one component creates a chain of changes. Therefore, weight penalties are analysed from the historical point of view, i.e. comparing similar category land and sea aeroplanes (same class, all-metal wings, same engine type). The data are from [1], [2], [7]. The data can be considered representative for all-metal wing aeroplanes due to the low number of available sea plane configurations.

Table 1: Weight Comparison of Land and Sea Aeroplanes Source: own

Type (land)	Type (sea)	MTOM (land)	MTOM (sea)	BEM (land)	BEM (sea)	Max. Fuel Mass (land)	Max. Fuel Mass (sea)	App. Max. Payload (land)	App. Max. Payload (sea)	MTOM/BEM (land)	MTOM/BEM (sea)	BEM/MPayload (land)	BEM/MPayload (sea)
-	-	lbs	lbs	lbs	lbs	lbs	lbs	lbs	lbs	-	-	-	-
Pazmany PL4A	Anderson Kingfisher	1416	1500	875	1032	147	117	394	351	1.618285714	1.453488372	2.220812183	2.94017094
Osprey II	Zenith CH200	1500	1560	881	970	139	153	480	437	1.70261067	1.608247423	1.835416667	2.219679634
Piel Super Diamant	Spencer Air Car Jr	1873	1800	1146	1150	248	317	479	333	1.634380454	1.565217391	2.392484342	3.453453453
Piel Super Diamant	Aerocar Super-Coot	1873	1950	1146	1100	248	294	479	556	1.634380454	1.772727273	2.392484342	1.978417266
Socata Rallye RG	AAC S1B2	1852	1900	1125	1073	149	235	578	592	1.646222222	1.770736253	1.946366782	1.8125
Socata ST10	Lake 200 Buccaneer	2690	2690	1594	1555	310	323	786	812	1.687578419	1.729903537	2.027989822	1.915024631
Cessna Skylane	IAC TA16	3100	3000	1757	1900	517	540	826	560	1.764371087	1.578947368	2.127118644	3.392857143
Cessna Skywagon	Spencer Air Car Sr	3350	3200	1700	2190	517	552	1133	458	1.970588235	1.461187215	1.500441306	4.781659389
Partenavia P68 land	Partenavia P68 sea	4321	5185	2800	3948	-	-	1521	1232	1.543214286	1.313323202	1.840894149	3.204545455
DHC3 Otter	GAF N22B	8500	8300	4613	5560	1770	1770	2117	970	1.842618686	1.492805755	2.179026925	5.731958763
Average:										1.704425023	1.574658379	2.046303516	3.143026667

It is apparent from Table 1 that the maximum allowable take-off mass (MTOM) for the same basic empty mass is only 8% less for sea planes compared to land planes. However, if payload is considered the difference is nearly 54%. What this means that for the same payload the average of the minimum structural mass, in other words the basic empty mass (BEM) is almost 54% higher for sea planes compared to land planes. This difference is caused by the higher fuel masses, located in wing tanks creating less heavy wing structures on the one hand. Obviously, reinforced hulls, auxiliary floats, struts also increase the basic empty mass.

3.2 Drag Penalties

Drag increment is made up of two main sources, the lift-dependent (induced drag) and parasite drag. The induced drag increment is difficult to examine accurately, since it depends on the wing planform, aspect ratio, wing tip devices, etc. Despite this, an approximation can be made, especially for Partenavia P68, which is given floats “only” to change configuration, but significant modifications on the wing have not been performed.

If the MTOM/BEM ratios are considered, the sea version of the aeroplane represents 17,5% higher mass.

$$D_i = c_{Di} \frac{\rho}{2} v^2 S = \frac{c_L^2}{\pi AR e} \frac{\rho}{2} v^2 S = \frac{2(mg)^2 n_z^2}{S \rho \pi AR e} \cdot \frac{1}{v^2} \quad (2)$$

where:

- c_{Di} : induced drag coefficient [-]
- v : velocity [m/s]
- S : wing surface area [m²]
- c_L : lift coefficient [-]
- AR : aspect ratio [-]
- n_z : load factor along the vertical axis [-]
- e : non-elliptical lift distribution correction factor [-]

This, using Equation 2, means a 38% greater induced drag for a given velocity. Obviously, at low speeds this is a significant rise, however as speed increases the value diminishes.

The parasite drag increment can however be approximately calculated by knowing the number and parasite drag coefficient and wetted area of additional devices (floats/struts, etc.).

For a floatplane (e.g. Partenavia P68) this yields:

- $c_{Dfloat} = 0,17$ reference wetted area: cross-section [1]
- $c_{Dstrut} = 0,14$ reference wetted area: cross-section [1]

Approximate cross-sectional areas:

- Floats: 0.96 m²
- Struts: 0,2 m²

For a given unit of dynamic pressure, the additional parasite drag yields:

$$\frac{D_{add}}{q} = c_{Dfloat} \cdot A_{float} + c_{Dstrut} \cdot A_{strut} = 0,1912 [m^2] \quad (3)$$

where:

- D_{add} : additional parasite drag [N]
- q : dynamic pressure [Pa]
- c_D : parasite drag coefficient [-]
- A : cross-sectional area [m^2]
- S : surface area [m^2]

The original parasite drag approximately is (drag coefficient and wetted area data from [1]):

- Original Fuselage: drag coefficient: 0.09; area: 1,8 m^2
- Wing: drag coefficient: 0.01; area: 19,2 m^2
- Stabiliser: drag coefficient: 0.013; area: 6,8 m^2
- Nacelles: drag coefficient: 0.06; area: 1,2 m^2
- Landing Gear: $n=1.25$; 0,42 m^2 (including struts)

For a given unit of dynamic pressure:

$$\frac{D_{original}}{q} = c_{Dfuselage} \cdot A_{fuselage} + c_{Dwing} \cdot S_{wing} + c_{Dstab} \cdot S_{stab} + c_{Dnacelle} \cdot A_{nacelle} + c_{Dgear} \cdot A_{gear} \cdot n_{gear} = 0,5879 [m^2] \quad (4)$$

Thus, for a unit of dynamic pressure, the rise is 32,5%. All-in-all, the drag penalty is significant, i.e. more, than 30% increment in both the induced drag and parasite drag. On top of having nearly 1,6-1,7 times drag at a given velocity, it also means that the optimum speeds are shifted to lower values, as the slope of the parasite drag parabola increases and the absolute value of the slope of the induced drag hyperbola reduces.

The drag penalty is somewhat smaller for a flying boat configuration, since the hull's parasite drag coefficient is 0,13 as an average instead of the 0.09 plus the additional floats attached to the wing and struts represent an approximate 18-23% parasite drag rise.

4 OPTIMISATION POSSIBILITIES

Based on the above, it is apparent that huge drag increments and as a consequence of which, strong performance penalties are present. On the one hand, these are caused by the aerodynamically not favourable hulls/floats/struts, whose shape and size need to meet strict requirements of hydroplaning and hydrostatics described in Section 2. On the other, significant weight penalties are present caused by reinforced structures or floats.

It is apparent from Section 2, that the shape and size of the surfaces cannot be optimised much to be better in terms of aerodynamics. Therefore, other solutions may be found, such as hydrofoils.

4.1. Hydrofoils

Hydrofoils are wings submerged into water. Because of the fact that water has significantly higher density than air, pretty small surfaces are enough to provide the required lift. Hydrofoil wings, if properly designed, can reach much higher lift-to-drag ratios (app. 30). Hydrofoils are better in efficiency than hydroplaning surfaces from app. 20 knots of velocity, which is much less, than the stall speed of a usual aeroplane.

Hydrofoils advantages:

- reduced water impact on hull, thus lighter structure can be constructed
- much reduced spray, thus better aerodynamic shape can be attained
- resolved dynamic stability problems, thus better aerodynamic shape can be designed
- shorter take-off and landing distances
- can easily be retracted into the structure to remain aerodynamically clean

Hydrofoil limitations:

- cavitation: either maximum lift coefficient or velocity is limited by cavitation. For relatively thin profiles (relative thickness being 4%) the maximum lift coefficient is 0,505 at speed 41 knots and 0,264 at speed 51,4 knots [2]. The thicker is the profile, the lower are the maximum lift coefficients. But the thinner is the profile, the higher is the structural mass.
- There are two main types of hydrofoils, partially submerged and fully submerged. Partially submerged profiles are stable in terms of surface distance, but have worse hydrodynamic characteristics. Fully submerged profiles require additional mechanisms to keep the surface distance, but better hydrodynamic performance.
- static stability of the craft is not affected.

Hydrofoils could potentially save the parasite drag increment estimated in Section 3.2, but not all the induced drag related penalties, since they would also increase the mass of the seaplane. Yet, saving 15-20% drag is highly beneficial. The exact gains and losses would be a subject of another study.

5 CONCLUSIONS

It is apparent from the study that even with careful design high losses can be expected if an aeroplane operates from water. Obviously, in certain regions or fields of operations it is inevitable to have an amphibian or seaplane. Therefore, the optimisation should be emphasised. A solution to this problem may be the application of hydrofoils, which will be the subject of another study.

CONSULTED LITERATURE

- [1] D. Stinton: The Design of the Aeroplane, London, 1983
- [2] G. Jereb: Szárnyas hajók, Budapest, Műszaki kiadó. 1986
- [3] H. Cyrus: Preliminary Design of Boats and Ships, Atglen, 2010
- [4] T. Lajos: Az Áramlástan Alapjai, Budapest, Műegyetemi kiadó, 2004
- [5] J. Roskham: Aeroplane Design, Ottawa, 1985
- [6] R. Shottorf: Experimentelle Untersuchungen zur Frage des Wassertragflügels. DVL, 1940
- [7] F. T. Jane: All the World's Aircraft, 2001

A légi közlekedés szerepe megyénk életében és a Kárpátok Eurorégióhoz történő kapcsolódásban

The role of air transport in the life of our county and its connection to the Carpathian Region

Szilágyi Dénes¹

¹Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézet 4400, Nyíregyháza Sóstói út 31/B, szilagyi.denes@nye.hu

Összefoglaló: A EU reményink szerinti keleti bővítése és Románia Schengeni övezethez történő csatlakozása előre vetíti a gazdasági és közlekedési kapcsolatok további erősödését. Ebben a cikkben a légi közlekedés lehetőségeit vizsgálom Szlovákia–Ukrajna–Románia–Magyarország határ menti régióinak kapcsolódásában. A cikk a jelenlegi helyzet elemzésén túl foglalkozik a Nyíregyházi repülőtér reális fejlesztési szükségleteinek meghatározásával és azoknak a légi közlekedési ágazatra gyakorolt hatásával.

Kulcsszavak: légi közlekedés, repülőtér-fejlesztés, Schengeni övezet, piaci szereplők igényei, turisztika, Nyíregyházi repülőtér

Abstract: The expected enlargement of the EU to the East and Romania's accession to the Schengen area foresee further strengthening of economic and transport relations. In this article, I explore the potential of air transport in connecting the border regions of Slovakia–Ukraine–Romania–Hungary. In addition to analysing the current situation, the article will identify the realistic development needs of Nyíregyháza Airport and their impact on the aviation sector.

Keywords: air transport, airport development, Schengen Belt, market actors' needs, tourism, Nyíregyháza Airport

1. BEVEZETÉS

E munka az Ukrajnai háború okozta változásokat ideiglenesnek tekinti, és ezért annak jelenlegi hatásait nem veszi figyelembe. Az EU bővítése és főleg a Schengeni övezet kiterjesztése egy közös gazdasági és kereskedelmi rendszer kiépítését is jelenti. Ezeknek a folyamatoknak az egyik fő kiszolgálója a közlekedés. A vizsgálat tárgyát képező térség – Szlovákia–Ukrajna–Románia–Magyarország – határ menti régióinak kapcsolódása és szervesülése történelmi, földrajzi és gazdasági szempontból is indokolt, nem beszélve arról, hogy e régió európai viszonylatban az egyik legszegényebb [1]. A közlekedés jelenlegi lehetőségeinek és a szükséges jövőbeni fejlesztéseknek az elemzése ezért szükségszerű. Légi közlekedési szakemberként pedig kötelességemnek érzem, hogy a légi közlekedés lehetőségeit és racionális fejlesztési szükségleteit elemezzem különös tekintettel megyénkre, segítséget nyújtva adott esetben a döntéshozóknak a fejlesztési pályázati irányok meghatározásában [2].

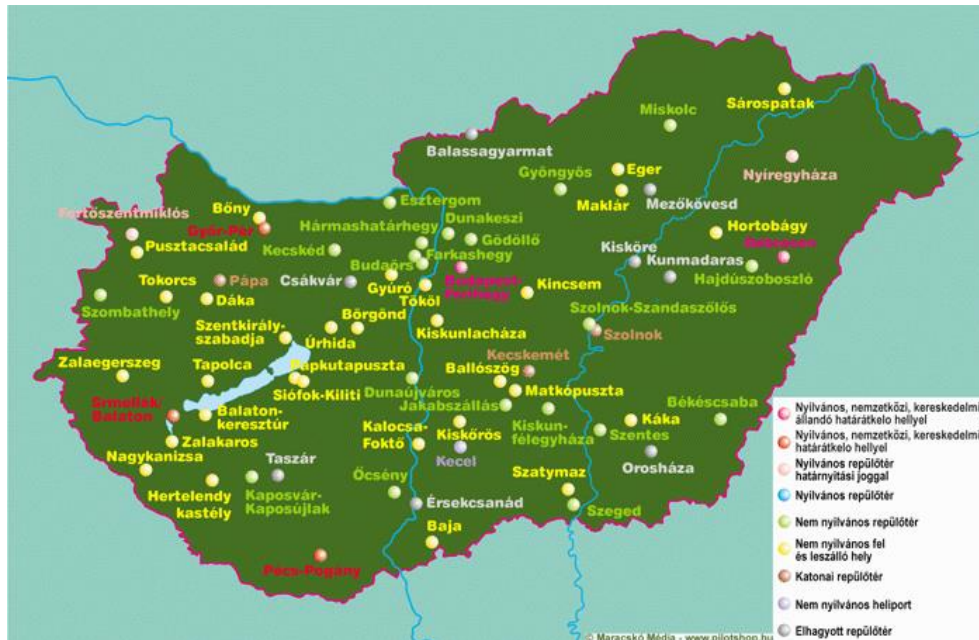
2. MEGYÉNK LÉGI KÖZLEKEDÉSE

Szabolcs-Szatmár-Bereg megye életében a légi közlekedés nem játszik jelentős szerepet. Ennek egyik fő oka, hogy a menetrend szerinti repüléseket 1964-ben leállították, és utána már nem volt lehetőség ezt az utazási módot választani. A menetrendszerű forgalom újraindulásának további gátja, hogy a megye egyetlen szilárd burkolatú kifutópályája a Nyíregyházi repülőtéren (LHNY) csupán 1000 m hosszú és 20 m széles, ami nem teszi lehetővé gazdaságosan üzemeltethető 3–50 személyes légi járművek, de az üzleti világban használt sugárhajtású gépek zömének kiszolgálását sem. Ezen túlmenően a légi közlekedési igények kiszolgálására ott van a közelben fekvő Košice/Kassa (LZKZ) és Debrecen (LHDC), amelyek a Schengeni övezetben vannak, és jelentős célállomás-kínálattal rendelkeznek. Vonzó lehet még a közelben található Satu Mare/Szatmárnémeti (LRSM) repülőtere is, amely – Románia EU-tagállam lévén – szintén könnyen elérhető. Ukrajna Kárpátaljai régiójában egyetlen polgári repülőtér van, az Ужгород/Ungvári repülőtér (UKLU). E repülőtér a szovjet érárt követően (néhány üzletkötőt kivéve) nem generál utasforgalmat a megyénkben, mivel eltekintve néhány charterjáratról, alapvetően belföldi forgalmat bonyolít (főleg Kijevbe) [3]. Tehát a célállomás-kínálat a másik három repülőtérhez képest elenyésző. Ezentúl a repülőtér megyénkből történő elérése közúton vagy vasúton a határátkelés jellemzően nagy időszükséglete [4] miatt is eléggé nehézkes.

2.1. A megye repülőtér-hálózatának és légi közlekedésének ismertetése

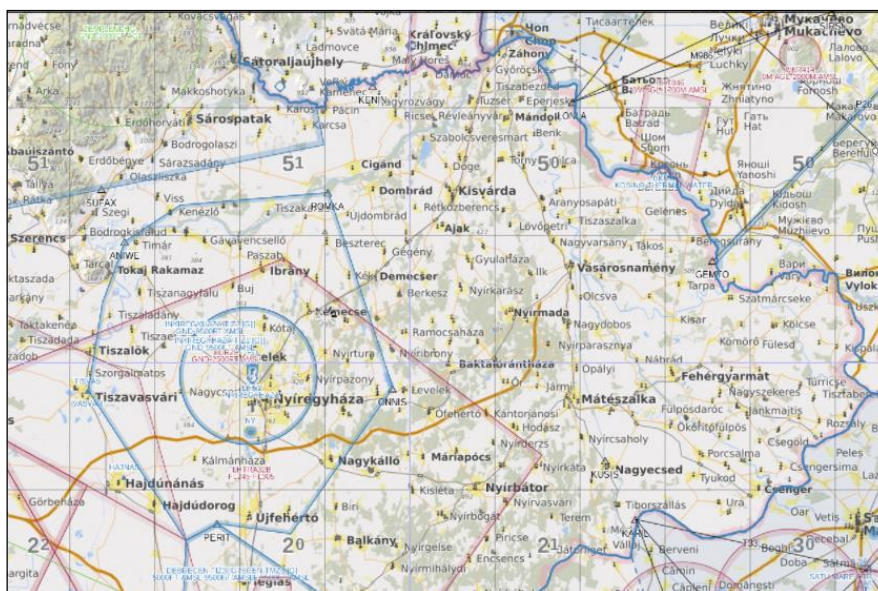
A megyében a nyíregyházin kívül egy sportcélú füves repülőtér van Balkányban (LHBA) (ezt is a Nyíregyházi Sportrepülők alapították, és alapvetően hobbirepülési célokat szolgál) és egy megszüntetett füves repülőtér

Fehérgyarmaton. Ez utóbbit a rendszerváltás után létesítették a Budapesttel való gyors összeköttetés céljából, hiszen abban az időben autópálya híján a közúti és a vasúti elérhetőség is 6 óra volt. Az autópálya-hálózat bővülésével a közúti elérhetőség 3 órára csökkent, a vasúti viszont nem változott, sőt inkább romlott. Sajnos a költségszámítások azt mutatták, hogy nem lesz fizető kereslet egy ilyen – a többi közlekedési módhoz képest lényegesen drágább – szolgáltatás igénybevételére. Emiatt nem akadt olyan vállalkozás, amely ebbe bele mert volna invesztálni. Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy megyénk jelenleg is az ország egyik legszegényebbe, amit jól tükröz az 1. ábra is. Hazánkban a megyénken kívül Borsod-Abaúj-Zemplén megyében van csak 2 repülőtér, a többi megyében ez a szám jóval magasabb.



1. ábra. Magyarország repülőterei [5]

Megyénkben a repülés tradicionálisan a kiképzéseket szolgálta, amelynek fő oka az időjárás, illetve a szocialista időkben a nyugati határtól való legnagyobb távolság volt. A kiképző repülések szempontjából ugyanakkor kifejezetten előnyös, hogy a forgalmat gyakorlatilag LHNY generálja, és nagyon kevés korlátozott légtér van megyénkben (2. ábra).



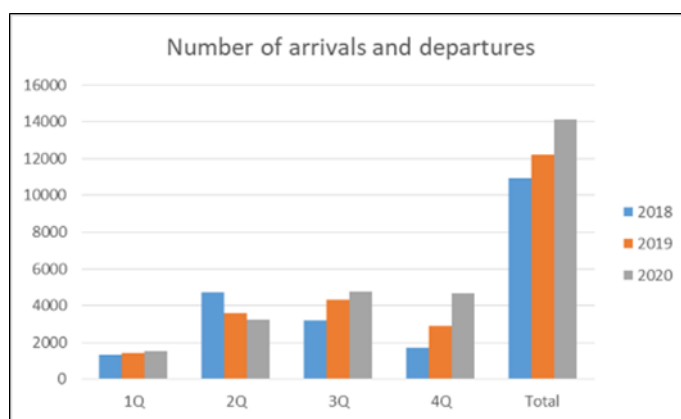
2. ábra. Légterek Szabolcs-Szatmár-Bereg megyében [6]

A sportrepülés alapvetően a hétvégéken generál forgalmat az LHNY és LHBA repülőtereken. A repülőtéren a Tréner Kft. repülőiskolájában történik a Nyíregyházi Egyetem repülőgép-vezető hallgatóinak gyakorlati repülési képzése. Az egyetemi hallgatók képzése mellett a Tréner Kft. a Wizz Air légitársasággal szerződés alapján végzi a kereskedelmi

pilóták képzését. A képzésekben lévő hallgatók létszáma eléri a 150 főt, ami a fejenkénti 140 órás repülési programmal tetemes légi forgalmat generál, ahogyan azt az 1. táblázat és a 3. ábra is mutatja.

1. táblázat. Légi- forgalmi adatok LHNY (Forrás: Tréner Kft.)

Erkezesek és indulások száma			
Évek	2018	2019	2020
1Q	1340	1435	1508
2Q	4718	3586	3225
3Q	3170	4322	4746
4Q	1688	2894	4647
Összesen	10 916	12 237	14 126



3. ábra. Légi forgalmi adatok LHNY (Forrás: Tréner Kft.)

A növendékek főként magyar, román, lengyel, bolgár és ukrán nemzetiségűek. A képzés infrastruktúrájának fejlesztéséhez a képzést végző vállalkozás jelentős anyagi befektetést végzett. Új oktatóépület, tárolóhangár épült, beszerzésre került egy minősített, új szimulátor, és rendszerben áll 6 db C-152 alapkiképzőgép, 14 db műszeres repülésre alkalmas Piper Pa-28 típusú és 3 db kétmotoros repülőgép. A kiképzésre jelenleg használt gépek száma 23. A szabadidős hobbi, valamint sportrepülés szintén szerepet játszik a repülőtér életében – vitorlázóegyesület és ejtőernyőklub is működik. A 3. ábrán jól látható a forgalom növekedése, amelyet nemcsak a növendékek emelkedő száma, de az éledező üzleti repülés igényei is növelnek. Ezt mutatja, hogy évi 80-100 nemzetközi repülés is van, amelyből a kereskedelmi repülések száma 20 körüli. Ez utóbbiakat a megyénkben lévő külföldi vállalkozások menedzsereinek, tulajdonosainak szállítása, illetve a Tokaj által generált borturizmus adja.

2.2. A repülés szerepe a régió összeköttetésében

A régió légi összeköttetésében megyénkben alapvetően csak az LHNY játszhat szerepet. Ennek okai a meglévő infrastruktúra (szilárd burkolatú pálya és gurulóutak, fénytechnika, VOR¹/DME² és NDB³-adók), illetve a nemrég bevezetett PBN⁴-eljárások és az új légtérhatár (lásd a 2. ábrát). A nemzetközi, nagy létszámú pilótaképzés mellett a régióban lévő multinacionális vállalatok és más nagyvállalatok tartós ipari termelési befektetései egyre inkább igénylik a speciális légi forgalmat elsősorban az üzleti személyszállításban. Ezenkívül Nyíregyháza és térsége gazdasági életében már most is jelentős szerepet tölt be a turizmus (a gyógyfürdő és az állatpark, múzeumfaló stb.), amely a meglévő adottságok jobb kihasználásával a jövőben nagymértékben tovább is fejleszthető.

A repülőtér és a légi forgalom fejlesztése szorosan kapcsolódik mindezekhez, hiszen a légi forgalom és a turizmus egymás növekedését kölcsönösen segíti. A Nyíregyházi repülőtér funkciója eltér a Debreceni (LHDC), Košice/Kassai (LZKZ), Ungvári (UKLU), Nagybányai (LRBM) vagy Szatmárnémeti repülőtérétől (LRSM), hiszen Nyíregyháza a pilótaképzést, az üzleti repülést és a helyi turizmus egy részét (charterforgalom, vadásztársaságok utazása, kisebb rendezvényekre érkező csoportok, sportsapátok és szurkolóik utazása stb.), míg a többi repülőtér a nemzetközi kereskedelmi, személy- és áruforgalmat és a tömegturizmust szolgálja ki menetrendszerű légi járataival. Eme célok elérésének érdekében mindenképp szükséges a repülőtér fejlesztése az alábbiak szerint:

¹ Very High Frequency Omnidirectional Range / Ultrarövidhullámon működő, minden irányból fogható rádiójeladó

² Distance Measuring Equipment / Távolságmérő berendezés

³ Non-directional Beacon / Középhullámú nem irányított jeladó

⁴ Performance Based Navigation / Teljesítményalapú navigáció

A nagyobb távolságokról érkező üzleti és turistacsoportok kiszolgálása érdekében szükséges egy legkevesebb 1500 m hosszú és 30 m széles új futópálya és gurulótújainak kiépítése és a meglévők felújítása (4. ábra).



4. ábra. Az új 1500 m x 30 m futópálya elhelyezkedése (Forrás: Szász Máté)

Ebben az esetben a 2. táblázat szerinti üzleti és a 3. táblázat szerinti ingázó (commuter) repülőgépek [5] kiszolgálására válna alkalmassá a repülőtér (a sárgával kiemeltnek rövid lenne még ez a pálya is). Az összehasonlítás alapjául a legnagyobb földi úthossz-szükségletet okozó, megszakított felszállás esetén szükséges gyorsítási és megállási távolságot választottam.

2. táblázat. Üzleti gépek (Forrás: saját)

BizJet (5-7 MAPSC⁵)	ASDR⁶ (m)
C500	1174
C525 M2	1255
C550 B:	1240
C650	1678
Hawker 400A/XP	1368
Lear Jet 35/36	1874
Lear Jet 40	1288
Lear Jet 45	1294
Falcon 10/100	1323
Phenom 100	904
Phenom 300	933
Eclipse 500	1196
Eclipse 550	952
Average	1267

⁵ Maximum Passenger Seat Configuration: Maximális utasülés-konfiguráció

⁶ Accelerate Stop Distance Required: Szükséges gyorsítási és megállási úthossz

3. táblázat. Commuter⁷ gépek (Forrás: saját)

Commuter	MAPSC	ASDR (m)
Saab 340	34	1396
ATR-42-300	40	1268
Dash 8 Q300	50	1454
Dornier 228	15	700
Dornier 328	34	1074
EMB-120	30	1560
King Air B200	9	1576
Piaggio P180	9	922
Cheyenne II	6	1006
Cheyenne III	10	1240
Average	24	1220

Természetesen ehhez még szükséges a repülőtéri tűzoltószolgálat, üzemanyag-kiszolgálás, utaskezelés, fény- és műszertechnika, műszeres eljárások, az ezekhez szükséges meteorológiai állomás, a futópályákat tisztító járművek stb. fejlesztése is.

A Kárpátok régió közlekedési rendszerében mindazonáltal szintén csak ez a 6 repülőtér játszhat szerepet, mert a határellenőrzés képessége szükséges (nemcsak a Schengeni övezeten kívül lévő repülőtereken, hanem bárhol, ahol az övezeten kívülre indítanak, vagy onnan fogadnak járatokat). A légi közlekedés szükségessége mellett szólnak általában a nagy menetidők, amelyeket a Kárpátok régióban még mindig hiányos gyorsforgalmi úthálózat és a határátlépések miatti torlódások okoznak.

Ugyanakkor szót kell ejteni a légi közlekedés hátrányairól is. A Kárpátok régióban a repülés költségeiben nem is annyira a távolság – mert az egy relatíve kis tartományban van, ami szintén nem kedvez a repülésnek (a legtávolabbi viszonylat az LZKZ–LRBM is csupán 200 km) –, hanem a repülőtéri költségek (lásd 4. táblázat) nagyon megnövelik a szükséges fuvardíjakat.

4. táblázat: Repülőtéri költségek [8]

Charges	LZKZ	LRSM	LRBM	UKLU	LHDC	LHNY	Average
Landing	14,11 €	0,40 €	4,00 €	16,38 €	16,50 €	13,00 €	10,73 €
Parking	1,33 €	0,15 €	0,15 €	0,05 €	0,20 €	0,17 €	0,34 €
INTL PAX ⁸ service	6,27 €	2,00 €	11,00 €	16,98 €	27,17 €	31 €	17,34 €

A táblázatból látható, hogy a legrágább repülőtér az LHNY, aminek az oka, hogy határnyitást kell kérni, mivel nincs állandó határrendészeti szolgálat a repülőtéren. (A határrendészet tisztviselői végzik az ellenőrzést, akik legtöbbször a vállalati határátelőről jönnek csak ezért, miközben számtalan a rendőrséghez tartozó szerv van Nyíregyházán, amelyeknek a bevonásával észszerűsíthető lehetne ez a művelet, és a költségeket is lehetne csökkenteni. Abban az esetben, ha az utaslétszám indokolja, állandó szolgálatot lehetne telepíteni a repülőtérre). Amennyiben a Schengeni övezeten belül van a cél (jelen esetben csak az LZKZ és az LHDC), akkor ezek a költségek nem jelentkeznek. Tehát igazi lökést a Kárpátok régió légi összeköttetésében valamennyi érintett ország Schengeni övezetbe csatlakozása (és akkor már nem csak ez a 6 repülőtér jöhetne számításba), vagy egy olyan 4 oldalú megállapodás lenne szükséges, amely alapján ezektől a költségektől mentesülhetne a régiós légi közlekedés.

3. A LÉGI KÖZLEKEDÉSI KAPCSOLAT MODELLEZÉSE

Ebben a fejezetben a legkisebb investálással megvalósítható szolgáltatással feltételeztem megvalósítani a régiós légi összeköttetést, és azt összehasonlítottam a közúti közlekedéssel. A vasúti közlekedéssel való összehasonlításnak nincs realitása a szolgáltatásokban lévő hihetetlen aszimmetria miatt: Szlovákia felé a fővonalis összeköttetés és a Schengeni övezet belső mozgása révén alapvetően 2,5 órás menetidővel lehet számolni, ami Ukrajna irányában a határellenőrzés és vasúti nyomtávsváltás miatt jelentősen megnövekedett – átlagosan 6 órás – menetidőt jelent a fővonalis összeköttetés ellenére. Románia irányába csak mellékvonalis összeköttetés lehetséges (az is jelentős kerülővel), és a

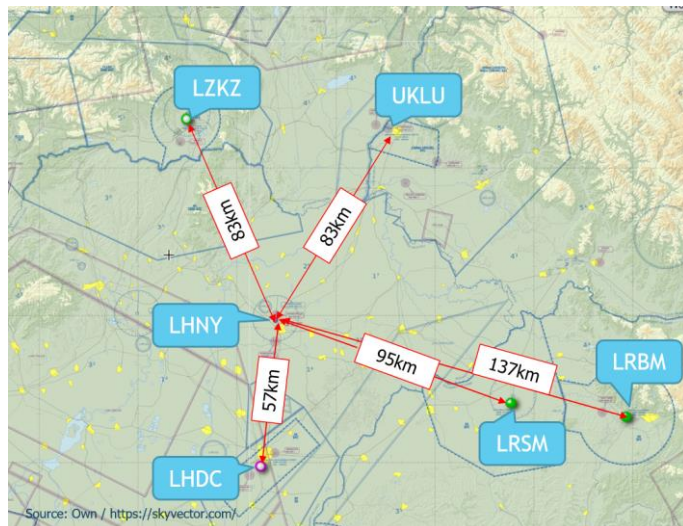
⁷ Commuter: Ráhordó, jellemzően 100 fő alatti MAPSC és 1000 km-nél kisebb hatótávolságú repülőgép

⁸ International Passenger Service: Nemzetközi utas kiszolgálása

Schengeni övezet külső határát ellenőrzéssel lehet csak átlépni, ami miatt a menetidő a 8 órát is elérheti. Amennyiben a régiót átívelő viszonylatokban gondolkozunk, a kép még rosszabb, ahogyan azt később látni fogjuk.

3.1. A légi közlekedési kapcsolat vizsgálata

A vizsgálathoz a Piper PA-28 típusú repülőgépet választottam, mivel ez a repülőgép nagy számban áll rendelkezésre, viszonylag olcsón beszerezhető és fenttartható. Kiszámítottam, hogy az LHNY-ről indulva átlagos utazósebességgel mekkora idő alatt lehet elérni a Kárpátok régió másik 5 repülőterét (a távolságokat az 5. ábra is mutatja), és ez kb. mennyibe kerülne egy ilyen kisrepülőgéppel végzett légitaxi-repülés esetén.



5. ábra. LHNY és a környező kereskedelmi repülőterek távolsága (Forrás: saját)

A repülőgép légióradíja 250 € és 3 utas szállítására képes. Feltételeztem a 3 utast minden esetben, hiszen, ha csak 1 utas veszi igénybe a szolgáltatást, akkor is ki kell fizetni a gép díját, legfeljebb a repülőteri költségek lesznek alacsonyabbak. Az 5. táblázat tartalmazza az eredményeket.

5. táblázat. Légitaxiköltségek (Forrás: saját)

Airport	LZKZ	LRSM	LRBM	UKLU	LHDC
Distance (km)	83	95	137	83	57
Flight time	0:31	0:35	0:51	0:31	0:21
Cost	194 €	247 €	343 €	289 €	106 €

A táblázat eredményei főleg 400 Ft/€ árfolyamon átszámítva igencsak tekintélyes összegeket adnak, amelyek akár a személygépkocsi, de főleg a közösségi közlekedési módok költségeihez képest sokkal magasabbak. Jól látható az eredményeken a repülőteri költségek hatása. Ebben az útiköltségben nincs benne a repülőterttől a város központjáiig és fordítva történő eljutás költsége, amely az egyetlen előnyt, az időmegtakarítást szem előtt tartva valószínűsíthetően a taxiszolgáltatás és nem a közösségi közlekedés költsége lenne.

3.2. A légi és a közúti összeköttetés összehasonlítása

A közúti közlekedéssel való összehasonlítás kedvéért végeztem számításokat az LZKZ–LRBM útvonalra, amely a leghosszabb, és ezért a legkedvezőbb a repülés szempontjából. A vasúti lehetőségek közül ([9] alapján) a legrövidebb menetidő is 15 óra és Budapest felé kerülővel, a leghosszabb menetidő 25 óra (Bécs felé kerülővel). A vonatjegy árát nem tudtam kideríteni, mivel online nem lehet jegyet vásárolni erre a viszonylatra. A nagyvárosok közötti nemzetközi autóbusszjáratok nincsenek még Románia és Ukrajna irányába kiépülve, így ez a lehetőség egyelőre nem vehető számításba [10]. A modell alapja ugyanaz a PA-28 légitaxi, mint az előző esetben. Ez a távolság autóval a legrövidebb úton 253 km, és a menetidő 4:05. Ugyanez repülőgéppel 1:15. Az átlagos várakozási idő Csengersima határátkelőnél 0:30. Ezzel a teljes menetidő 4:35. Az autó költségét a magyar adószabályok alapján kiszámítottam 7 literes fogyasztást és 15 HUF futási költséget feltételezve. Az eredmény 32 € (400 HUF/EUR árfolyammal számolva). Az autónál még jelentkezik egy 3 € értékű román útdíj [11]. Szlovákiában [12] és Hazánkban [13] nem kell útdíjat fizetni a 3,5 t alatti járművekre. A repülőgépnél ki kell fizetni az LZKZ esetén az utasok kezelési költségét, az LRBM esetén a leszállási,

parkolási illetékeket és az utaskezelési költséget. Mindkét repülőtér esetén 0:30 várakozási időt számítottam (utaskezelés, földi műveletek). Az eredményeket a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat. LZKZ–LRBM utazás költségelemzése (Forrás: saját)

Vehicle	Distance [km]	Trip time	Waiting time	Total time	Charges	Cost of vehicle	Total cost
Airplane	200	1:15	1:00	2:15	85,95 €	313 €	398 €
Car	253	4:05	0:30	4:35	3,00 €	32 €	35 €

4. ÖSSZEZÉS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A fentiekből látható, hogy a repülőgép több mint 10-szer drágább a személyautónál, az utazással töltött idő pedig csak a fele az autóénak. Nem is beszélve arról, hogy a modell nem vizsgálja a helyi közlekedési költséget, hiszen azt szintén bérelt járművel vagy taxival kell megoldani.

A repülés hátránya még az időjárásfüggése. Még ha van PBN vagy egyéb műszeres eljárás, akkor is az erre a gépre alkalmazható minimumok miatt, illetve a jegesedési viszonyok fennállása esetén a téli hónapokban nagyon sok repülést le kellene mondani. Jobban felszerelt gázturbinás légi jármű (pl. egy Cessna Caravan) szolgálatba állítása a repülőgép minimum 10-szeres beszerzési ára, és az általában 2-3-szor nagyobb (és ezért valószínűleg feltölthetetlen) utasbefogadó képesség miatt bizonyosan tovább növeli a költségeket.

A fentiekből látható, hogy az LHNY fejlesztése inkább a nagyobb távolságokról érkező, turista- és üzleti forgalom miatt szükséges, amelyben esetleg még mint a Schengeni övezet leginkább délkeleti ki- és belépőpontjaként játszhat komolyabb szerepet (főleg Ukrajna irányában). A Kárpátok régió belüli légitaxi-szintű közlekedést az egyre fejlődő – főleg közúti – infrastruktúra miatt nem tartom számottevő mértékben lehetségesnek. Ez inkább a repülőgép-tulajdonosok/-bérlők turisztikai célú, nem túl jelentős mozgásszámot produkáló szegmense marad.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Władysław ORTYL: A Régiók Európai Bizottsága véleménye – A Kárpátok régióra vonatkozó makroregionális stratégia, Az Európai Unió Hivatalos Lapja (2020/C 79/03), [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019IR3425&from=EN>
- [2] A „Korszerű határok infrastruktúra – sikeres Kárpátok Régió” „MOBI” projekt 2020. március 1-én indult a Magyarország-Szlovákia-Románia-Ukrajna ENI Határon Átnyúló Együttműködési Program 2014-2020 támogatásával. A program hivatalos oldala. [Online]. Available: <https://mobi.iardi.org/hu/>
- [3] Az ungvári repülőtér weboldala. [Online]. Available: <https://udj.aero/>
- [4] Határinfó adatok, A Magyar Rendőrség hivatalos honlapja. [Online]. Available: <https://www.police.hu/hirek-es-informaciok/hatarinfo>
- [5] A Maracskó Média Bt. honlapja, amelyen Magyarország repülőtereinek adatai találhatóak meg. [Online]. Available: <http://www.hungaryairport.hu/airport.php>
- [6] A HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. web alapú szolgáltatása, a kisépkes pilóták repülés előkészítésének és tervezésének céljából. [Online]. Available: <https://www.netbriefing.hu>
- [7] A Liberty Jet Co. honlapja, amely vállalat üzleti célra használatos repülőgépek üzemben tartásával és bérbeadásával foglalkozik. [Online]. Available: https://www.libertyjet.com/performance_comparison/
- [8] Magyarország, Szlovákia, Románia és Ukrajna Légiforgalmi Információs Kiadványainak GEN 4.1 fejezete. [Online]. Available: <https://www.ead.eurocontrol.int/>
- [9] A Szlovák Államvasutak honlapja [Online]. Available: <https://www.zssk.sk/en/>
- [10] Bernie TSCHIRREN és Michael CAMERON által létrehozott utazásszervező honlap. [Online]. Available: <https://www.rome2rio.com/map/Ko%C5%A1ice/Baia-Mare>
- [11] Az SC Scala Assistance srl honlapja, amely segítségével lehetőség van a Romániai útdíj fizetésére. [Online]. Available: <https://www.rovinieta.ro/hu/rovinieta>
- [12] A Szlovákiai elektronikus útdíjfizetési rendszer portálja. [Online]. Available: <https://www.emyto.sk/hu/charged-vehicles/vehicles-subject-to-toll-payment>
- [13] A Magyarországi elektronikus útdíjfizetési rendszer portálja. [Online]. Available: <https://hu-go.hu/articles/article/kire-vonatkozik-es-kire-nem-a-dijfizetesi-kotelezettseg>

Az orosz–ukrán háborúban alkalmazott repülőfedélzeti hiperszonikus rakéta

The Russian air-to-ground hypersonic missile used in the war in Ukraine

Dr. Szilvássy László¹

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, 5008 Szolnok, Pf. 1., szilvassy.laszlo@uni-nke.hu

Összefoglaló: A február 24-én kitört orosz–ukrán háborúban számos olyan fegyvert is bevetettek, amelyekről korábban alig rendelkezünk információval, sőt még a létezésük sem biztos, hogy ismert volt. Ilyen eszköz a repülőfedélzeti hiperszonikus rakéta, a H-47M2 „Kindzsal”. Publikációmban ezt az eszközt szeretném bemutatni, kitérve a fejlesztés előzményeire és magára a hiperszonikus sebesség elérésnek rövid történetére.

Kulcsszavak: hiperszonikus, repülőfedélzeti irányítható rakéta, orosz–ukrán háború

Summary: In the Russian-Ukrainian war that started on 24 February, a number of weapons were used, of which we had little information before, and even their existence was not known. One such weapon is the Kh-47M2 “Kinzhalt” air-to-ground hypersonic missile. In my article, I would like to introduce this device, including the history of its development and a brief history of the achievement of hypersonic speeds.

Keywords: hypersonic, aircraft onboard missile, Russian-Ukrainian war

1. BEVEZETÉS

A február 24-én kitört orosz–ukrán háborúban (az orosz narratívában speciális katonai műveletben) számos olyan fegyvert is alkalmaztak a harcoló felek, amelyeket a közvélemény, beleértve a szűk szakmait is, még nem ismerhetett. Némelyikről megjelent valamilyen nagyon rövid hír az írott és/vagy online sajtóban. Ilyen eszköz a H-47M2 „Kindzsal” repülőfedélzeti irányítható rakéta. (Oroszul: X-47M2 „Кинжал”, angolul: Kh-47M2 „Kinzhalt”) [1], [2].

2. HIPERSZONIKUS SEBESSÉG

Mielőtt a rakétát bemutatom, tisztázni szeretném a hiperszonikus sebesség fogalmát. Az aerodinamikában a hiperszonikus sebesség az a sebesség, amely meghaladja a hangsebesség 5-szörösét, amit gyakran 5 Mach-nak (5M) is jelölnek. Viszont a hozzáértő, szakmát ismerő kollégák nagyon pontosan tudják, hogy az M-szám egy mértékegység nélküli viszonyszám, ami a repülési sebesség és magasság szerinti hangsebesség hányadosa [3].

$$M = \frac{v}{a(h)} \quad (1)$$

ahol:

- v – repülési sebesség;
- $a(h)$ – hangsebesség h magasságon.

Az első eszköz, ami hiperszonikus sebességgel repült, az amerikai, kétfokozatú hajtóművel rendelkező Bumper rakéta volt 1949 februárjában. Ezt a rakétát az 1944-ben kifejlesztett amerikai WAC Corporal hordozórakéta 2. fokozatából és a világháború elhíresült V2-es rakétájának 1. fokozatából építették. 2302,25 m/s (8288,12 km/h) sebességet ért el, ez kb. 6,7-szeres hangsebességnek felel meg [4].

Az űrhajózás beindításával a hiperszonikus sebesség szinte mindennapossá vált. A Földről való felbocsátás után az űreszköz a bolygó körül keringési pályára áll, ha sebessége valamivel nagyobb, mint az első kozmikus sebesség (körsebesség, orbitális sebesség; orbital velocity) 7,9 km/s (28 440 km/h).

A második kozmikus sebesség (szökési sebesség; escape velocity) 11,2 km/s (40 320 km/h) a pálya, amin az eszköz halad, „kinyílik”, és parabola lesz. Ilyen lehet például az a pálya, amivel egy másik bolygót el lehet érni, de ilyen pályát mutat a Földtől a Holdig is. Az Apolló–11 legalább ezzel a sebességgel kellett, hogy elhagyja a Földet, hogy elérhesse a Holdat.

A harmadik kozmikus sebesség 42,3 km/s (152 280 km/h). Ezzel a sebességgel kellene a Föld felszínéről elindítani egy testet, hogy eltávolodjon a Naprendszerből, és soha ne térjen vissza [5].

3. H-47M2 KINDZSAL

Orosz nukleáris töltettel is felszerelhető, hiperszonikus levegő–felszín ballisztikus irányítható rakéta. Az eredeti orosz jelölése a rakétának a 9-Sz-7660, a teljes rendszernek pedig 9-A-7660. A leggyakrabban viszont az alcímben is szereplő jelöléssel emlegetik.

Indítási távolsága hordozóeszköz-függő, MiG-31K-ról (Flash Dance) indítva több mint 2000 km, Tu-22M3-ról (Backfire) indítva elérheti a 3000 km-t. A 10–12-szeres hangsebességgel képes repülni (10–12 M), ami a magasság függvényében 3000–4080 m/s sebességnek felel meg. 20 000 m-ről indítva a felszín közelében, becsapódás előtt érheti el ezt a maximális sebességet. 20 000 m-en az ISA¹ szerint a hang terjedési sebessége 296,4 m/s, a tengerszinten $a_0 = 340,3$ m/s [1] [2] [6].

Rendszerbe állítása 2017 decemberében volt, amit Putyin 2018. március 1-jén jelentett be 5 másik stratégiai fegyverrel együtt [7]. Ezekről a cikk terjedelmi korlátai miatt nem kívánok írni.

A rakéta elsődleges feladata NATO-hadihajók és rakétavédelmi rendszerek megsemmisítése. Az oroszok állítása szerint az ismert nyugati légvédelmi-rakétavédelmi rendszerek pl. Patriot, Aegis BMD², sőt az orosz Sz-400 bizonyos modifikációi is tehetetlenek ellene. Ezt viszonylag könnyű megerősíteni, mert az ismert adatok alapján a rakéta repülési sebessége 4000 m/s körül van. Az oroszok Sz-400 légvédelmi rakéta rendszerében található légvédelmi rakéták változattól függően 900–2000 m/s sebesség elérésére képesek. Az adatok alapján a leküzdeni kívánt cél maximális sebessége 2800–4800 m/s lehet. Ez azt jelenti, hogy a legfejlettebb változata képes lehet leküzdeni a Kindzsál rakétát. Az Egyesült Államok MIM-104 Patriot légvédelmi rakétarendszer rakétája változattól függően 800–1400 m/s-os sebességgel képes repülni. Itt a célzott maximális sebessége nincs megadva, de kb. maximálisan 3000 m/s lehet. Ez viszont azt jelenti, hogy ez az eszköz már tehetetlen a Kindzsállal szemben. Az Aegis BMD-rendszer rakétája 1200 m/s sebességet képes elérni, ami kisebb, mint a MIM-104 rakéta sebessége. Tehát ez a rakéta sem képes a Kindzsál leküzdésére [8] [9] [10] [11].



1. ábra. MiG-31K a Kindzsál rakétával [2]

3.1. A létrehozás története

A rakétarendszer kifejlesztése a 90-es évek végén, a 2000-es évek elején kezdődött. Az elgondolás, hogy kvázi ballisztikus rakétát alkalmazzanak a MiG-31-es repülőgépről, ahol a repülőgép nemcsak hordozó- és indítóeszköz, hanem tulajdonképpen a rakéta gyorsítófokozata is egyben. Ez azért lehetséges, mert a MiG-31 egy nagy magasságú elfogó vadászrepülőgép. A nagy magasságon az utazósebessége elérheti a 700–780 m/s-ot (2500–2800 km/h) [12] [13]. A 9-Sz-7660 rakéta a 9M723 Iszkander rakéta repülőfedélzetre átdolgozott változata. A hordozó repülőgépen is változtatásokat kellett eszközölni, így kapta meg a MiG-31K modifikációs jelölést, és a MiG-31BSzM és MiG-31BM változatokból került átépítésre [12] [13].

A Kindzsál rakétakomplexum képes megsemmisíteni vezetési pontokat, beleértve a föld alattiakat is, repülőbázisokat, lég- és rakétavédelmi rendszereket, valamint az ellenség bármilyen nem mozgó objektumait. A rakétával

¹ International Standard Atmosphere – nemzetközi egyezményes légkör

² Aegis Ballistic Missile Defense System (Aegis BMD or ABMD) [8]

megsemmisíthetők még korlátozottan mozgó objektumok is, például csapatösszevonások és hadihajók, beleértve a cirkálókat, fregattokat, rombolókat és anyahajókat.

Hordozó repülőgépek lehetnek: MiG-31K – 1 rakétával; Tu-22M3M – 4 rakétával; Tu-160 – 4 rakétával, 2–2 egyegy forgódobban; Szu-57 – tervezetten, még nincs integrálva.

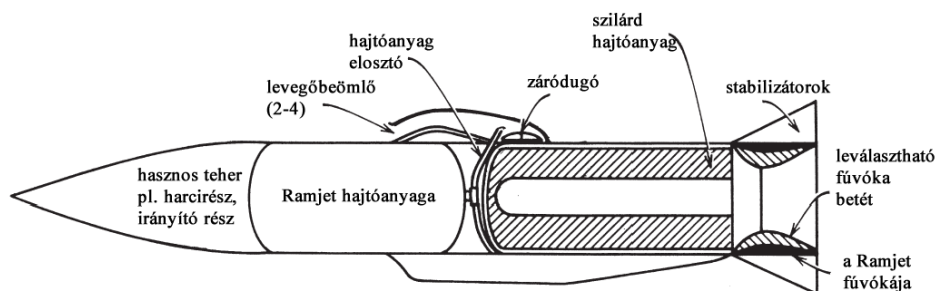
A rakétakomplexumba tartozik a ballisztikus rakéta, amely egy szilárd hajtóanyagú rakétahajtóművel rendelkezik. A rakéta irányítási rendszere magában foglal egy inerciális navigációt, műholdas (Glonass) korrekcióval. A rakéta a repülése során rádiócsatornán célkoordináta-pontosításokat kaphat, így lehet megvalósítani a mozgó célok, pl. hadihajók megsemmisítését. Ezek az irányítási módok bármilyen időjárési körülmények között alkalmazhatók [12] [13] [15] [16].

Harcászattechnikai adatok:

- maximális célmegsemmisítési távolság 2000–3000 km. Egyes források szerint a MiG-31K esetében 2000 km fölött, Tu-22M3M esetében 3000 km;
- maximális sebesség: a hang 10–12-szerese (10–12 M);
- valószínű körkörös eltérés³: 1 m;
- a harcirész tömege: 500 kg;
- a harcirész típusa: hagyományos robbanóanyag vagy termonukleáris;
- irányítás: INS, Glonass célkoordináta-pontosítással;
- hajtómű: SzHRH (szilárd hajtóanyagú rakétahajtómű).

Egyes források azt feltételezik, hogy a Kindzsal rakéta kétfokozatú hajtóművel rendelkezik, ahol az első fokozat szilárd hajtóanyagú rakétahajtómű, a második pedig egy scramjet. Ezt nagyon könnyen meg lehet cáfolni.

Ramjet vagy ahogy magyarul szoktuk említeni, a torlósugár-hajtóművel felszerelt rakéták különös ismertetője, hogy rendelkeznek valamilyen levegőbeömlő csatornával vagy csatornákkal. A csatornák száma 1, 2 vagy 4. A rakétahajtóművek felépítésével a [19], [20], [21], [22], [23] publikációimban már foglalkoztam, így terjedelmi okok miatt itt nem kívánom részletezni. A 2. ábrán egy ramjet, egy scramjethajtóművel szerelt rakéta sematikus rajza látható. Így a rajz alapján a két hajtóműtípus között nincsen különbség.



2. ábra: Ramjet⁴, scramjet⁵ felépítése [18] alapján. A szerző szerkesztése

Az első fokozat általában szilárd hajtóanyagú rakétahajtómű, a második fokozat lehet folyékony vagy szilárd hajtóanyagú. Pl. a 3M8 rakéta – a 2K11 Krug légvédelmi komplexum rakétája első fokozata szilárd hajtóanyagú, míg a második folyékony, vagy a 3M9M – a 2K12 Kub légvédelmi komplexum rakétája esetében mindkét fokozat szilárd. Ennél a rakétánál a második fokozat hajtóanyaga oxigénhiányos, vagyis nem tartalmazza az égéshez szükséges összes oxigént, ezt a légkörből pótolja. A harmadik példának a világ egyik legkorszerűbb légi harcrakétáját hozom fel, a Meteort. Ebben a rakétában szintén mindkét fokozat szilárd hajtóanyagú, de itt a második fokozat szabályozható [19] [20] [21] [22] [23] [24].

A scramjet abban különbözik a ramjettől, hogy a hajtóműben az égési folyamat szuperszonikus sebességgel megy végbe, míg a ramjet esetében szubszonikussal [18].

A fent leírtak alapján, ha a Kindzsal rakéta második fokozata scramjet lenne, akkor valamilyen levegőbeömlőknek kellene rajta lenniük. Ha megvizsgáljuk a 3. ábrát, tisztán látható, hogy a Kindzsal rakétán nem található levegőbeömlők, így az nem rendelkezhet scramjethajtóművel. Akkor hogyan lehet magyarázni a rendkívül nagy repülési sebességet? Két dologgal. Az egyik a megváltoztatott fűvókarész az eredeti Iskander rakétához képest (lásd 3. ábra), illetve a MiG-31K repülőgéppel mint hordozóval, ami egyben betölti az „első, gyorsító” fokozat szerepét is. A MiG-31 repülőgép maximális sebessége 940 m/s (3400 km/h), utazósebessége elérheti a 700–780 m/s-ot (2500–2800 km/h). Ehhez hozzáteesszük az Iskander repülési sebességét, amit a források 2100 m/s-ban adnak meg. Ez együtt már közel 2800 m/s (10 080 km/h), ami 20 000 m magasságon megfelel 9,46M-nek. Ehhez még hozzá kell számolni a fűvóka változtatásából adódó

³ CEP – Circular Error Probable – круговое вероятное отклонение (KBO) [17]

⁴ Ramjet – torlósugárhajtómű

⁵ Scramjet – Supersonic combustion ramjet – szuperszonikus égési sebességű torlósugárhajtómű

sebességyereséget és azt, hogy a rakéta gravitáció segítségével repül, ellentétben a kiinduló eszközzel az Iszkanderrel, ami föld–föld ballisztikus rakéta. Könnyen elérheti a megadott 10-12-szeres hangsebességet [25].



3. ábra. A Kindzsál rakéta (bal oldalon) és az Iszkander rakéta (jobb oldalon) [25]

Az orosz források azt állítják, hogy a rakéta szinte felderíthetetlen a jelenleg alkalmazott radarokkal. A fent említett sebesség miatt, a Kindzsál esetében azt feltételezik a szakértők – köztük én is –, hogy a rakéta előtti gázok valószínűleg ionizálódnak, ami úgynevezett plazmalopakodást tesz lehetővé. Ez azt jelenti, hogy a rakétának nagymértékben lecsökken a radarkeresztszete – hatásos visszaverő felülete –, mert az ionizálódott réteg elnyeli a rádióhullámokat. Ennek következtében a légvédelmi-rakétavédelmi eszközök nem, vagy csak nagyon kis távolságról képesek felderíteni, amikor már nem marad idő semmilyen ellentevékenységre.

A nyugati sajtóban „anyahajó gyilkos”-ként emlegetett rakéta képes egymaga elsüllyeszteni egy 100 000 t tömegű repülőgép-hordozót. Az orosz források szerint a hordozóeszközök száma nagyon korlátozott, mert a Tu-22M3M változatból eddig csak 2 db készült el, és az átépített MiG-31K változatról, ami a MiG-31BM vagy a MiG-31BSz M átépített, kimondottan a Kindzsált indítani képes változata, 2018-ban csak 10 db-ról tesznek említést. Egyes források ezt a 10-es számot azzal magyarázzák, hogy az USA-nak 10 repülőgép-hordozója van.

4. A KINDZSAL AZ UKRAJNAI HADSZINTÉREN

Egyes orosz források szerint a rakétát bevetették március 19-én az Ukrajna elleni invázióban is, és egy föld alatti fegyverraktárat semmisítettek meg vele Deljatyinban, valamint egy üzemanyagraktárat Konsztantinovszkban.

Igor Konasenkov, a Minoobroni Roszija (Минобороны России) képviselője felhívta a figyelmet arra a tényre, hogy a rakétát több mint 1000 km-es távolságból indították, viszont a sebessége miatt a repülési ideje kevesebb mint 10 perc [25] [26] [27].

Számoljunk egy kicsit! A fentebb leírtak alapján a rakéta 10–12-szeres hangsebességgel képes repülni. Az indítási magassága 20 000 m, ahol a hang terjedési sebessége 296,4 m/s. Vagyis a rakéta sebessége 2964–3552 m/s között lehet. A csökkenő magasság miatt a hangsebesség nő, és a rakéta a gravitáció segítségével tartani tudja a sebességét, így földközélsben 3300–4000 m/s sebességgel kell számolni. Vegyünk egy átlagot, pl. 3500 m/s-ot. Ezzel a sebességgel 1000 km megtétele csupán 286 s = 4 min 46 s. A MiG-31K esetében a maximális indítási távolság több mint 2000 km. A 2000 km-t a rakéta kevesebb mint 10 perc repülési idő alatt teszi meg. Ha a 3500 m/s-os átlaggal számolunk, a repülési ideje 572 s = 9 min 32 s lesz.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A fentiekből is látszik, hogy az ukrán–orosz háború olyan titkokat tárt fel, amelyekről eddig csak a benne dolgozók és az adott ország magas rangú politikai és katonai vezetői tudtak. Most már bizonyos részletei ezeknek az eszközöknek szerte a világon ismertek. Ne legyen naiv a kedves olvasó, más országok is kísérleteznek hasonló eszköz megalkotásával, vagy már van is nekik. Egy biztos, ha még nem rendelkeznek ilyennel, akkor a kutatások a lehető legnagyobb erőbedobással fognak folytatódni, hiszen a fegyverkezési verseny sajnos nem ért véget. Teveim szerint a kutatásaimat ezen kísérletekkel és/vagy az eszközök bemutatásával szeretném folytatni.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Wipedia The Free Encyclopedia: Kh-47M2 Kinzhal, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Kh-47M2_Kinzhal
- [2] Википедия Свободная энциклопедия: Кинжал (гиперзвуковой ракетный комплекс), [Online]. Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D0%BD%D0%B6%D0%B0%D0%BB_\(%D0%B3%D0%B8%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D0%BD%D0%B6%D0%B0%D0%BB_(%D0%B3%D0%B8%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81))
- [3] Wipedia The Free Encyclopedia: Hypersonic weapon, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Hypersonic_weapon

- [4] Wikipedia A szabad enciklopédia: Hiperszonikus áramlás, [Online]. Available: https://hu.wikipedia.org/wiki/Hiperszonikus_%C3%A1raml%C3%A1s
- [5] Netfizika: A kozmikus sebességek (szabad mozgások centrális gravitációs mezőben), [Online]. Available: <https://www.netfizika.hu/a-kozmuikus-sebesssegek-szabad-mozgasok-centralis-gravitacios-mezoben>
- [6] The Engineering ToolBox: International Standard Atmosphere, [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/international-standard-atmosphere-d_985.html
- [7] Magyar Nemzet: Putyin-show a választóknak és az egész világnak, [Online]. Available: <https://magyarnemzet.hu/kulfold-archivum/2018/03/putyin-show-a-valasztoknak-es-az-egesz-vilagnak>
- [8] Wikipedia The Free Encyclopedia: Aegis Ballistic Missile Defense System, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Aegis_Ballistic_Missile_Defense_System
- [9] Wikipedia The Free Encyclopedia: S-400 missile system, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/S-400_missile_system
- [10] Wikipedia The Free Encyclopedia: MIM-104 Patriot, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/MIM-104_Patriot
- [11] Wikipedia The Free Encyclopedia: RIM-174 Standard ERAM, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/RIM-174_Standard_ERAM
- [12] РЕН ТВ – Прямой эфир: "Кинжал": характеристики и особенности гиперзвуковой ракеты, [Online]. Available: <https://ren.tv/longread/960895-raketnyi-kompleks-kinzhal-kharakteristiki-giperzvukovogo-oruzhiia>
- [13] Википедия Свободная энциклопедия: МиГ-31, [Online]. Available: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B8%D0%93-31>
- [14] Википедия Свободная энциклопедия: Искандер (ракетный комплекс), [Online]. Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D1%81%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B5%D1%80_\(%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D1%81%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B5%D1%80_(%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81))
- [15] Wikipedia The Free Encyclopedia: 9K720 Iskander, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/9K720_Iskander
- [16] MissileThreat: 9K720 Iskander (SS-26), [Online]. Available: <https://missilethreat.csis.org/missile/ss-26-2/>
- [17] OTAN/RUSSIE SANS CLASSIFICATION PARTIE 2, [Online]. Available: https://www.nato.int/docu/glossary/fr-nuclear/nuc_glos-f.pdf
- [18] George P. Sutton, Oscar Biblarz: Rocket Propulsion Elements (Eight Edition), Wiley 2010, pp. 9–10.
- [19] Szilvássy László, Békési Bertold: Rakéta hajtóművek, Repüléstudományi Közlemények XI/1., pp. 263–271. (1999)
- [20] Szilvássy László, Békési Bertold: Repülőfedélzeti rakéták hajtóművei, Bolyai Szemle Fialat Tudósok Konferencián elhangzott előadás, Budapest (2002)
- [21] Szilvássy László: A repülőgépfedélzeti rakéták hajtóműveiben alkalmazott hajtóanyagok, Repüléstudományi Közlemények X/2. pp. 43–50. (1998)
- [22] Szilvássy László, Dr. Szabó László: Rakéták reaktív hajtóművei, Repüléstudományi Közlemények XVIII/1. pp. 209-216. (2006)
- [23] Szilvássy László, Békési Bertold: A katonai repülőgép fedélzeti rakéták hajtóművei, 12th Hungarian Days of Aeronautical Sciences Conference „The Challenge of Next Millenium on Hungarian Aeronautical Sciences” Nyíregyháza, pp. 124–131., eR-Group (1999) (ISBN:963 03 7803 5)
- [24] Szilvássy László: Meteor rakéta, Repüléstudományi szemelvények 2018, pp.119–142.
- [25] Звезда: Гиперзвуковой бросок «Кинжала»: конкуренты еще - в «пеленках», [Online]. Available: <https://zvezdaweekly.ru/news/20185211547-L3aOs.html>
- [26] Bloomberg: Russia Used ‘Kinzhal’ Missiles on Cities, Top Ukraine Aide Says, [Online]. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-03-20/russia-claims-second-firing-of-kinzhal-missiles-in-ukraine>
- [27] Híradó.hu: Megérkezett az orosz hadijelentés: Konasenkov szerint bevetették a nagypontosságú levegő-föld rakétákat, [Online]. Available: <https://hirado.hu/kulfold/cikk/2022/04/17/megerkezett-az-orosz-hadijelentes-konasenkov-szerint-bevetettek-a-nagypontossagu-levego-fold-raketakat>

20. századi magyar repülőgépgyártás-fejlődés – gyártók, fejlesztők és karbantartó vállalatok

Development of 20th century Hungarian aircraft manufacturing - manufacturers, developers and maintenance companies

Ujjady András^{1*} – Dr. Békési Bertold² – Dr. Kavás László³

¹Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, 5008 Szolnok, Kilián u. 1., ua.andris@gmail.com

²Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, 5008 Szolnok, Kilián u. 1., bekési.bertold@uni-nke.hu

³Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 5008 Szolnok, Kilián u. 1., kavas.laszlo@uni-nke.hu

Összefoglaló: Magyarországon az utóbbi időben nagy előrelépések történtek a légiipar és újabban a drónok tekintetében. A menet közben kialakult és a légi közlekedést sújtó válság ellenére is egyre többet lehet(ett) hallani és hallunk is a különböző repülőgépgyártással, repülőgép-karbantartással, reptérfejlesztéssel, a légiiparral, a zöldmezős beruházásokkal, valamint az újralendülő sportrepülőgép-gyártással kapcsolatos hírekről. A cikkben célunk a magyarországi repülőgépipar újraindulásának a bemutatása a jelenlegi légiipari szereplők – gyártók, fejlesztők és karbantartó vállalatokon keresztül.

Kulcsszavak: Genevation, Hungaro copter, Airbus helicopters, Aerinx, ACE

Summary: Hungary has recently made great strides in the aviation industry and more recently in drones. Despite the crisis that has taken place during the flight and is affecting aviation, we can and do hear more and more about the various aircraft industries, aircraft maintenance, airport development, the aerospace industry, greenfield investments and the resurgence of sports aircraft. In this article, our aim is to present the relaunch of the Hungarian aerospace industry through the current players in the aviation industry - manufacturers, developers and maintenance companies.

Keywords: Genevation, Hungaro copter, Airbus helicopters, Aerinx, ACE

1. BEVEZETÉS

Már 119 éve, hogy a levegőnél nehezebb eszköz sikeresen levegőbe emelkedett, és már a 18. század második felében utassal a fedélzeten léggömbök repültek. Ezekben a korokban is tudták, hogy a levegőbe emelkedő eszközöknek könnyűnek kell lenniük, ezért törekedtek az elérhető legkönnyebb anyagokat felhasználni, ami főként a fa és a vászon volt; a szükséges helyeken és alkatrészeknél fémötvözeteket használtak. Ezeket az anyagokat a klasszikus mesterségek technológiáival dolgozták fel pl.: öntészet, kovácsolás, forgácsolás és asztalosmunkák stb.

A II. világháború után hanyatlásnak indult a hazai repülőgépgyártás. A nagyvállalatok átalakultak, a kisebb, magántulajdonában lévő cégek megszűntek. Az elkövetkezendő időszakban a kisebb prototípus motoros- és vitorlázógépek megépítésén kívül nagyszámú sorozatgyártás nem volt. 1958-ban az Aero Evert átnevezték Pestvidéki Gépgyár Esztergomi Gyáregységre (PGE). 1960-ban Rubik Ernő állami megrendelésre még kifejlesztett egy vitorlázógép-családot, költséghatékonyabból fémépítésűt, sok azonos alkatrésszel (Mokány, Góbé, Kópé) melyek közül a Góbé vált a hazai vitorlázók alap oktató repülőgépévé. 1969-ben szűnt meg a Góbé gyártása Esztergomban, de 1982-ben Szombathelyen a 12. számú AFIT igazgatója, Tóth István újraindította a Góbé gyártását R-26SU jelzéssel. A PGE a vitorlázók gyártása mellett motoros kisgépek nagyjavításával és licencgyártásával foglalkozott. Az akkori gazdasági rendszerben sajnos nem Magyarország kapta feladatul a repülőgépgyártást, így a rendszerváltásig tulajdonképpen „pangott” ez az iparág [1], [2].

Az 1950-es években a sugárhajtású repülőgépek (MiG-15, MiG-17, MiG-21) megjelenésével szükségessé vált egy új javítóbázis létrehozása. Az egykori Dunai Repülőgépgyár Tököl melletti telephelyére esett a választás, az új üzem a Pestvidéki Gépgyár lett. 1974-től Mi-8 szállítóhelikopter, 1984-től Mi-24 harcihelikopter-család nagyjavításával foglalkoztak a Varsói Szerződés tagállamai részére is egészen az 1992-es gyárbezárásig. Az utód, a Dunai Repülőgépgyár Rt. tovább folytatta az előd tevékenységi köreit, kibővítve export-nagyjavításokkal az etióp légierő részére [2].

A kisgépes repülésben az egri Molnár Zoltán által alapított Halley Kft. hozott új lendületet ultrakönnnyű kategóriában. Napjainkra újra kezd a sportgépek gyártása feléledni hazánkban, példaként említhető: Jakabszálláson a Genevation, Pécsen a Magnus, de a nagy utasszállító-gyártó Airbus és beszállítói is telepítettek/telepíteni fognak gyáregységet Magyarországra, például a Ruag Egerben vagy a gyulai Airbus Helicopters. Az 1949–1991 közötti időszakban nem Magyarország volt a repülőgépgyártás fellegvára, gyakorlatilag Rubik Ernő vitorlázó repülőgépein és a Pestvidéki Gépgyár javítómunkáin kívül nem volt igazán repülőgépipara az országnak.

Az idő előrehaladtával, a technológiák fejlődésével egyre könnyebb, masszívabb anyagok (fémötvözetek, kompozitok, polimerek) váltak elérhetővé a konstruktőrök számára. Mint minden újdonságnál, új anyagnál nem volt ez

másként a kompozitszerkezeteknél vagy a 3D nyomtatásnál sem. Kezdetben csak a hadászati eszközökben, az űriparban jelentek meg, és csak később terjedtek el szélesebb körökben.

A cikk további részében a magyarországi repülőgépipar újraindulásának bemutatása a célunk a jelenlegi légiipari szereplők – gyártók, fejlesztők és karbantartó vállalatokon keresztül.

2. GYÁRTÓK, FEJLESZTŐK ÉS KARBANTARTÓ VÁLLALATOK

APOLLO repülőgép

A polgári kisgépes repülés egyik meghatározó alakja volt az egri Molnár Zoltán (Zolika). 1975-ben megépítette saját repülőjét Pannónia P10 hajtóművel, amit a hatóságok nem néztek jó szemmel, ezért abba kellett hagynia a tesztrepüléseket. A műegyetemi gyalogsárgányklub felfigyelt a tevékenységére, és felkérték, hogy csatlakozzon a csapathoz, ahol Standard típusú sárkányt építettek. Az 1977-ben Eged-hegyen megrendezett nemzetközi versennyel sikerült elfogadtatniuk a sárkányt mint sporteszközt, és nem mint légi járművet. Akkoriban a Flamingó típus számított csúcstechnikának itthon, amelynek továbbfejlesztett, dakronnal borított változatának a gyártása el is kezdődött. Az 1980-as évekre enyhültek a szabályozások, és egy korábbi versenyen látott motoros trike mintájára Molnár Zoltán megtervezte és megépítette az első motoros sárkányát. Megalapította az Apollo céget, és folyamatos fejlesztésekkel újabb és újabb típusú trike-ot (Apollo Delta Jet, Apollo Delta Jet 2, Apollo Monsoon, Apollo Racer GT) és megannyi szárnykonstrukciót (CX, MX, C12, C14 stb.) hozott létre, amelyek kezdetben Pannónia és Trabant, később Rotax, BMW, Subaru motorokkal voltak felszerelve. A 90-es évek második felére Kitfox-licenc alapján gyártani kezdte az Apollo Fox ultralight repülőgépet, amelynek egyik példányával Kántás Andor és Lathky Csongor Sármellékről egészen Sydney-ig repült, és a közel 25 000 km-t 90 nap alatt tették meg. Molnár Zoltán és csapata alázatos munkájával elérhetővé tette sokak számára a repülést ultralight kategóriában hazánkban és szerte Európában, Észak- és Dél-Amerikában. Örökségét Szakács „Szaki” Gábor viszi tovább Főnix Repülőgépgyár Kft. cég néven [3] [4] [5].

Genevation

Szabó Viktor és dr. Farkas Csaba ötletéből született az elhatározás, hogy Unlimited kategóriában terveznek és építenek műrepülőgépet. A 2010-es évek első fele a tervezéssel telt, és mintegy 112 223 munkaórát fordítottak rá. A GENPRO számos újítást alkalmazott a tervezés során, például: az acél rácsszerkezetben és kormányszervek rudazatainál kompozitcsövekkel váltották ki a hagyományos alapanyagokat, így a kategóriájában szereplő repülőgépekhez képest komfortosabb, a pilóta igényeire jobban kialakítható kabinnal rendelkezett. A Genevation technikai paramétereit a [6] szakirodalom részletesen bemutatja.

2021 szeptemberében a Genevation Aircraft Kft. és a PIPISTREL szlovén repülőgépgyártó megállapodást kötöttek egy közös együttműködésről, mégpedig arról, hogy a PIPISTREL SW 121-es végső összeszerelésének helyszíne Jakabszállás lesz. Továbbá a következő 10 évben közös fejlesztésekkel foglalkoznak kompozitstruktúrák és zero károsanyag-kibocsátó légi járművek terén. A két ország kormánya által is támogatott projekt értéke közel 100 millió euró [6] [7] [8] [9] [10].

Magnus Aircraft

A pécsi székhelyű Magnus Aircraft Zrt. repülőgépgyártó ultralight kategóriában a Fusion 212-t és a továbbfejlesztett változata a Fusion 213 LSA típusokat gyártja. Ezek a repülőgépek korszerű kompozitanyagok felhasználásával épülnek, és jó repülési, műrepülési tulajdonságokkal bírnak. Mindegyik repülőgépben megtalálható egy ballisztikus mentőernyőrendszer, ami vészhelyzet esetén aktiválható. Az LSA kategóriás típus lehetőséget ad a PPL (Private Pilot Licence) magánpilóta-képzésre is [11] [12].

HM EI Zrt.

A HM Elektronikai, Logisztikai és Vagyonkezelő Zártkörűen Működő Részvénytársaság története 1981-ig nyúlik vissza, amikor létrehozták a Magyar Honvédség Elektronikai Igazgatóságát. A jogelőd HM EI Rt.-t 1993-ban alapította az akkori honvédelmi miniszter, és alakult végül állami tulajdonú zrt.-vé. Feladatai közé tartozik a honvédségi laktanyák és egyéb ingatlanok üzemeltetése és azok őrzése-védelme, valamint a kutatás-fejlesztés a honvédség igényei szerint.

A cég drónfejlesztéssel is foglalkozik, aminek a kezdete a 90-es évekig nyúlik vissza. Habár már voltak korábbi próbálkozások, például a magyar-csehszlovák kooperációban készült SZOJKA felderítő robotrepülőgép, de magas üzemeltetési költségei miatt a projektet abbahagyták, vagy a légvédelem számára készült céleszközök, a Meteor-program az 1970-es évektől. A honvédségben a 90-es években rendszeresített Mistral légvédelmi rendszerhez a Meteor 3 drónt szánták légi célnak Lüneberg-lencsével¹ felszerelve a radarkeresztmetszet növelése érdekében, azonban még mindig nem rendelkezett

¹ „A Luneberg-lencse koncentrikus, változó dielektromos állandójú (GRadiant Index, GRIN) – a gyakorlatban héjából álló gömb –, amely beeső, párhuzamos irányultságú (sík felületű) rádiófrekvenciás sugárzás (radarjel) irányát a gömb belsejében

robotpilóta-funkcióval, csak földi RC-irányítással repült az eszköz. A légvédelmi gyakorlatokhoz az „okos agyaggalamb” újra szükségessé vált, ezért a Meteor-programot 2009-ben újralesztették. A HM EI Zrt. kifejlesztette a METEOR-3MA gázturbinás célgépet Luneberg-lencsével, fejlett automatizáltsággal. 2011-ben a MH felderítő képessége igényeinek kielégítésére felderítő drónok fejlesztésébe kezdett a zrt. A kamerával felszerelt drónok nemcsak harcászati feladatokra használhatók, hanem például katasztrófa-helyzetekben is. A 2010-es vörösiszap-katasztrófa idején – Kolontár és Devecser térségében – költséghatékonyabb megoldást nyújtott egy-egy drón az iszap kiterjedtségének megfigyelésére. Nagy segítséget nyújtanak kutatás-keresés, nem háborús katonai műveletek esetében is a felderítő és megfigyelő drónok szerepében.

Az Ikran nagyobb hatótávolságú HD kamerával felszerelt és a Bora elektromos, halkabb felderítő gép lett az eredmény. A HM EI nem állt meg a fejlesztésekkel, jelenleg a portfóliója között szerepelnek megfigyelő, felderítő drónok: R-01 NEMERE felderítő, XS-01 ORKÁN, illetve megfigyelő és céldrónok: METEOR-3MA, M-8 RC pilóta nélküli célrepülőgép [15] [16] [17] [18] [19].

Rotors and Cams

A Rotors & Cams Zrt., az egyik hazai piacvezető vállalkozás 2014-ben jött létre. Tevékenységi körébe tartozik a kutatás-fejlesztés, az egyedi igények kielégítése, UAV gyártása/validálása, UAS integrálása meglévő rendszerekhez és a tanácsadás. Termékpalettája főként forgószárnyas, multirotoros drónokból áll mind védelmi, mind civil üzletágban. A korábban említett Meteor-program legújabb céldrónját nagy sikerrel alkalmazza a honvédség, bár egyik nagy hátránya, hogy maximális sebessége 230–250 km/h, ami sokkal több, mint amire a légszavaras elődmodellek képesek voltak, de még mindig messze van a mai vadászpilóta sebességétől. Ezért egy új, nagyobb repülési sebességre képes céldrón kifejlesztésére kérték fel a Rotors & Cams Zrt.-t. A projektben a Genevationnal együtt vesznek részt, amely a sárkányszerkezet fejlesztésével foglalkozik, míg a drónok elektronikája és irányítása terén nagy tapasztalattal rendelkező Rotors & Cams fejleszti az „avionika” részt. A PROTar légvédelmi célrepülőgép imitációs képessége közelebb lesz a valósághoz, indítóállványról száll fel, közel 450–500 km/h sebességre lesz képes, és Luneberg-lencsével lesz felszerelve a radarkeresztszám növelése érdekében. Éles légvédelmi gyakorlatokon autonóm üzemmódban tud egy előre beprogramozott pályán végigrepülni és esetleges találatvesztés esetén mentőernyővel ér földet az újbóli felhasználás érdekében. A későbbiekben lehetőség lesz harci rész beépítésére is, így egyfajta kamikazedrónként is alkalmazhatóvá válik [20] [21] [22].

Bonn Hungary Electronics

1991-ben alakult a BHE Bonn Hungary Kft. Profiljukba főként rádiófrekvenciás és mikrohullámú rendszerek fejlesztése és gyártása tartozik különböző mobilüzemeltető, kormányzati, védelmi, úripari és légügyi szervezetek megrendelésére. Termékpalettájában megtalálhatók: vészhelyzeti kommunikációs eszközök, műholdas kommunikációs rendszerek és alrendszerek, telemetriai eszközök, mikrohullámú védelmi ipari berendezések, radarok és radarrészegységek, drónfelderítő és -elhárító berendezések.

A BXAP15 drónrendszer a cég válasza egy teljes drónrendszer kiépítésére. Földi irányítóállomással, kétfős kezelőszeméllyel (navigátor és felderítő) rendelkezik a rendszer, de további munkaállomások csatlakoztathatók Lan-hálózaton keresztül. A drón rendelkezik beépített Galileo-kompatibilis navigációs modullal, nagysebességű 3D inerciális navigációs érzékelővel, MEMS-szenzoros levegőjeleket feldolgozó egységgel, továbbá kommunikációs egységgel, kamerarendszerrel, adat- és videóloggerrel (fekete doboz) és robotpilótával [23] [24].

1. táblázat. A BXAP15 technikai paraméterei [23]. Szerkesztette: Ujjady András

Hossz:	1,7 m
Szárnyfesztávolság:	3,7 m
Sebesség:	60–100 km/h
Magasság (konfigurációtól függően):	min. 4000 m
Repülési idő:	kb. 100 perc
Felszálló tömeg:	17 kg
Hasznos teher:	3 kg
Meghajtás:	elektromos BLDC motor 1200 W
Valós idejű videó és telemetriás átviteli hatótáv:	15 km

Hungaro Copter

2007-ben jött az ötlet pár vállalkozó szellemű repülésrajongó körében, hogy megfizethető ultralight helikoptert építsenek. A verpeléti székhelyű cégnél 2010-re öltött testet rengeteg fejlesztési munka és innováció után a HC-01

úgy változtatja meg, hogy az a lencse felületének egy adott pontján koncentrálódik. A lencse, a rávetülő sík rádióhullámokat, azok irányától függően, mindig a besugárzás irányával ellentétes oldalon koncentrálja. Azaz, a lencsének végtelen számú fókuszpontja létezik, nincs egy kitértetett optikai tengelye, az egyszerű lencsékkel ellentétben” [13] [14].

helikopter. A prototípust követte a HC-02/1, melyben helyet kapott egy elektromos meghajtású mentőrendszer, ami hajtóműhiba esetén egy-másfél percig még lehetővé teszi a biztonságos landolást.

További innovációk: az automata forgószárny-billenésgátló, állítható üzemenyagtartály-rendszer, amivel a tömegközéppont eltolás kiegyenlíthető. 2021-re elkészült a kétszemélyes változat a versenytársakhoz képest kedvezőbb, jobb hatásfokú, saját fejlesztésű Silent Type forgószárnyakkal és az osztrák Rotax 915 IS repülőgép motorral szerelve, ultralight kategóriában a hasonló konstrukciókhoz képest az üzemeltetési költsége 30%-kal alacsonyabb [25] [26] [27].

Ruag

2017-ben a svájci székhelyű repülőgép- és hadiipari cégcsoport RUAG Aerostructures divíziója elindította egri üzemében az utasszállító repülőgép-sárkányszerkezet részeinek gyártását. Futóműakna-borításokat, nyomástartó falakat és padlóstruktúrákat készítenek Airbus A320, A321 repülőgéptípusok számára [28].

Diehl

A Diehl konszern egy német családi vállalkozásból indult, mely mára több üzletágban is részt vevő cégcsoport. A Diehl Aviation Hungary Kft. 2011-ben kezdte meg működését Nyírbátorban Airbus keskeny és széles törzsű típusaiba klímacsövek, belső kabinburkolatok, ajtók, ajtókeretek, ablakok gyártásával. A dinamikusan fejlődő cég mintegy 700 embernek ad munkát jelenleg [29] [30].

Airbus Helicopters

Az Airbus Helicopters és a magyar állam közös beruházásaként hozták létre az Airbus Helicopters Hungary Kft.-t Gyulán. Az üzemcsarnok építése 2020 decemberében kezdődött, várhatóan 2022 nyarán fog megindulni a termelés. Az Airbus helikopterek precíziós megmunkálást igénylő forgó-, dinamikus fémalkatrészei fognak itt készülni [31] [32] [33].

Rolls-Royce Hungary

Az egykori Siemens hibrid és elektromos repülőgép-hajtásrendszerek fejlesztésével foglalkozó üzletágát 2019-ben felvásárolta a Rolls-Royce, így a Siemens magyarországi fejlesztőirodája is a brit konszernhez került. Még ebben az évben megalakult a Rolls-Royce Hungary Kft. az átvett közel 100 fős állománnyal. A hazai mérnökök 100 kW-ig bezárólag fejlesztettek hajtásrendszereket, például a RRP70D elektromos hajtómű, amely az első Rolls-Royce motor, amit regisztráltak tanúsításra. A Magnus eFusion több mint 300 óra sikeres tesztrepülésen van túl ezzel a hajtásrendszerrel [34] [35] [36].

GE Aviation

A General Electric a világ egyik legnagyobb iparvállalata, több mint 30 éve része a magyar gazdaságnak több üzletágban. Zöldmezős beruházásként 2000-ben alakult meg a GE Aviation Hungary Kft. Veresegyházán. Hajtóművek alkatrészeinek fémkompresszor és turbinalapátjait gyártják, valamint kompozitelemeinek nagyjavításával foglalkoznak [37] [38].

AerinX

Az AerinX 2015-ben indult startupvállalkozásként. A kereskedelmi repülőgépek karbantartását, javítását és üzemeltetését elősegítő rendszer fejlesztésével foglalkoznak. Ez egy vegyes valóság (MR – Mixed Reality) alapuló, okos ellenőrző (Smart Inspection) rendszer, amely a repülőgép külső sárkányszerkezet-ellenőrzéseit és a karbantartási feladatokat gyorsabbá, megbízhatóbbá és jobban dokumentálhatóvá teszi, csökkentve a papíralapú dokumentumok mennyiségét és a repülőgép termelésből kiesett idejét. A fejlesztésben az ACE² is segítséget nyújtott a valós környezet biztosításával. A technológiát már számos karbantartó cég alkalmazza Európában és a Közel-Keleten [39].

ACE

1992-ben alakult az Aeroplex Közép-európai Légijármű Műszaki Központ Kft. (ACE) 50%-ban Lockheed Martin és 50%-ban a Malév Zrt. tulajdonlásával. A 720 fős Aeroplex MRO³ szolgáltatásai közé tartozott a Malév repülőgépeinek karbantartása és a harmadik feles hangárkarbantartások. 1998-ban a Malév Zrt. teljes körű tulajdonosa lett az Aeroplex Kft.-nek. 1999-re 850 fő volt az állomány. 2012-ben, a Malév csődje után az ACE a Magyar Állam tulajdonába került. A cég az MRO-tevékenységeit az EASA Part 145 és az amerikai FAA⁴ szabályzatok szerint végzi. 2020 októberében az Aeroplex új hangárkomplexum építésébe kezdett, amelyben egyszerre 4 keskeny törzsű vagy egy széles törzsű repülőgép karbantartását

² Aeroplex of Central Europe Aircraft Technology Center: AEROPLEX Közép-Európai Légijármű Műszaki Központ Kft.

³ MRO – Maintenance and Repair Organisation: Karbantartó és Javítószervezet (üzemeltető)

⁴ FAA – Federal Aviation Authority: Amerikai Szövetségi Légügyi Hatóság

tudják elvégezni. A legmodernebb javítási technológiákkal és célszerszámokkal működő hangárt 2022 márciusában adták át [40] [41] [42].

Lufthansa Technik

A Lufthansa Technik 2000-ben a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtéren nyitotta meg karbantartó bázisát több mint 400 alkalmazottal. A cég Airbus A320-as (Classic, Enhanced, Neo) és Boeing 737 (Classic, Next Generation, MAX) keskeny törzsű repülőgépek alapkabartartási és bulletinmódosítási szolgáltatások elvégzésére szakosodott. Főként a Lufthansa és leányvállalatai, légitársaságai részére végez nagyjavítási és festési szolgáltatásokat. A 6400 m² hangárban 5 repülőgép számára van elegendő hely, ahol D-, IL- és C-check végezhető el egy időben. A cég EASA Part-145 minősítéssel rendelkezik. A sárkányszerkezet széles körű javítása mellett fedélzeti satelit-adatkapcsolat, internet kiépítésére is van engedélye [43].

AEROMETAL Kft.

Az Aerometal Kft. cégcsoportot 1992-ben alapították, tevékenységi körük két fő részre bontható: fémek felületkezelése és repülőgép-hajtóművek, sárkányszerkezetek, segédberendezések felújítása, nagyjavítása EASA Part-145 és ISO:9001 szabvány szerint [44] [44].

3. BEFEJEZÉS

Minden új technológia először a hadiiparban, a repülőgépiparban, az űrkutatásban jelenik meg először. Magyarországon az utóbbi időben nagy előrelépések történtek a légiipar és újabban a drónok tekintetében. A szerzők egy rövid kitekintés keretében bemutatták a magyarországi gyártókon, fejlesztőkön és karbantartó vállalatokon keresztül a teljesség igénye nélkül a jelenleg is meglévő, potenciállal rendelkező szereplőket. A Covid-19 hatásaként kialakult, a légi közlekedést sújtó válság ellenére is, amely megszűnni látszik, egyre többet lehet(ett) hallani, és hallunk is a különböző repülőgépgyártással, repülőgép-karbantartással, reptérfejlesztéssel, a légiiparral, a zöldmezős beruházásokkal, valamint az újrarendülő sportgépgyártással kapcsolatos hírekről. A tendencia egyértelműen látszódik, például a létrejött Magyarországi Légiipari Klaszter is ezt igazolja, amely összefogja az ágazat termelőit, a kutatás-fejlesztéssel foglalkozó ipari szereplőket, az egyetemeket, a kutatóintézeteket a gazdasági szereplők érdekeinek képviselője mellett, ez megteremti a feltételeket az iparág fellendítéséhez szükséges források egyesítéséhez, a magas szintű tudományos háttér biztosításához. A hadiipar területén is lekövethető ez a tendencia. A Zrínyi 2026 program keretében több modern légi jármű beszerzéséről történtek döntések. A program keretein belül a francia Airbus A319-112 csapatszállító katonai repülőgép, a francia Dassault Falcon 7X típusú nagy hatótávolságú futárrepülőgép, valamint a német Airbus H145M könnyű, többfeladatu helikopter került beszerzésre. A program további részeként beszerzés alatt áll az Airbus H225M közepes katonai szállító helikopter, a KC-390 katonai szállító repülőgép, amely légi utántöltésre is alkalmas, valamint a 2022. április 20-i hivatalos bejelentés alapján az L-39 NG kiképző és könnyű támadó repülőgép. Mindezek stratégiai szerepe és együttműködési szemlélete kulcsfontosságú sikertényező a magyar repüléstechnikai ipar növekedésében és fejlődésében.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Lacza Tihamér: A kényszerből született siker – id. Rubik Ernő és a magyar aviatika. [Online]. Available: <https://muzsa.sk/hagyomany/a-kenyszerbol-szuletett-siker-n-id-rubik-erno-es-a-magyar-aviatika>
- [2] Bakos Attila, Czigler Klára, Harangozó Tamás: A magyar repülés centenáriuma. Magyar Repüléstörténeti Társaság, Budapest, 2009, ISBN 978-963-88646-0-4
- [3] Mezei Kata: Az Apolló története (Molnár Zoltán – Zolika). [Online]. Available: <https://www.vampair.hu/modules.php?name=News&file=print&sid=22>
- [4] Páratlan repülés Lúciáért. [Online]. Available: <http://andorkantas.blogspot.com/2012/05/repules-luciaival-ausztraliaba.html>
- [5] Szabó György: AG1. [Online]. Available: <http://www.vampair.hu/modules.php?name=News&file=article&sid=790>
- [6] GENPRO. [Online]. Available: <https://genpro.generation.hu/>
- [7] Generation Aircraft Facebook oldala. [Online]. Available: https://www.facebook.com/generationaircraft/?ref=page_internal
- [8] IHO. Pipistrel gépeket fog gyártani a Generation Jakabszálláson. [Online]. Available: <https://iho.hu/hirek/pipistrel-gepeket-fog-gyartani-a-generation-jakabszallason>
- [9] Márványi Péter: Repülőgép születik! A GENPRO, az új magyar műrepülőgép. [Online]. Available: <https://iho.hu/hirek/repulogep-szuletik-a-genpro-az-uj-magyar-murepulogep-160729>
- [10] Pipistrel. Pipistrel and Generation enter aircraft manufacturing cooperation. [Online]. Available: <https://www.pipistrel-aircraft.com/pipistrel-and-generation-enter-aircraft-manufacturing-cooperation/>
- [11] AIRportal.hu, Teljesítette szűzrepülését a Magnus Fusion 213 prototípusa. [Online]. Available: <https://airportal.hu/teljesitette-szuzrepuleset-a-magnus-fusion-213-prototipusa/>

- [12] Végh Martin: Létszám bővítésre készül Magnus Aircraft. [Online]. Available: <https://autopro.hu/gyartok/letszambovitesre-keszul-magnus-aircraft/542043>
- [13] Konecz Miklós Tamás: A METEOR-3R célrepülőgép alkalmazása és elektronikai rendszerei. Doktori (PhD értekezés) Budapest, 2009. [Online]. Available: <https://nkerepo.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/12149/ertekezés.pdf?sequence=1>
- [14] Konecz Miklós Tamás: Luneberg reflektor radarkeresztmetszetének mérése összehasonlító FDR módszerrel. Hadmérnök II. Évfolyam 3. szám 2007. szeptember pp. 100–185. [Online]. Available: http://real-j.mtak.hu/17122/3/2007_3.pdf
- [15] Ferenczi András: Kézből startol a magyar drón. [Online]. Available: <https://www.origo.hu/itthon/20120924-milyen-lesz-a-hm-ei-altal-kifejlesztett-magyar-pilota-nelkuli.html>
- [16] Flybysense. Drón gyártása, összeszerelése. [Online]. Available: <https://flybysense.hu/index.php/hu/dron-technologiak/dron-szolgaltasok#drones>
- [17] HM Elektronikai, Logisztikai és Vagyonkezelő Zrt. [Online]. Available: <https://www.hmei.hu/cegunkrol/>
- [18] Méhes Lénárd: A magyar fejlesztésű Meteor pilótánélküli repülőgép-család II. rész. Haditechnika 2014/4. pp. 42–45. [Online]. Available: http://real-j.mtak.hu/11407/4/HT_2014-4_teljes_red.pdf
- [19] Schieber József: A HM Elektronikai, Logisztikai és Vagyonkezelő Zártkörűen működő Részvénytársaság. Katonai Logisztika 14. évf. 2. sz. (2006.) pp. 271-297. [Online]. Available: http://www.epa.hu/02700/02735/00058/pdf/EPA02735_katonai_logisztika_2006_2_271-297.pdf
- [20] LHSN facebook oldala. [Online]. Available: <https://www.facebook.com/lhsn.hu>
- [21] Rotors & Cams Facebook oldala. [Online]. Available: https://www.facebook.com/RotorsAndCams/?ref=page_internal
- [22] Rotors and Cams. [Online]. Available: <https://rotorsandcams.com/>
- [23] BHE Bonn Hungary Kft. [Online]. Available: https://www.bhe-mw.eu/sites/default/files/brochures/BHE_About_the_Company.pdf
- [24] Unmanned Aerial System. Complete Solution. BHE. [Online]. Available: https://www.bhe-mw.eu/sites/default/files/brochures/BHE_Unmanned_Aerial_System.pdf
- [25] Hungaro-Copter Magyar Ultrakönnyű Helikopter facebook oldala. [Online]. Available: <https://www.facebook.com/search/top?q=hungaro-%20copter%20magyar%20ultrak%C3%B6nny%C5%B1%20helikopter>
- [26] Hungarocopter. [Online]. Available: <http://hungarocopter.hu/hu>
- [27] Magyar fejlesztésű és gyártású helikopter bemutatója Budaörsön. [Online]. Available: <https://gogogo.hu/az-elso-magyar-fejlesztesu-es-gyartasu-helikopter-bemutatojara-budaorson/>
- [28] Complete Fuselage Sections. [Online]. Available: <https://www.ruag.com/en/products-services/air/complete-fuselage-sections>
- [29] Diehl Aviation Hungary Kft. [Online]. Available: <https://mecheng.unideb.hu/hu/diehl-aviation-hungary-kft>
- [30] Diehl Aviation Hungary. [Online]. Available: <https://www.diehl.com/aviation-hungary/hu/>
- [31] Gregor von Kursell: Airbus Helicopters and Hungarian Government to establish manufacturing site in Gyula. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2019-05-airbus-helicopters-and-hungarian-government-to-establish>
- [32] Hamarosan érkeznek az eszközök a gyulai Airbus-gyárba. [Online]. Available: <https://www.beol.hu/helyi-kozelet/2022/03/hamarosan-erkeznek-az-eszkozok-a-gyulai-airbus-gyarba>
- [33] Szabó Dániel: Jövőre indul a magyar Airbus-gyár, de viszonylag kevés emberrel. [Online]. Available: <https://www.napi.hu/magyar-vallalatok/airbus-gyulai-gyar-termeles-2022-q2-munkaero.738827.html>
- [34] Matheu Parr: Electric sport and training aircraft. [Online]. Available: <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/electrical/propulsion/light-sport-and-training-aircraft.aspx#hemep>
- [35] Rolls-Royce Hungary. [Online]. Available: <https://www.rolls-royce.com/country-sites/hungary-en.aspx>
- [36] Sági Gyöngyi: Beindult a munka a Rolls Royce új magyar leánycégenél. 2020. január 14. [Online]. Available: <https://digitrendi.hu/beindult-a-munka-a-rolls-royce-uj-magyar-leanycegenel/>
- [37] GE Aviation Hungary Kft. [Online]. Available: https://www.moderngyarakejszakaja.hu/article/ge_aviation
- [38] GE in Hungary. [Online]. Available: <https://www.ge.com/europe/content/ge-hungary>
- [39] Aerinx. [Online]. Available: <https://aerinx.com/>
- [40] Aeroplex. [Online]. Available: <https://hu.digivideofestmenyek.com/hobbijaink/repules/aeroplex>
- [41] Aeroplex. [Online]. Available: <https://www.aeroplex.com/>
- [42] Átadták az AEROPLEX új karbantartó hangárját. [Online]. Available: <https://www.aeroplex.com/sites/default/files/UjHangarSajtokozlemen.pdf>
- [43] Thoralf Wagner: Reliable Base and Line Maintenance Services for Narrow Body Aircraft. [Online]. Available: <https://www.lufthansa-technik.com/lufthansa-technik-budapest>
- [44] Karbantartás és javítás. [Online]. Available: <http://www.flycoop.hu/karbartartas-javitas/>
- [45] Repülőgép motor és segédberendezés javítás, nagyjavítás. [Online]. Available: <http://www.aerometal.hu/repulogep-motor-javitas/>