

BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI LAPOK

BÁNYÁSZAT



AZ ORSZÁGOS MAGYAR BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI EGYESÜLET LAPJA
ALAPÍTOTTA PÉCH ANTAL 1868-BAN



JÓ SZERENCSÉT!

2022/I-II. szám 155. évfolyam

FROM THE CONTENTS

JÓZSEF MOLNÁR, ÁKOS DEBRECZENI: A quarter of a millennium ago, in 1770, was Mining Department founded in Selmec 2	ZOLTÁN EKE, ISTVÁN HAVASI: Comparative mining lakebed surveys carried out with single-beam and multibeam sonar instruments 54
ISTVÁN HAVASI: 150 years of Geodesy of the University of Miskolc and Department of Mining Metrology (<i>Selmecbánya–Sopron–Miskolc, 1872–2022</i>) 10	ISTVÁN LAKATOS, MARIANN VADÁSZI, ISTVÁN SZUNYOG, ANNA BELLA GALYAS: Storage of hydrogen in a porous medium 62
FERENC MÁDAI: Competence development gaps and solutions for mineral exploration engineering training 21	GÁBOR NYÍRI, ANDREA KOLENCSEKNÉ TÓTH, ZSOMBOR FEKETE, TAMÁS MADARÁSZ, BALÁZS ZÁKÁNYI, PÉTER SZŰCS: Hydrogeological tasks of the investigation of the Surany water base in the framework of the Clean Drinking Water Project 70
SÁNDOR NAGY: Urban mining: waste electrical and electronic equipment in focus 29	ZOLTÁN TURZÓ: The modified plungerlift for gas wells to eliminate fluid accumulation on sole 79
FERENC KRISTÁLY: Minerals in the climate struggle – short review and examples 38	
RENÁTA ZÁKÁNYINÉ MÉSZÁROS, MÁTYÁS KRISZTIÁN BARACZA, GYULA VARGA: A study reviewing the results of the Liquid and clean technology processes module of the project “Development of enhanced engineering methods with the aim at utilization of subterranean energy resources” of the Research Institute of Applied Earth Sciences of the University of Miskolc 44	

* * *

The press release of Mecsekérc Zrt. 90

Dr. Vigh Tamás,

felelős szerkesztő

Tel.: +36-20-489-7781

E-mail:

bkl.banyaszat@banyaterv.hu

A Szerkesztőbizottság tagjai:

Dr. Biró Lóránt, olvasószerkesztő,

Bariczáné Szabó Szilvia,

Csath Béla, Dr. Dovrtel Gusztáv,

Fisch Iván, Dr. Földessy János,

Dr. Gagyí Pálffy András,

Györfi Géza, Dr. Horn János,

Izingné Györfi Mónika,

Jankovics Bálint, Kárpáty Erika,

Körösi Tamás, Dr. Ladányi Gábor,

Livo László, Lois László,

Molnár Zsolt, id. Ósz Árpád,

Pali Sándor, Dr. Szabó Tibor,

Dr. Szunyogh István,

Dr. Turzó Zoltán, Dr. Vouczki Péter

Kiadja:

Országos Magyar Bányászati

és Kohászati Egyesület,

1107 Budapest, Hizláló tér 1.

Telefon/Fax: 1-201-7337

www.ombkenet.hu

A kiadásért felel:

Dr. Hatala Pál

Belső tájékoztatásra,

kereskedelmi forgalomba nem kerül.

A közölt cikkek fordítása, utánnnyomása,

sokszorosítása és adatrendszerekben való

tárolása kizárólag a kiadó engedélyével

történhet.

A BKL lapszámait az OMBKE

honlapján – www.ombkenet.hu –

érhetők el.

HU ISSN 2498-9322

TARTALOM

DR. MOLNÁR JÓZSEF, DR. DEBRECZENI ÁKOS:

Negyed évezrede, 1770-ben alapították Selmecen a Bányaműveléstani Tanszékét 2

DR. HAVASI ISTVÁN:

150 éves a Miskolci Egyetem Geodéziai és Bányaméréstani Tanszéke (*Selmecbánya–Sopron–Miskolc, 1872–2022*) 10

DR. MÁDAI FERENC:

Kompetenciafejlesztési igények és megoldások a nyersanyag-kutató mérnökképzés számára 21

DR. NAGY SÁNDOR:

Városi bányászat: fókuszban az elektronikai hulladékok 29

DR. KRISTÁLY FERENC:

Ásványokkal a klímaharcban – rövid áttekintés és példák 38

DR. ZÁKÁNYINÉ DR. MÉSZÁROS RENÁTA, DR. BARACZA MÁTYÁS

KRISZTIÁN, VARGA GYULA:

A Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyságnövelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének a Folyadék és tiszta technológiák eljárásai moduljának eredményeit áttekintő tanulmány 44

EKE ZOLTÁN, DR. HAVASI ISTVÁN:

Egysugaras és multisugaras szonárral végzett mederfelmérések összehasonlítása 54

DR. LAKATOS ISTVÁN, DR. VADÁSZI MARIANN, DR. SZUNYOG ISTVÁN, GALYAS ANNA BELLA:

A hidrogén porózus közegben történő tárolása 62

DR. NYÍRI GÁBOR, DR. KOLENCSEKNÉ DR. TÓTH ANDREA, FEKETE ZSOMBOR, DR. MADARÁSZ TAMÁS, DR. ZÁKÁNYI BALÁZS,

DR. SZÜCS PÉTER:

A surányi vízbázis vizsgálatának hidrogeológiai feladatai a Tiszta Ivóvíz Projekt keretében 70

DR. TURZÓ ZOLTÁN:

A módosított plungerlift gázkutak talpi folyadékfelhalmozódásának megszüntetésére 79

(for English titles see B2 page)

Egyedülálló komplex tudást ad a Miskolci Egyetem a hazai nyersanyagok feltárásához 43

Borbála-nap a MVM Mátra Energia Zrt.-nél 87

Mecsekérc Zrt. sajtóközleménye 90

Címlapon: Shutterstock fotó

A kiadvány az OMBKE Bányászati Szakosztály pártoló jogi tagjai támogatásával jelenik meg.

Negyed évezrede, 1770-ben alapították Selmeceen a Bányaműveléstani Tanszékét

DR. MOLNÁR JÓZSEF és DR. DEBRECZENI ÁKOS
egyetemi docensek,
Miskolci Egyetem, Bányászati és Geotechnikai Intézet



Megemlékeztünk a Selmecebányán 1770-ben alapított „Gyakorlati Bányászati Tanszék” jeles professzorairól. Delius, Cristoph Traugott 250 évvel ezelőtt nyomtatott „Bevezetés a bányatan elméletébe és gyakorlatába valamint a bányakincstári tudományok alaptételeinek ismertetésébe” című kiemelkedő jelentőségű művéről. Az elmúlt 250 év során a tanszéken művelt tudományterületekről, ezzel együtt a tanszék nevének változásairól. Megemlékeztünk az utóbbi évtizedekben elhunyt professzorainkról, munkásságukról. Végül bemutattuk a tanszék jelenlegi kollektíváját, mai oktatási területeinket és kutatási témáinkat.

A Gyakorlati Bányászati Tanszék, Bányaműveléstani Tanszék elődjének megalapítása 1770-ben

Negyed évezreddel ezelőtt – ez történelmi időnek is mondható – 1770-ben létesült Selmecebányán a Gyakorlati Bányászati Tanszék, a későbbi Bányaműveléstani Tanszék illetve a mai Bányászati és Geotechnikai Intézet elődje.

A Bányatiszt-képző iskola (Bergschule) 1735. június 22-én kezdte meg működését Selmecebányán. Az iskola 1762. évi szervezeti átalakítása után harmincként (1770. április 3-án) létrehívták a Gyakorlati Bányászati Tanszékét, és ezzel szervezetileg teljessé vált a felsőfokú képzés. Az így megszervezett iskola – a technikai főiskolák egyetemi rangját kifejező – „Akadémia” (Bergakademie) címet kapott.

A korabeli magyarországi bányászat főbb működési területei az ércbányászat (a színesfém- és vasérc valamint a nemesfémek bányászata), a kősó, az építési kőanyagok (elsősorban építőkövek) fejtése. És egyre nagyobb teret nyert az akkor kezdődő kőszénbányászat is. Ezek a tevékenységi területek meghatározták a bányászati tanszék feladatait is.

Jóval később – már a XX. században – ezek mellett jelentőssé váltak a bauxit és az urán bányászata, a szénhidrogén bányászat, a geotermikus energia kinyerése.

A Gyakorlati Bányászati Tanszék első vezetője

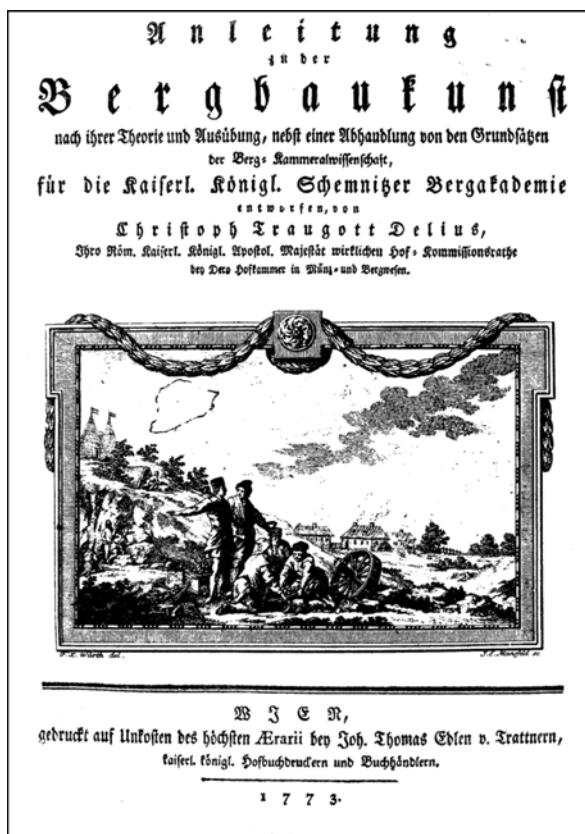
A bányászati tanszék első vezetője és egyben első kiemelkedő professzor egyénisége Christoph Traugott Delius – magyar írásmóddal Delius Traugott Kristóf – thüringiai német származású bányamérnök volt aki a mai értelemben vett bányaművelés, bányamérés, ércelőkészítés, bányajog, bányagazdaságtan, pénzügyészet és az erdészet szakismereteit is oktatta. Tudu-

másunk szerint 1728-ban született Walleshausenben és 1779. január 21-én Firenzében halt meg. Wittenbergben matematikai és természettudományokat végzett, majd Mária Terézia ösztöndíjával a selmecebányai bányászati iskola hallgatója lett. Miután bányászati tanulmányait elvégezte, előbb a bánsági tartományi bányagazgatóság ülnöke, majd 1770-től 1772-ig a bányatan rendes tanára volt a selmecebányai Bányászati Akadémián bányatanácsosi rangban, utána Bécsbe került.



1. ábra. Delius, Christoph Traugott (a mellszobor Varga Éva alkotása, mely a Miskolci Egyetemen van kiállítva)

Úttörő munkáját, melynek címe *Anleitung zu der Bergbaukunst nach ihrer Theorie und Ausübung, nebst einer Abhandlung von der Grundsätzen der*



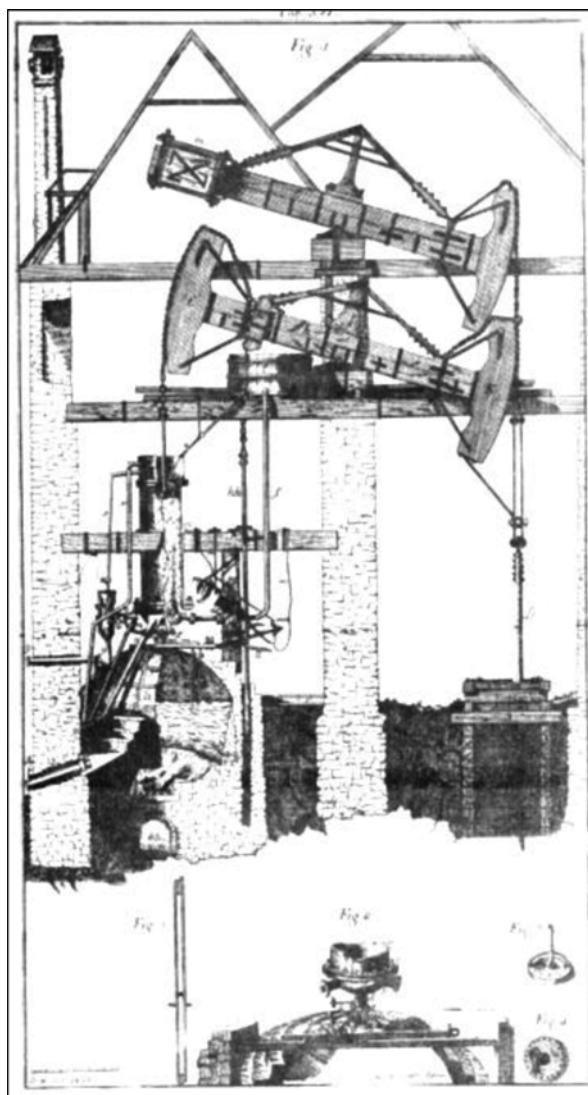
2. ábra. Delius bányatan könyvének belső címlapja

Berg- Kammeralwissenschaft, für die Kaiserl. Königl. Schemnitzer Bergakademie (Bevezetés a bányatan elméletébe és gyakorlatába valamint a bányakincstári tudományok alaptételeinek ismertetésébe) 1773-ban adták ki Bécsben a kamara költségén. Magyar fordítása a Nehézipari Műszaki Egyetem megbízásából Dr. Gyulay Zoltán egyetemi tanár kezdeményezésére 1964–1965-ben készült el, fordítója Bóday Gábor okl. bányamérnök volt. A magyar változatot Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület Bányászati Szakosztálya adta ki 1972-ben. A német nyelvterületen mintegy nyolc évtizeden át szinte egyedülként használták a könyvet a bányaművelés tankönyveként. Francia és angol nyelvre is lefordították akkoriban.

A mű korának korszerű ismereteit tárgyalta. Például a gőzgépet – ami akkor újdonság volt – már 1773-ban bemutatta. Ma is fontos forrásmunka a korabeli bányászat és a magyarországi bányászati szakoktatás történetéhez. Egyes részei ma is időszerűek.

A Bányaműveléstani Tanszék Selmecen, az első világháborúig

A selmeci Bányászati Akadémián 1846-ban átszervezték az oktatást. Az átszervezések után a tanszék Bányaművelés-Bányamérés-Bányagépészet Tanszék néven működik tovább, melynek vezetője Adriány János professzor lett.



3. ábra. Szivattyú ábrázolása Delius bányatan könyvében

Az 1848–49-es szabadságharc nagy változásokat hozott az akadémia életében. Az osztrák és a cseh származású hallgatókat hazarendelték. Az előbbieknél az ausztriai Leobenben, az utóbbiaknak a csehországi Příbramban önálló bányászati és kohászati felsőfokú tanintézeteket alapítottak.

A kiegyezés után a selmeci képzés a német helyett magyar nyelvű lett.

1872-ben kivált a tanszékből a geodézia és a bányamérés tantervét. Ettől kezdve a tanszék neve Bányaművelési és Ércelőkészítési Tanszék, melynek vezetője Litschauer Lajos professzor lett. 1904-től önálló tanszéken oktatják a bányagépészetet, Farbaky Gyula vezetésével.

A Bányaműveléstani Tanszék Sopronban, a két világháború között

A selmeci intézmény az első világháború után 1920-ban Sopronba települt, ahol Bányászati és Erdészeti Főiskola néven lelt otthonra, és a nagy anyagi veszte-

ségek ellenére tovább folytatta a felsőfokú bányászati, kohászati és erdészeti oktatást.

1923-ban a tanszékből kivált az ásványelőkészítés oktatása, Érc- és Szénelőkészítéstan Tanszék néven.

1929-ben került a Bányaműveléstan Tanszék-re Esztó Péter, aki azonnal átvette az elméleti és a gyakorlati bányászati szakismeretek oktatását, majd 1932-től 1953-ig a tanszék vezetését is. Nemzetközi mércével is kiemelkedő a kőzetmozgási elmélete, amellyel megalapozta és elindította a hazai kőzetmechanikai kutatásokat. Maradandó értékűt alkotott a bányaszellőztetésben, a bányamérésben és a bányagazdasági kérdésekben.

A Bányaműveléstan Tanszék Miskolcon

1949-ben Miskolcon megalapították a Nehézipari Műszaki Egyetemet Bánya-, Kohó- és Gépészmérnöki Karokkal. Ettől az időtől kezdve átmenetileg az első két évben az alaptárgyak oktatása Miskolcon,

a szaktárgyak tanítása pedig a diploma elnyeréséig 1959-ig változatlanul Sopronban folyt.

1949-ben – kezdetben a Gépészmérnöki Karon – megindul a bányagépész mérnökök képzése, mely később, az 1960-as évek végétől a bányavillamossági területtel bővül.

A szénhidrogén-bányászat oktatása 1951-ben vált ki a tanszékből. Az újonnan alakult Olajtermelési Tanszék vezetője Pap Simon lett.

A Bányaműveléstan Tanszékét – a Bányamérnöki Kar összes szaktanszékével együtt – 1959-ben áttelepítették Miskolcra. Az áttelepülés körüli és az azt követő időkből a Bányaműveléstan Tanszék vezetője három hosszú évtizedeken keresztül Zambó János akadémikus volt, egészen 1984-ig. Zambó János akadémikust Kovács Ferenc akadémikus követte a tanszék vezetésében.

A Bányaműveléstan Tanszék oktatóinak, kutatóinak és dolgozóinak 1985/86. tanévi névsora az *1. táblázatban* olvasható.

1. táblázat. A Bányaműveléstan Tanszék oktatói, kutatói és dolgozói az 1985/86. tanévben. Tanszékvezető: Dr. Kovács Ferenc, egyetemi tanár, a műszaki tudomány doktora

Név	Tudományos fokozat	Beosztás
Oktatók		
a bányatelepítés, feltárás és fejtés szakterületen		
Dr. Zambó János	a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja	egyetemi tanár
Dr. Kovács Ferenc	a műszaki tudomány doktora	egyetemi tanár
Dr. Benke László	dr. universitatis	tudományos munkatárs
Dr. Molnár József	dr. universitatis	egyetemi tanársegéd
Dr. Faller Gusztáv		címzetes egyetemi tanár (mellékfoglalkozású)
Dr. Kemény Gyula		egyetemi adjunktus (mellékfoglalkozású)
Dr. Schmotzer Imre		egyetemi adjunktus (mellékfoglalkozású)
a kőzetmechanika, geomechanika, kőzetmozgás, bányakár szakterületen		
Dr. Somosvári Zsolt	a műszaki tudomány kandidátusa	egyetemi docens
Dr. Mészáros Zoltán		tanszéki mérnök
Németh Alajos		egyetemi adjunktus
Selmeciné Nagy Melinda		tudományos munkatárs
a robbantástechnikai szakterületen		
Dr. Bohus Géza	a műszaki tudomány kandidátusa	egyetemi docens
Dr. Földesi János	a műszaki tudomány kandidátusa	egyetemi docens
a szellőztetés, bányabiztonság szakterületen		
Dr. Patvaros József	a műszaki tudomány kandidátusa	egyetemi tanár
Dr. Buócz Zoltán	a műszaki tudomány kandidátusa	egyetemi docens

1. táblázat. (folyt.)

Név	Tudományos fokozat	Beosztás
Dr. Janositz János	a műszaki tudomány kandidátusa	tudományos főmunkatárs
Dr. Bodon Pál	a műszaki tudomány kandidátusa	tudományos főmunkatárs, címzetes egyetemi docens
a munkavédelem, bányajog szakterületen		
Dr. Szentpéteri Ernő		egyetemi adjunktus (mellékfoglalkozású)
Meghívott előadók		
Dr. Kapolyi László	a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja	címzetes egyetemi tanár
Dr. Rózsa László	a műszaki tudomány kandidátusa	címzetes egyetemi docens
Dr. Balogh Béla		okl. bányamérnök
Dr. Fazekas János		okl. bányamérnök
Dr. Gordos Péter		okl. bányamérnök
Dr. Korompay Péter		okl. bányamérnök
Dr. Pera Ferenc		okl. bányamérnök
Dolgozók		
Abkarovits Gézáne		adminisztrációs ügyintéző
Alexa Zsoltné		laboráns
Bodnár Miklósné		segéd laboráns
Czigány Vincéné		hivatalsegéd
Dr. Heidrich Lászlóné		előadó
Kiss Istvánné		műszaki rajzoló
Köteles Lászlóné		technikus
Köteles László		szakmunkás
Révész Enikő		laboráns
Sass János		műszaki-gazdasági ügyintéző
Szilágyi József		műhelyvezető
Tóth Annamária		előadó

A Bányaműveléstani Tanszék professzorai az 1985/86. tanévből, akik már nincsenek közöttünk

Zambó János akadémikus (4. ábra) 1984-ig volt a tanszék vezetője. A bányaműveléstanban és a bányászati telepítések analitikájában bányamérnökök nemzedékeit a területeken oktatta. Felkészültsége, a hazai bányászatért való kiállása, előadásainak és tankönyveinek színvonala mércéül szolgált kollégáinak és tanítványainak egyaránt. Két területen is korszakalkotó volt. Az egyik a bányászati telepítésmélelet, melyen utolsó jeles alkotása „A bányaműveléstan alapjai” című könyve volt (5. ábra). Ennek szellemi előzmé-

nyei a Bányászati telepítések analitikája (1960), majd a Telepítésmélelet a bányászatban (1966) voltak. Ezeket a könyveket évtizedeken át használták. A másik a bányaműveléstan, melyen a „Bányaművelés. Feltárás és fejtés” című tankönyve több kiadásban ugyancsak több évtizeden át tankönyvként szolgált (6. ábra). Jól átgondolt és letisztult szemlélete és fogalomkészlete a hazai és a nemzetközi bányaműveléstani szakirodalomban egyaránt ritkaságnak számított.

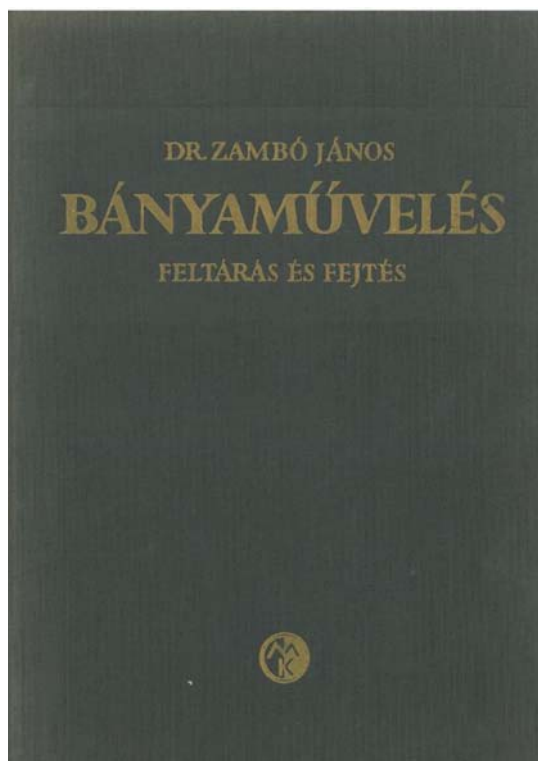
Faller Gusztáv (7. ábra), a magyarországi bányászatban jól ismert Faller család sarja iskolateremtő volt az ásványvagyon gazdálkodásban és a bányagazdaságtanban. Szerzőtársával – Tóth Miklóssal – kö-



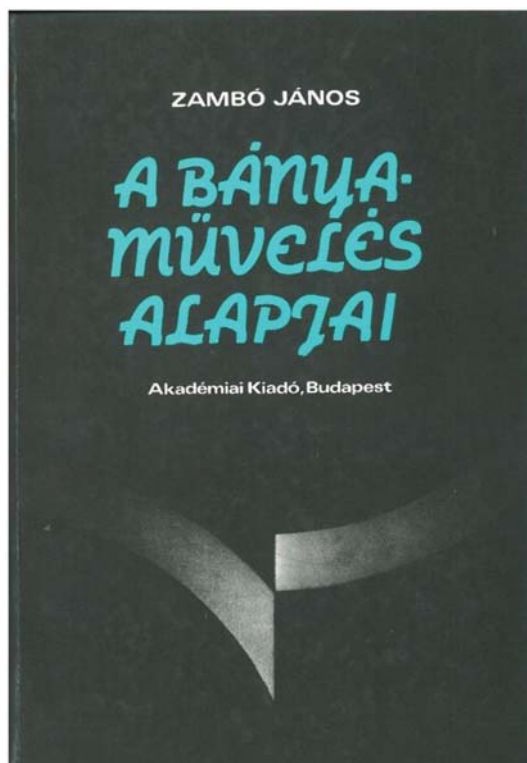
4. ábra. Zambó János

zösen írt „Ásványvagyongazdálkodási alapismeretek és Bányagazdaságtan” c. egyetemi jegyzeteikkel (8., 9. ábra) gazdagították a tanszék oktatási tevékenységét.

Patvaros József (10. ábra) csaknem négy évtizeden át oktatott a Bányaműveléstani Tanszéken bá-



6. ábra. Zambó János Bányaművelés. Feltárás és fejtés tankönyvének fedőlapja

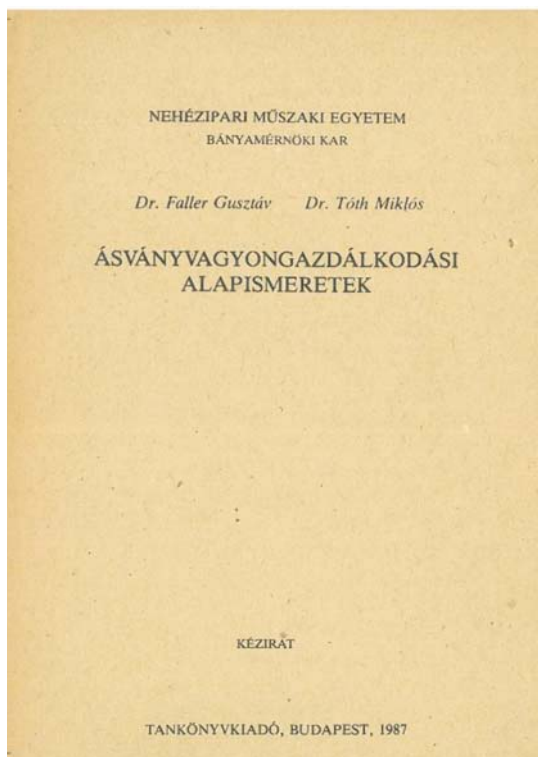


5. ábra. Zambó János A bányaművelés alapjai című könyvének fedőlapja

nyaművelést, szellőztetést, bányabiztonságot, robbantástechnikát és ásványvagyon kutatást. Előadásai sodró erejűek voltak. Rendkívül olvasott ember volt, és az olvasottakra jól emlékezett. „Elemi bányaveszélyek elleni védekezés (közetsújtás, bányatűzek, bányamentés)” című egyetemi jegyzetében (11. ábra) részletesen összefoglalta a tárggyal kapcsolatos ismeretek széles körét.



7. ábra. Faller Gusztáv

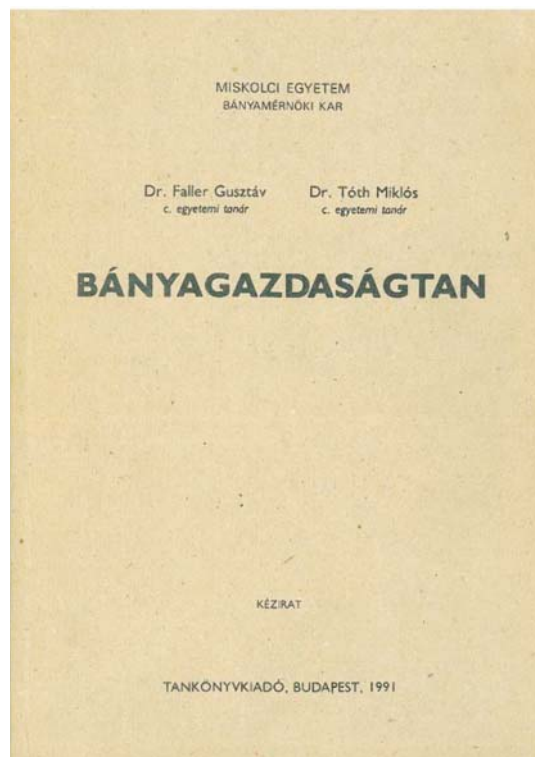


8. ábra. Faller Gusztáv és Tóth Miklós Ásványvagyon-gazdálkodási alapismeretek című egyetemi jegyzetének fedőlapja

Somosvári Zsolt (12. ábra) kőzetmechanikát, geo-mechanikát és bányakárokat oktatott. Rendszerezte a szakterület irodalmát, és azt egyebek között a „Geo-mechanika I. és II.” című egyetemi jegyzeteiben

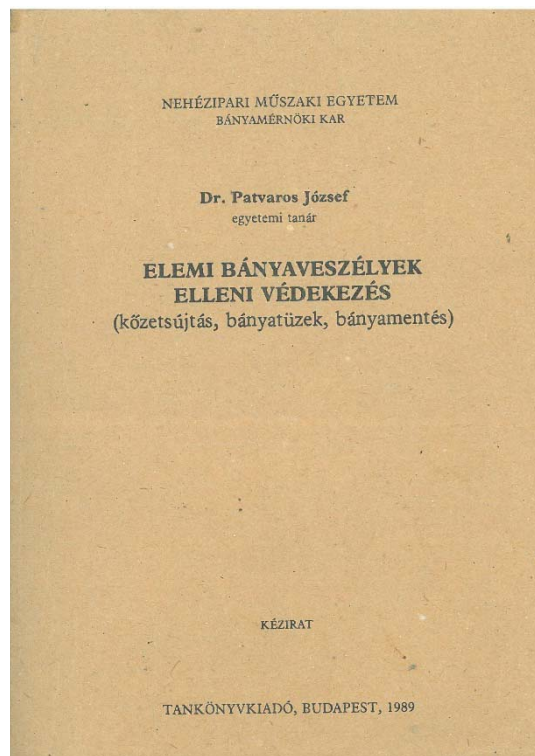


10. ábra. Patvaros József



9. ábra. Faller Gusztáv és Tóth Miklós Bányagazdaságtan című egyetemi jegyzetének fedőlapja

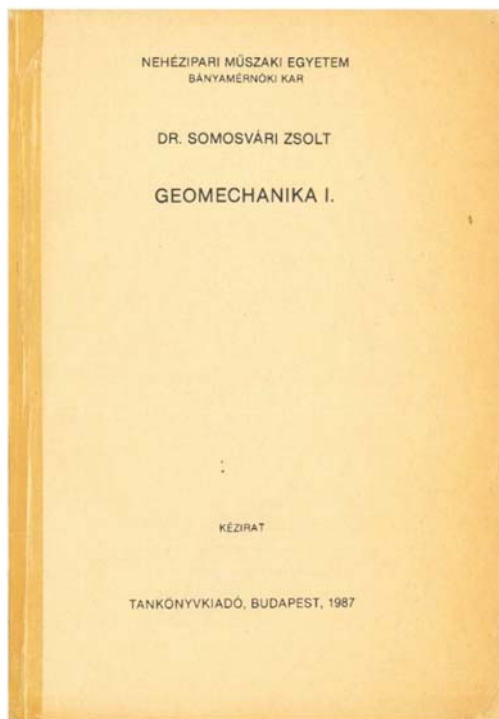
(13. ábra) foglalta össze. Ezzel a hiánypótló művével szakkönyvet adott hallgatói és a már végzett mérnökök kezébe.



11. ábra. Patvaros József Elemi bányaveszélyek elleni védekezés (közetsújtás, bányatüzek, bányamentés) című egyetemi jegyzetének fedőlapja



12. ábra. Somosvári Zsolt



13. ábra. Somosvári Zsolt Geomechanika című egyetemi jegyzetének fedőlapja

A tanszék új neve: **Bányászati és Geotechnikai Tanszék**

1994 közepétől a Bányaműveléstani Tanszék a Bányászati és Geotechnikai Tanszék nevet viseli. Ez az elnevezés kifejezi, hogy legjobb szakmai hagyományokat megtartva méltó módon képes válaszolni korunk oktatási és kutatási kihívásaira: a legkülönbözőbb ásványi nyersanyagok szelektív kitermelése, a rekultiváció, valamint a földkéregben kialakítandó sajátos mérnöki létesítmények, (például alagutak) építése terén.

A tanszék nagyban segítette oktatási és kutatási munkájában a Magyar Tudományos Akadémia támogatott kutatóhelye, az *MTA-ME Műszaki Földtudományi kutatócsoportja*.

Intézetté alakulás: **Bányászati és Geotechnikai Intézet**

A tanszék egy átszervezés következtében, egészen 2006-ig a Geodéziai és Bányaméréstani Tanszékkal együtt alkotja a Geotechnológiai és Térinformatikai Intézetet.

A mélyműveléses szénbányászat leépítése és visszaszorulása következtében a bányászati és a bányagépészeti képzést 1987-től integráltan, a bánya és geotechnikai szakon folytatjuk.

A Bányagéptani Tanszék az 1990-es évektől Geotechnikai Berendezések Tanszéke néven működik. 2007-ben egy újabb átszervezés eredményeként a két

tanszék egy intézetté alakítják, mely a Bányászati és Geotechnikai Intézet nevet kapja.

A Bányászati és Geotechnikai Intézet fő oktatási és kutatási területei, elsősorban a hazai bányászat igényeinek kielégítésére

A Bányászati és Geotechnikai Intézet szándéka az, hogy a kellő számú és megfelelő minőségben képzett bányamérnököt bocsásson a hazai bányászat számára, elsősorban a kő-, a homok- és kavics-, az ásvány- és a lignitbányászat számára. Ehhez a célhoz a következő tantárgycsoportokat oktatjuk jelenleg:

- építőanyagok,
- bányagazdaságtan, ásványi lelőhelyek gazdasági értékelése,
- bányaműveléstan (telepítés, bányanyitás, termelés, bányák bezárása),
- geomechanika, kőzetmechanika,
- rekultiváció, tájrendezés,
- robbantástechnika,
- számítógépes bányászati tervezés,
- gépészeti alapismeretek (műszaki ábrázolás, géptan),
- szállító- és termelőgépek, szivattyúk,
- bányavillamoságtan,
- hidraulikus energiaátvitel, mérés és automatizálás, valamint
- karbantartás, diagnosztika.

Az oktatás mellett jelenleg főleg a következő területeken végzünk kutató munkát:

2. táblázat. A Bányászati és Geotechnikai Intézet oktatói, kutatói és dolgozói a 2022/2023. tanévben

Név	Tudományos fokozat	Beosztás
Oktatók		
a bányagazdaságtan, telepítésanalitika, bányaművelés szakterületeken		
Dr. Molnár József	a műszaki tudomány kandidátusa, PhD	egyetemi docens
a kőzetmechanika, geomechanika, kőzetmozgás, bányakár szakterületen		
Dr. Debreczeni Ákos	a műszaki tudomány kandidátusa, PhD	egyetemi docens
a robbantástechnikai szakterületen		
Dr. Kamburov Sztefan	PhD	címzetes egyetemi docens, meghívott oktató
a bányabiztonság, rekultiváció szakterületen		
Tompa Richárd		egyetemi tanársegéd
a bányajog szakterületen		
Dr. Káldi Zoltán		címzetes egyetemi docens, meghívott oktató
bányagépesítési és bányavillamosságtani szakterületen		
Dr. Virág Zoltán	PhD	egyetemi docens
Nagy Ervin		címzetes egyetemi docens, meghívott oktató
Livo László		címzetes egyetemi docens, meghívott oktató
Dolgozók		
Antonovits Ábel Dániel		tanszéki mérnök
Siomos Angelos Sylvester		tanszéki mérnök
Szegediné Körmöndi Lilla		intézeti ügyintéző
Köteles László		laboráns technikus

- ❑ természetes kőanyagok és kőszerű mesterséges anyagok szilárdsági vizsgálata,
- ❑ geomechanika, kőzetmechanika, külfejtési rézsűk állékonysági vizsgálata, kőzetmozgások,
- ❑ robbantástechnika innovatív módszerei,
- ❑ bányászati műveletek gépesítése, automatizálása,
- ❑ bányászati jövesztő- és szállítógépek fejlesztése és vizsgálata,
- ❑ bányászati célgépek munkavédelmi és biztonságtechnikai vizsgálata,
- ❑ bányászati rekultivációs feladatok valamint
- ❑ bányászati műveletek számítógépes tervezése.

A jelenlegi oktatók, kutatók és a dolgozók névsora a 2. táblázatban olvasható.

- ❑ *intézetigazgató*: Dr. Molnár József, egyetemi docens, a műszaki tudomány kandidátusa, PhD
- ❑ *a Bányászati és Geotechnikai Intézeti Tanszék vezetője*: Dr. Debreczeni Ákos, egyetemi docens, a műszaki tudomány kandidátusa, PhD
- ❑ *a Geotechnikai Berendezések Intézeti Tanszék vezetője*: Dr. Molnár József

Összefoglalás

Cikkünkben megemlékeztünk a Bányaműveléstani Tanszék 250 évvel ezelőtti megalapításáról a Selmeci Akadémián. A tanszék neve és a hazai bányaiipar is folyamatosan változott. A XVIII. században meghatározó jelentőségű érc- és sóbányászatot mára felváltotta a külfejtéses szén- és építőipari alapanyag bányászat. Feladatunk azonban változatlanul az, hogy jól felkészített bányamérnököket képezzünk a hazai szilárdásvány bányászat igényeihez igazodva

150 éves a Miskolci Egyetem Geodéziai és Bányaméréstani Tanszéke (Selmecbánya–Sopron–Miskolc, 1872–2022)

DR. HAVASI ISTVÁN

intézetigazgató, tanszékvezető egyetemi docens
Miskolci Egyetem Geofizikai és Térinformatikai Intézet,
Geodéziai és Bányaméréstani Intézeti Tanszék



A tanulmány összeállítója a címbe foglaltaknak megfelelően – a teljesség igénye nélkül – a tanszéki bányamérés oktatásának, főbb kutatási eredményeinek, mérőeszközeinek és mérési módszereinek áttekintésével, a bekövetkezett változások és fejlődés bemutatásával foglalkozik. Mindezt az 1872-ben Cséti Ottó által Selmecbányán alapított Bányaméréstani-Geodézia Tanszék (BGT) története, és az előzőekre vonatkozó szakmai működése kapcsán teszi meg. E szakmatörténeti munka az eddigi hosszú tanszéki életutat a tanszéket irányító neves professzorok, vezetők életútja, szakmai tevékenysége alapján – amely három különböző működési helyszínhez (Selmec-Sopron-Miskolc) is kötődik – ismerteti. A szerző bízik abban, hogy e szakmai anyag olvasói számára sikerül megismertetnie azt a rendkívül sokrétű és eredményes munkát, amelyet a Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék (GBT) az elmúlt 150 évben végzett.

1. Bevezetés

A *Bányaméréstani* az első oktatott tantárgyak egyike volt a Selmeci Bányatisztképző Iskolán. A selmecbányai akadémián pedig a *Bányászati-Bányaméréstani Tanszék szétválásakor* (1866–1872) a *bányaméréstani oktatás önállóvá vált*. A Selmeci Akadémián 1872-ben Cséti Ottó alapítóprofesszor vezetésével *Bányaméréstani-Geodézia Tanszék* jött létre [1]. Utóda 1902-ben Szentistványi Gyula lett. Őt, az 1919-ben Sopronba került tanszék élén, 1926-ban Tárczy-Hornoch Antal követte. A tanszék az Ő irányítása alatt 1959-ig – a *Bányamérési Kar tanszékei Miskolcra költözésének befejeződéséig* – Sopronban működött.

1949-ben Miskolcon Nehézipari Műszaki Egyetemet hoztak létre, ahol már annak indulásakor Milasovszky Béla professzor vezetése alatt egy *Geodézia Tanszék* is volt. 1959-ben, a *miskolci és soproni tanszékek egyesítésével*, Milasovszky Béla irányításával alakult meg a jelenlegi *Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék*. Ennek későbbi tanszékvezetői Hoványi Lehel (1968-tól 1980-ig), Kolozsvári Gábor (1980-tól 1992-ig) professzorok és Graczka Gyula egyetemi docens (1992-től 2000-ig) voltak. 2000 májusától pedig a vezetői feladatokat Havasi István egyetemi docens látja el.

Az alapítástól szinte változatlan elnevezésünk a mai napig jól tükrözi azt a szakmai profilt – itt annak kapcsán most a bányamérést hangsúlyoznám ki – amelyet az egykori elődök az alapító professzor vezetésével a tanszék létrehozásakor fontosnak tartottak.

Megvizsgálva a felsőfokú végzettséggel rendelkező *bányamérési területen dolgozó szakembereket* az elmúlt mintegy 100 évre vetítve az mindenképpen megállapítható, hogy a színvonalas szakmai képzést az

érintettek számára e periódus első részében (közel 2/3-ban) a *soproni és miskolci bányaméréstani tanszékek* biztosították. A fennmaradó időszakot tekintve a bányamérés oktatását – a miskolci tanszék mellett - főleg az *ipari geodézia* tantárgy részeként, még az ország felsőfokú földmérő-képzést nyújtó intézményeiben (BME, székesfehérvári főiskola), azok szakmai profilnak megfelelő tanszékei is végezték, és végzik ma is.

Jelenleg, ha a hatósági nyilvántartásban a *hites bányamérők alapvégzettségét* végignézzük, akkor azok kb. 2/3-a földmérőmérnök és 1/3-uk pedig *bányamérnök*. Ennek természetesen számos oka van, közülük az egyik a földalatti bányászat elmúlt évtizedekben történt visszafejlesztése, egy másik pedig a korábbi üzemi bányamérési osztályok számának jelentős csökkenése, amely együtt járt a vállalkozói formában tevékenykedő *hites bányamérők* számának ezzel arányos növekedésével.

Ami a most vizsgált periódus kapcsán a *bányaméréshez kapcsolódó kutatást és műszerfejlesztést* illeti, az oktatáshoz teljesen hasonló arányok állapíthatók meg.

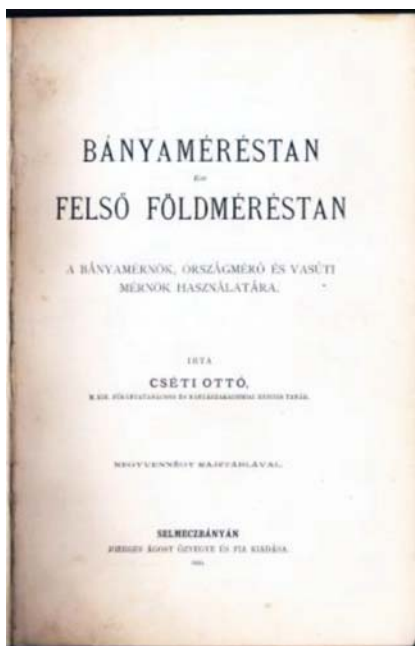
2. A bányamérési oktatás, kutatás, műszerfejlesztés 150 éves eredményei

2.1. *A Bányaméréstani-Geodézia Tanszék selmeci professzorai (Cséti Ottó és Szentistványi Gyula) szakmai munkásságának rövid bemutatása*

Cséti Ottó (Chrismár, 1884-ig) a selmeci alapítóprofesszor (1836–1906), (I. ábra), [1, 7] [*selmecbányai akadémia, II. osztályú rendes tanár (1878) bányatanácsos (1889), főbányatanácsos, I. osztályú rendes tanár (1894), kiváló oktató és műszerfejlesztő, 30 éves tanszékvezetői munka*]



1. ábra. Cséti Ottó olajfestménye és mellszobra (Miskolci Egyetem)



2. ábra. Cséti Ottó Bányaméréstan és Felső Földméréstan tankönyve (Forrás: Szabó László[†] a BGT volt egyetemi adjunktusa)

A jelentősebb publikációs munkáiból – a teljesség igénye nélkül – megemlítek néhányat. Ezek a következők: *Erdészeti földmérőtan*, Budapest, 1888, 1900, Selmecbánya, 1911; *Út, híd és erdészeti vasutak építéséről*, Selmecbánya, 1889; *Bányaméréstan és felső földméréstan a bányamérnök, országmérő, és vasúti mérnök használatára*, kézikönyv, Selmecbánya, 1894; *Magyar bányászati szintmérőműszer*, Selmecbánya, 1895; *Általános földméréstan*, Selmecbánya, 1900; *Magyar erdészeti buszola* műszer, magyar erdészeti mérőasztal, Bp. 1900; *Bányatelepek tervezése*, 1904; *A legcélszerűbb vezetékcső megválasztása*, Bp. 1905.

Az előzőekben felsorolt publikációi mellett még több tanulmányában foglalkozik akkori különböző új fejlesztésű bányamérő műszerek, mérési módszerek vizsgálatával.

Cséti Ottó érdeme volt – az előző gazdag szakirodalmi munkássága mellett – az érintett szakterületek magyar szaknyelvének kialakítása is.

Tanári pályájának kezdete, 1872-ben ugyanis egybeesett a Főiskolán a magyar nemzeti művelődés időszakával, az addig használt német nyelvet az oktatásban a magyar nyelv váltotta fel. Ebből adódóan, tehát



3. ábra. Cséti-féle lengésmegfigyelő készülék



4. ábra. Cséti-féle gyorsszintező

meg kellett teremteni a technikai nyelvet és a műszaki szakkifejezéseket is. Cséti – Kerpely mellett – ebben a munkában is igen jelentős szerepet vállalt.

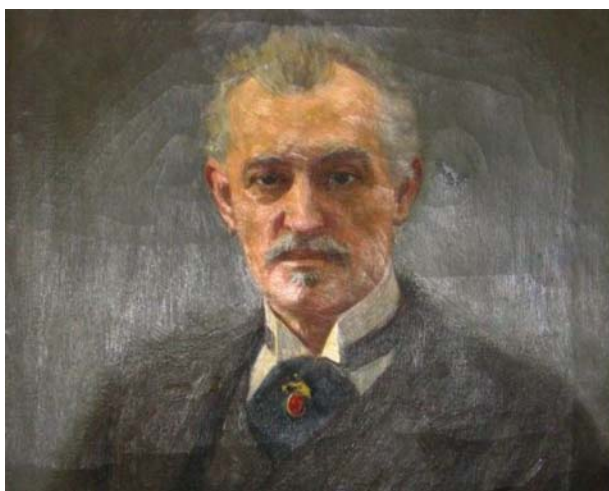
Kiemelkedő és külföldön is elismert műszerfejlesztői tevékenységét számos új mérőműszer megalkotása, új mérési eljárás kifejlesztése igazolja. A *budapesti millenáris kiállításon* 1896-ban a mérőműszerek tökéletesítése érdekében végzett munkáját kettő éremmel is jutalmazták. A *párizsi világkiállításon* 1900-ban pedig a *selmecbányai királyi akadémia mérőkészülékeiből és a segédeszközökből 14-et* állított ki. Ezek a következők voltak: *selmeci állvány* (Cséti-féle bányászati műszerállvány); *selmeci bányászati feszítőgerenda*; *Cséti-féle központosító tányér* (Cséti-féle lengésmegfigyelő készülék, *selmeci függélyveszteglő*) (3. ábra); *tahiméter hosszúságok és magasságok mérésére*; *fügő gyorsszintező műszer* (Cséti-féle gyorsszintező) (4. ábra); *selmeci szintező szalag*; *selmeci szintező lécz*; *vetítőkészülék léptékkal*; *vetítőkészülék osztóhengerrel*; *logaritmikus vonalzó*; *hajlásmérő* (Cséti-féle fokív); *magyar mérőasztal*; *magyar erdészeti buszola*; *a bányamérő elektromos lámpája* [1, 7]. Egyes, itt felsorolt műszerei ma a *soproni Központi Bányászati Múzeumban* és a *Miskolci Egyetemen* található meg.

Cséti Ottó alapítóprofesszort *Sobó Jenő* főiskolai rendes tanár röviden így jellemezte:

„Az igazi tanárban az embernek, a szaktudósnak és a tanítómesternek kell egybeolvadnia, egymást kiegészítenie. Csétiiben, mint tanárban, ezek a tulajdonságok ritka harmóniában olvadtak össze s innen ered az a nagy siker is, melyet tanításával elért. Sok nemzedék gazdagodott szellemének kincsein”

Szentistványi Gyula a selmeci-soproni professzor (1854–1928), (5. ábra), [2]

[*kitűnő tanár, gyakorlati ismeretekkel felvértezett bányamérnök, szakíró, feltaláló és műszerfejlesztő. 17+7 (Sopron) évig tanszékvezető*]



5. ábra. Szentistványi Gyula olajfestménye és mellszobra (Miskolci Egyetem)

1902 ősztől a selmeci akadémián a Bányamérés-tan-Geodézia Tanszéken oktatott, és Cséti nyugállományba vonulásával az így megüresedett helyre 1904-ben nevezték ki. Itt kb. 17 évet dolgozott.

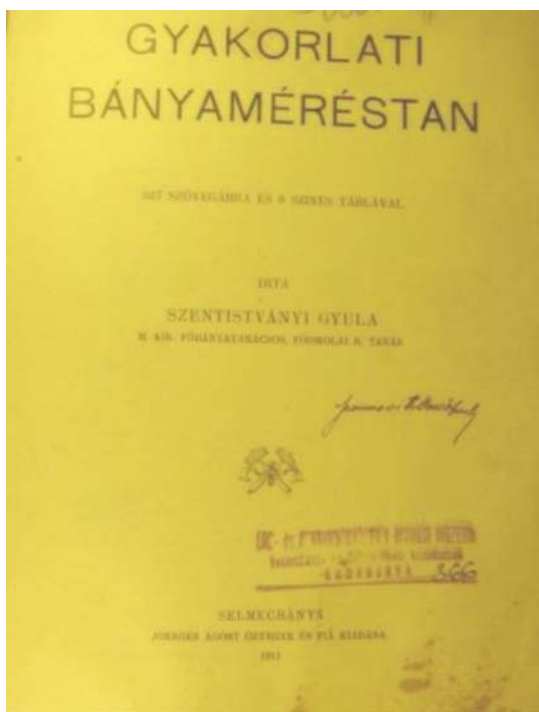
Az *Erdészeti Lapok* 1904. évi száma *Különfélék* rovatának *Személyi híreiben* a következő olvasható [2]:

„A király Szentistványi Gyula bányafőmérnököt bányatanácsossá és a selmecbányai Bányászati és Erdészeti Akadémiához a föld- és bányamérés tanárává nevezi ki.”

Vezetőtanári időszakának kezdete egybeesik az oktatási intézményt érintő bizonyos reformokkal. 1904-től a selmeci Bányászati és Erdészeti Akadémia felvette a *Bányászati és Erdészeti Főiskola* nevet.

Az addigi 3 éves képzési idő 4 évre növekedett, ugyanakkor megmaradtak a *bányamérnöki, vaskohómérnöki és fémkohómérnöki szakosztályok*. Mint a bányamérés tanára, Szentistványi mindhárom szakosztály hallgatója részére oktatott viszonylag magas óraszámú *elméleti és gyakorlati geodéziai és bányamérés tantervet*. Ez a leendő bányamérnököknek a II. évfolyamon *Geodézia I* (4 e. + 8 gy.); a III. évfolyamon *Geodézia II* (4 e. + 6 gy.) és a IV. évfolyamon *Bányamérés tan* (3 e. + 6 gy.) tantárgyakat jelentette. Az előző tárgyak közül a másik kettő szakosztály diákjai *csak a Geodézia I-et* tanulták. Előadásában, magyarázataiban szerencsésen és átfogóan ötvözte az elméleti tudást a gyakorló bányamérnök igényeivel. *Minden bizonnyal a soproni 7 éves utolsó vezetői* időszaka ezzel a megreformált *oktatási tevékenységgel* jellemezhető.

Szakirodalmi munkásságának eredményei közül a következő fontosabb példák emelendők ki: az 1911-ben megjelent könyvatos *Gyakorlati Bányamérés tan* könyve (662 o., 6. ábra, *Cséti Ottó: Bányamérés tan tankönyvének továbbfejlesztése*) és a bányászati lapokban a *lejtaknamérésről*, az *invár acélból készült mérődrótokról*, a *bányabeli háromszögelésről*, vala-



6. ábra. Szentistványi Gyula Gyakorlati bányaméréstan tankönyvének fedőlapja (Forrás: Szabó László† a BGT volt egyetemi adjunktusa)

mint a kapcsoló- és tájékozó mérések megoldásairól szóló cikkei.

A bányamérés egyes feladataihoz használható több mérőműszer és segédberendezés őrzi nevét. Ezek például a megjavított Veith-féle aknafüggőberendezés (7. ábra), a Selmeci tárcsa, a Szentistványi-féle



8. ábra. Fénykép Tárczy-Hornoch Antalról



7. ábra. A Veith-féle függőlemezű Szentistványi Gyula által továbbfejlesztett változata

feszték, a lejtaknamérés elektromos jelzőtáblái és a Selmeci irányrögzítő készülék.

2.2. A Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék soproni professzora (Tárczy-Hornoch Antal) szakmai munkásságának rövid ismertetése

A Bányászati és Erdészeti Főiskola 1919-ben került Sopronba, ahol Szentistványi még hét évig, 1926-os nyugállományba vonulásáig ellátta a tanszékvezetői feladatokat.

Tárczy-Hornoch Antal akadémikus (1900–1986, 8. ábra), [3]

[a magyar geodéziai és bányamérési iskola megalapítója, a Nemzetközi Bányamérő Egyesület (ISM) első tiszteleti tagja, 33 éves tanszékvezetői munkája]

Tárczy-Hornoch Antal a soproni főiskola Geodéziai és Bányaméréstani Tanszékét 1926 és 1959 között magas színvonalon vezette. Felemelte a geodéziai és bányaméréstani tanórák számát, bevezette az *Alkalmazott Geofizika* tárgyat. Javaslataira 1949-ben önálló szakként földmérő- és 1951-ben geofizikusmérnök képzés kezdődött el. 70 éves korától a tanítványai 5 évenként összegyűltek, hogy köszöntsék őt.

„Szemléletes előadó volt. Barna vászonra festett műszerek képeivel készült mindig az előadásokra, továbbá az előadói



9. ábra. Tárczy-Hornoch Antal Bányaméréstan II. és I. jegyzete

asztalon is mindig sorakoztak a műszerek.” (Szádeczky-Kardoss Gyula)

A bányaméréstan oktatásához több jegyzetet is írt (9. ábra).

A kutatási eredmények közzlésére 1929-ben idegen nyelvű főiskolai szakfolyóiratot indított el. Tudományos munkássága a *geodézia*, a *geofizika*, a *bányamérés* és *technikatörténet* területeire terjedt ki. 6 könyvben, füzetekben és számos ország különböző folyóirataiban 300-nál több tudományos cikke jelent meg. A BKL-ben a *bányaméréshez kapcsolódóan* ket-tő csoportban most megemlíteném azokat a kutatási témákat, amelyekkel foglalkozott. Az egyik csoport a *mérések, mérőeszközök, eszközfelvételek*:

- ❑ acélmérőszalagos hosszméréssel a bányában,
- ❑ a Schmidt-féle aknafüggélyezés korszerűsítése,
- ❑ a soproni lejtaknamérő műszer,
- ❑ a bányatérképezés egységesítése,
- ❑ a *műszergyártás szolgálatát ellátó soproni tanszéki műhely (műhelyvezető: Bummer Antal, 10., 11. ábra)*,
- ❑ a bányabeli sokszögvonala hibaelméletileg legkedvezőbb oldalának kiválasztása giroteodolittal való tájékozódáshoz,
- ❑ a behajlási korrekció pontosabb kiszámítása.

A másik *szakmatörténeti csoport* kapcsán pedig az alábbiakról írt:



10. ábra. Soproni irányrögztítő



11. ábra. Kiegészítő bányateodolit

- ❑ egy 1797-ből való magyarországi bányamérés tan,
- ❑ a kompenzáló planiméter feltalálója,
- ❑ a magyar bányamérés múltja,
- ❑ Mikovinyi Sámuel élete és munkássága.

Tanítványai, munkatársai között olyan ismert bányamérési szakemberek voltak, mint pl. *Milasovszky Béla* (1926), *Konrád Ödön* (1927), *Zahorecz János* (1940), *Ormos Károly* (1943), *Faix László* (1944), *Jármai Ervin* (1945), *Farkas Béla* (1950), *Hoványi Lehel* (1950), *Bérces József* (1953), *Farkas Béla* (1953), *Ódor Károly* (1953), *Fónay Valér* (1954), *Juhász Béla* (1954), *Kolozsvári Gábor* (1954), *Lóránt Miklós* (1959).

Zambó János (1942), *Feigly Béla* (1950), *Szádeczky-Kardoss Gyula* (1950), *Alpár Gyula* (1951), *Halmos Ferenc*, *Staudinger János* (1952), *Zólomy Miklós* (1954), *Németh József* (1956) és *Zachár Gyula* (1956). (A zárójelekben megadott évszámok a főiskolai végzési éveket jelentik!)

2.3. *A Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék miskolci tanszékvezetői (Milasovszky Béla, Hoványi Lehel, Kolozsvári Gábor, Graczka Gyula és Havasi István) szakmai munkásságának rövid ismertetése*

Milasovszky Béla (1900–1973, 9 + 9 évig tanszékvezető, 12. ábra), [4]

[„Kiválóan oktatott, előadásait mélyszélességű szakmai lelkesedéssel tartotta.” (Kolozsvári Gábor)]

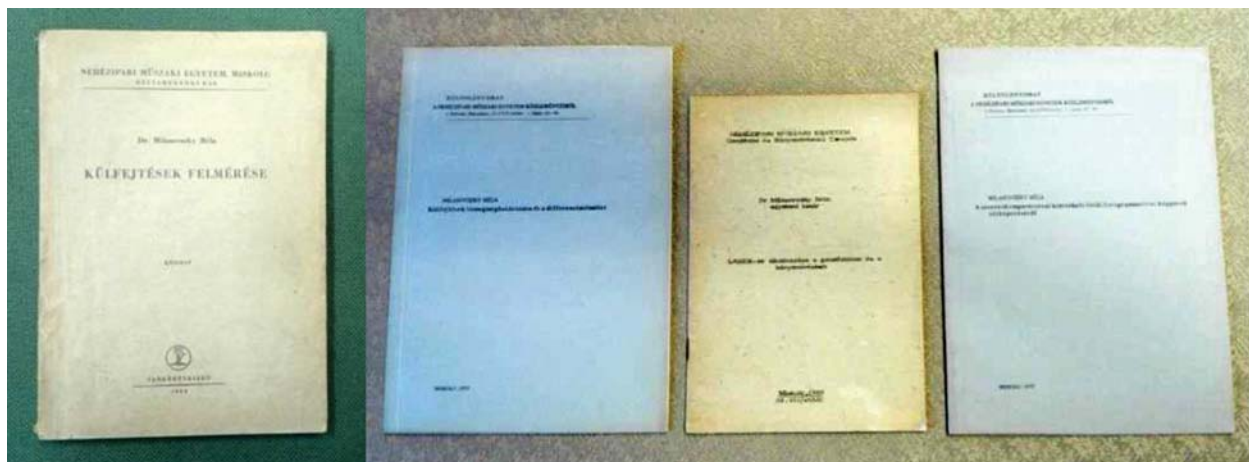
[„Reggel 7-kor már bent volt, a gyakorlóban rajzolta ábráit, elgondolkodott, minden oldalról körbenézte. Mire a hallgatók már ott lesznek komplett és nagyon szépen szerkesztett ábrák legyenek.” (Czellár András)]

A Nehézipari Műszaki Egyetemre 1950-ben nevezték ki egyetemi tanárnak. A Bányamérési Kar szaktanszékeinek Miskolcra helyezését (1959) ő szervezte meg a jelenlegi Geodéziai és Bányamé-



12. ábra. Fénykép Milasovszky Béláról

réstani Tanszékét, amelyet 1968-ig (9 év) vezetett. 1950 és 1959 között – amint azt már a bevezetésben említettem – a Soproni Bányászati és Erdészeti Főiskolán és a miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen megosztott bánya- és földmérőmérnök oktatás folyt. Sopronban Tárczy-Hornoch professzor vezetésével a Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék a felsőgeodéziai, kiegyenlítő-számítási és bányamérési oktatási feladatokat végezte, míg Miskolcon a Geodézia Tanszék a geodéziát tanította.



13. ábra. Milasovszky Béla jegyzete és tanulmányfüzetei

Milasovszky professzor a tanszéken a geodézia, Hoványi Lehel pedig a bányamérés előadásait tartotta. A bányamérési gyakorlatokat Kolozsvári Gábor, majd Szabó László vezette. A 60-as évek végén még 4 féléves geodéziai oktatás folyt, amelyet később 2 féléves képzés váltott fel, heti 4+4 órában.



14. ábra. Fénykép Hoványi Lehelről

A 60-as évek legvégén már Hoványi professzor volt a tanszékvezető, és a tanszéken *komoly fotogrammetriai fejlesztés* indult a *külfejtéses bányászat mérési problémáinak megoldására*. Ebben az időben került a tanszékre egy komoly fotogrammetriai kiértékelő rendszer (*sztereoautográf*). Az ehhez kapcsolódó kutatás tekinthető Milasovszky Béla bányaméréshez köthető talán legfontosabb tevékenységének.

A bányaméréshez kapcsolódó szakirodalmi tevékenységéből a következőket mindenképpen ki kell emelni:

- ❑ külfejtések felmérése (egyetemi jegyzet, 13. ábra, bal oldali kép),
- ❑ a lézersugár szerepe a geodéziában és bányamérésben (13. ábra, jobb oldali kép),
- ❑ a bányaméréshez sorolható mintegy 20 publikációja, amelyek például a következőkkel foglalkoznak: *irányvágatok telepítése és kitzése; köbtartalom-számítás módszerei; tömegmeghatározás pontossága; külfejtések tahimetrikus felméréseinek és térképezésének hibaforrásai; a sztereo-fotogrammetria alkalmazása a külfejtésekben, síkfotogrammetria a geológiában, fotogrammetria a bányamérés rutinjellegű feladataiban* (13. ábra, jobb oldali kép).

Hoványi Lehel (1922–2002, 100 éve született, 12 éves tanszékvezetői munka, 14. ábra), [5] (Egykori tanszéki kollégái azt mesélték Hoványi professzorról, hogy a munkarendet szigorúan megkövetelte tőlük, ugyanis reggelenként és a munkaidő végén rendszerint végigjárta a tanszékét.)



15. ábra. Hoványi Lehel két, széles körben ismert tankönyvei



16. ábra. Hoványi Lehel által összeállított Bányamérési irányelvek

Hoványi professzor 1968-tól volt a *Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék (GBT)* vezetője. 20 évet meghaladó tanszéki munka után, 1980. január végén saját kérésre – megromlott egészségi állapota miatt – vonult nyugdíjba.

Oktatói-kutatói munkája a hibaelmélet, a kiegyenlítő számítások, a bányaméréstan, bányakártan, a bányászati geometria és a geostatistika területére irányult. Akadémiai doktori értekezésében a bányaműveletek okozta külszíni közetmozgások geodéziai úton történő meghatározásának új mérési és számítási módszereit ismertette. „Bányamérés” című *nívódíjas könyvét* nemcsak a hallgatók generációi használták tanulmányaikhoz, hanem a gyakorló bányamérő szakemberek is gyakran forgatták. Hoványi professzor



17. ábra. Fénykép a bányászati körívkitűző készülékről

nevéhez kapcsolható a *hazai bányászati geometriai és geostatistikai kutatások megindítása és egyetemi oktatásban történő megjelenítése is.*

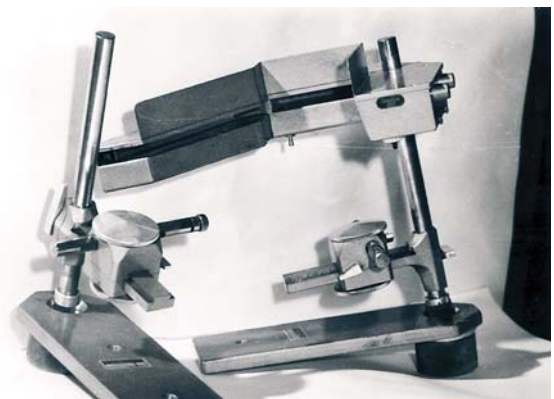
Ő volt a *kezdeményezője* (üttörője) a tanszéken 1962–1966 években folyó *bányamérő szakirányú képzésnek*, melynek eredményeképpen több mint 30 hallgató szerzett mélyebb és alaposabb geodéziai és bányamérési ismereteket. Köztük például olyan körünkben ismert bányamérők, mint *Szabó László* (1962), *Somoskői László* (1962), *Füst Antal* (1963), *Tasnádi Tamás* (1964), *Pázsit Csaba* (1965) és *Somosvári Zsolt* (1965). (A zárójelben megadott évszámok az egyetemi végzési éveket jelentik!)

Szakirodalmi munkássága kapcsán kiemelendő a következők: a *nívódíjas Bányamérés és a Külfejtéses bányák felmérése tankönyvei* (15. ábra); a *Bányaméréstan I–III*, a *Geodézia és térképrajz II*, a *Bányászati geometria* (társszerző: *Kolozsvári Gábor*); *Geodézia és bányászati geometria II* (*Bányászati Geometria*) (társszerző: *Füst Antal*); a *Geodézia és bányaméréstan* (*Bányaméréstan II*) és a *Geodézia és bányaméréstan* (*Bányaméréstan I–II*) (társszerző: *Kolozsvári Gábor*) *jegyzetei*.

Megemlíthető még kettő, a bányászat, a bányamérők, a bányamérői gyakorlat számára összeállított fontos tanulmány is. Az egyik a *Bányamérési irányelvek* (16. ábra), a másik pedig *A kőolaj- és földgázipar geodéziai és bányamérési irányelvei* (társszerző: *Kolozsvári Gábor*).

Összesen 60 magyar és 20 idegen nyelvű szakcikke jelent meg. Ezek jelentős része a *bányászati alapponthálózatok létesítésével*; a *közetmozgás/bányakár-mérési és -számítási módszerekkel*; a *bányamérő műszerekkel*; az *oktatással, szakmatörténettel, a bányamérő szolgálattal*; az *ásványvagyon-számítással* és a *bányászati geometriával* foglalkozik.

A Geodéziai és Bányaméréstani Tanszéken eltöltött 20 éves szakmai/tudományos munkássága szerves része az akkori legfontosabb tanszéki kiemelt kutatási területeknek, amelyeknek ő volt az érdemi munka vezető kutatója. Ezek a következők:



18. ábra. A miskolci aknafüggléző berendezés

- ❑ kőzet- és építménymozgások, létesítménydeformációk elektromos mérőműszereinek kialakítása,
- ❑ ásványlelőhely-paraméterek rajzi és statisztikai értékelése,
- ❑ nagyméretű hengeres állótartályok alak- és deformációmérései.

Elsősorban a *bányaműveletek okozta helyzetváltozások nyomon követése* céljából szakmai irányításával a GBT műhelyében a bányamérés számára számos saját fejlesztésű és kiegészítő mérőberendezés, műszertartozék és elektromos regisztráló eszköz készült.



19. ábra. Fénykép Kolozsvári Gáborról

Megemlítendő azonban az is, hogy az egyes mérőműszerek tervszerű gyakorlati célú kialakítása és kivitelezése *Gál László műhelyvezető* érdeme volt. Ezek az eszközök a következők:

- ❑ a *dinamométeres acélmérőszalag* és a *miskolci komparáló pad*,
- ❑ a *miskolci bányászati körívkitűző készülék* (szabadalom), (17. ábra),
- ❑ a *miskolci lengésmegfigyelő (aknafüggélyező) berendezés*, (18. ábra),
- ❑ a *billenőtányéros bányászati teodolitállvány*,
- ❑ az *elektromos mozgásmérők* (műszer + mérőfej),
- ❑ a *miskolci optikai vetítés ordinátamérő*,
- ❑ a *félautomatikus hidrosztatikai szintezőműszer*,
- ❑ a *metró-mozgólépcső pályamérő kocsi*.

Vezetői időszaka során a tanszék már meglévő muzeális eszközállománya az akkori időszak legkorszerűbb műszereivel (giroteodolitok, elektrooptikai távmérők, fotogrammetriai mérő- és kiértékelő műszerek) folyamatosan gyarapodott. Ezeket még bővítették a tanszék optikai-mechanikai, elektromos laboratóriumában fejlesztett, korábban már tárgyalt mérőberendezések. A GBM TSZ műszertermének felszereltsége akkoriban európai színvonalú volt.

Kolozsvári Gábor (1932-2009, 90 éve született, 12 évig tanszékvezető, (19. ábra), [6])

(A szakmai anyagok összeállításakor alaposságát, az általa használt igényes magyar nyelvezetet, fogalmazói készségét mindig is csodáltam.)

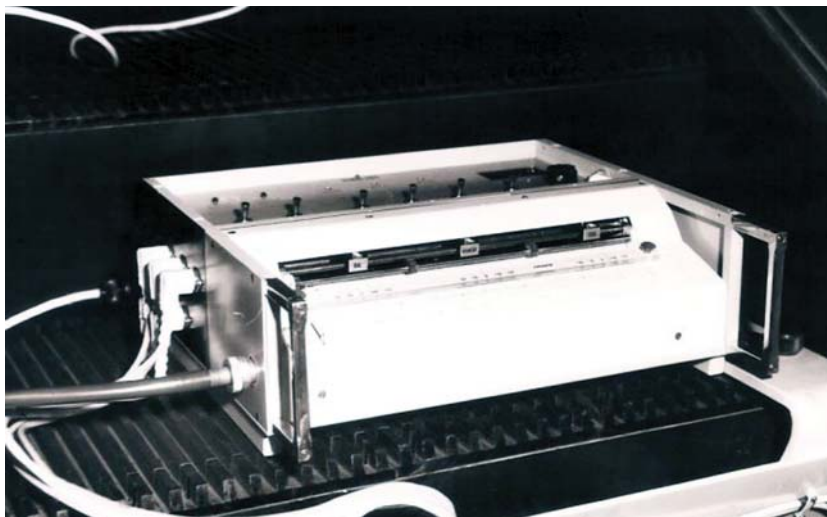
Kolozsvári Gábor Hoványi professzor nyugdíjba menetele után, 1980 és 1992 között lett a Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék tanszékvezető egyetemi



20. ábra. Kolozsvári Gábor doktori és kandidátusi értekezései



21. ábra. A miskolci hidrosztatikai szintező



22. ábra. A pályamérő kocsi

tanára. 1961-ben áthelyezéssel, ipari kádercserével adjunktusi beosztásba került a *Nehézipari Műszaki Egyetem Bányamérnöki Kara Geodéziai és Bányaméréstani Tanszékére*. Ebben a munkakörben, kezdetben *Milasovszky Béla*, később *Hoványi Lehel* professzorok irányítása alatt dolgozott. Oktatói tevékenységét *bőséges ipari tapasztalat* birtokában kezdte el. Felelős gyakorlatvezetője volt a Bányaméréstani tárgy gyakorlatainak, továbbá a bányamérnök- és bányamérő ágazatos tanulók részére a Geodézia és bányamérés, az olajbányász, a geológus és a levelező bányamérnök-hallgatóknak pedig a Geodézia és bányászati geometria tárgyakat adta elő. 1973-tól tanszéki feladatait vezető oktatóként, egyetemi docensként végezte.

Professzorként több mint egy évtizeden keresztül nyugdíjba vonulásáig (1992-ig) a bányaméréstani tárgy előadója, vizsgáztatója volt.

Igen gazdag *szakmai tudományos tevékenységének* gerincét a *geodézia, bányaméréstani, bányakártani, ipari geodézia* területek folyamatos ápolása, oktatása jelentette. Behatóan tanulmányozta a *bányászati áttörési mérések tervezésének* kérdését. *Egyetemi doktori (1966) és kandidátusi értekezésében (1972) is ezt az igen fontos és érdekes témakört vizsgálta (20. ábra képei).*

Szakirodalmi munkássága jelentőségét igazolja a *3 társszerzővel írt egyetemi jegyzete*, amelyekből a legutolsó a *Geodézia és Bányamérés I–II*, a bányaméréstani tantárgy oktatásának mindmáig alapjegyzete. Ehhez társul még a *bányászat, az építőipar és a metróközlekedés geodéziai-bányamérési területeiről írt közel 50 magyar és idegen nyelvű szakkikke és tanulmánya*. Ezekben számos szakmai problémával foglalkozott, közülük is kiemelendők a következők: az *invaracél-szalag használata*; az új mozgásmérési módszerek, *sokszögelési hálózatok* tervezése, kiegyenlítése, a *bányászati szintezési vonalak zárlati hibáinak elosztása*,

a *budapesti metróállomások elmozdulásmérései*, a *nagyméretű olajtartályok deformációmérései*, a *metróállomások mozgólépcsőinek ellenőrző mérései*.

Személye kapcsán fontos megemlíteni még a Bányamérő Szakcsoportban végzett igen aktív hazai és nemzetközi (ISM) tevékenységét is. Egy ciklusban *szakcsoportelnök* volt, és emellett még egy ideig az ISM I. Mb-ban is dolgozott.

A továbbiakban pedig rátérek a *hozzá szorosabban kötődő* tanszéki műszer- és műszertartozék fejlesztésekre. Ezek pedig a következők: a *félautomatikus hidrosztatikai szintezőműszer (21. ábra)*; a *metrómozgólépcső pályamérő kocsi (22. ábra)*; a *tartálymérés motoros mozgatású szelvényező berendezése (mászóka)*; a *léptetőmotoros, zárt tokozású, fűthető lézeres irányadó* és az *automatikus rajzdigitalizáló műszer*.

Kolozsvári professzor *mintegy 30 éven keresztül bányamérnökök generációjának oktatta a geodézia és bányamérési ismereteket*, nevelte őket e szakterület megismerésére, szeretetére.

Graczká Gyula (1946–2020) másodállású egyetemi docensként 1992 és 2000 között (8 évig) vezette a Tanszékot. Az ő tanszéki oktatási-kutatási munkája kevésbé kapcsolódott a *bányamérési területhez*. A tanszéki bányamérési elméleti és gyakorlati oktatást ekkor *Szabó László* és *Havasi István* látta el. Ugyanakkor az is igaz, hogy a 90-es évek elejétől a mélybányászat jelentős visszafejlesztése zajlott. A külfejtési bányászat területén viszont a korszerű geodéziai műszertechnika (mérőállomások, GPS-vevők) megjelenése és gyors terjedése volt jellemző. A számítástechnika, a számítógépek rohamos fejlődése a geodéziai adatfeldolgozás, számítógépes térképezés és a térinformatika felgyorsulását és korszerűsítését hozta magával. Az 1995-ös Bokros-csomag azonban az egyetemeken mindenütt jelentősen érezte ked-

vezőtlen hatását. Ez a Geodéziai és Bányaméréstani Tanszéken is az oktatói és dolgozói létszám komoly csökkenését hozta magával. Megszűnt a tanszéki műszerek és műszertartozékok készítését és a műszerpark karbantartását biztosító műhely, és a műhelyvezető, Gál László is nyugdíjba került. Hogy ez mit jelentett egy ilyen profilú tanszék számára, különösebb magyarázatra nem szorul.

Ami pedig Graczka Gyula bányaméréshez is közvetetten köthető kiemelt érdeme a tanszék életében a 90-es évek közepétől, ez a műholdas helymeghatározás (GPS) és a térinformatika mint új szakmai tématerületek megjelenítése a tanszéki kutatásban és azok oktatásba integrálása.

Havasi István egyetemi docens 2000 májusától (22 éve) tölti be a tanszékvezetői munkakört a Geodéziai és Bányaméréstani Tanszéken. Ami azóta (az elmúlt 22 évben) a bányamérnök-hallgatók bányamérés oktatásának egyetemi háttérét illeti, először 2000 ősztől új racionalizált tanterveket vezettek be, majd 2002 szeptemberétől jött a kreditrendszer, később pedig a kétlépcsős lineáris Bologna-rendszer. Az első kettő oktatási reform időszakában a bányamérési tárgyak oktatását továbbra is Szabó László és Havasi István végezte. Az első időszakban egyetemi szinten a bányamérési elméleti és gyakorlati óraszámok (4 e. + 2 g.) főiskolai szinten 2 e. + 2 g. voltak. Természetesen a tantárgy oktatása levelező képzésben is folyt. A kreditrendszerben az óraszámok nem változtak csak az elméleti és gyakorlati oktatási részek önálló tárgyak lettek. Ami pedig a 2006-os Bologna-rendszert illeti, abban a bányamérési tárgyak oktatását már csak Havasi István látja el. A BSc-s bányamérnök-hallgatóknak a Bányamérés külfejtésorientált, és az óraszám az 1 e. + 2 g., míg a levelező MSc-s bányamérnök-jelölteknek a Bányaméréstan főleg mélybányászati ismereteket jelent. A kari doktori iskola alapozó tárgyai között is megjelenik a bányaméréstan (*Mérnökgeodézia és bányaméréstan*). 2002-ben az oktatói létszám 5,5 volt, 2009-ben 3 (+2), most pedig csak 2,5. Ami pedig a bányaméréshez kapcsolódó kutatást illeti, a tanszéki profilú korábbi hagyományos kutatási témáink gondozása a lehetőségek szerint megtörtént. Ez a tevékenység főleg különböző pályázatokhoz kötötten zajlott, és elsősorban a mérnökgeodéziai/bányászati mozgásmérések témakörét érintette. A korábbi ipari megbízások – több, most nem részletezendő okból is – drasztikusan lecsökkentek, megszűntek. Ugyanakkor már az előzőekben is említett gyors mérési technológiai fejlesztés eredményei, a jogi és hatósági környezet változásai a bányászatban is folyamatosan jelentkeztek. A tanszéki új kutatási irányok között megemlíthető a korszerű mérőműszerek (mérőállomások, GPS-vevők, lézershakkenerek, földi radar, drónok, szonárok stb.) és

mérési eljárások bányászati alkalmazása, azok pontosági kérdései, továbbá a bányászati térképezés digitális átalakulása, a köbtartalomszámítás problémái stb. Az előző témákban elért eredményeket szakdolgozatók/diplomamunkák, hazai és nemzetközi publikációk, konferencia-előadások foglalják magukba. Ezek bővebb ismertetésére most nem térnek ki.

A tanszék jelenlegi vezetőjeként úgy gondolom, hogy amit az elmúlt két évtized szakmai munkája eredményei kapcsán talán külön is érdemes kiemelni, az az, hogy a Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék mind a hazai, mind a nemzetközi szakmai körökben ismertté – és talán mondható –, elismertté vált köszönhetően annak a több mint 20 éves aktív munkának és jelentős vezetői szerepvállalásnak, amely egyrészt az OMBKE Bányamérő Szakcsoportjához, másrészt a Nemzetközi Bányamérő Egyesülethez (ISM-hez) kötődik.

Ami pedig a bányamérés tanszéki gondozásának hosszú távú jövőjét illeti, e tanulmány összeállítójaként bízom abban, hogy talán arra is igaz lesz az, amit egyszer a vörös lézerek kapcsán egy angol nyelvű cégismertetőn hallottam, miszerint: „The future is green, the future is bright.”

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Havasi István – Miklós Evelin: Ismert magyar bányamérők – Cséti Ottó, a Bányaméréstan Tanszék alapító-professzora (140 éves a Miskolci Egyetem Geodéziai és Bányaméréstani Tanszéke). LI. Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatcsere: Bányamérés Selmechtől napjainkig – 50 éves a fehérvári földmérőképzés, Székesfehérvár, 2012. 06. 13. – 2012. 06. 15.
- [2] Havasi István – Köhalmi Boglárka Kinga: Ismert magyar bányamérők – Szentistványi Gyula a bányaméréstan selmeci-soproni professzora. Van jövője a mecseki bányászatnak: LII. Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatcsere, Konferenciakiadvány (pp. 53–60), Szerkesztő: Wéber 2000 Kft., Pécs, 2013. 05. 29. – 2013. 05. 31.
- [3] Kurgyis Kata (Konzulens: Havasi István): Ismert magyar bányamérők – Tárczy-Hornoch Antal. PP-előadás, XLIX. BTT. Salgótarján, 2010. 06. 10.
- [4] Pollner Hanna (Konzulens: Havasi István): Ismert magyar bányamérők – Dr. Milasovszky Béla. Prezi-előadás, 50. Jubileumi BTT. Sopron, 2011. 06. 09.
- [5] Havasi István – Schultz Vera Magdolna: Ismert magyar bányamérők – Hoványi Lehel (1922–2002). Bányamérés – újjászülető bányászat: LIII. Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatcsere. Konferencia-kiadvány (pp. 50–62), Szerkesztő: Wéber 2000 Kft., Miskolc-Tapolca, 2014. 06. 04. – 2014. 06. 06.
- [6] Havasi István – Orosz Anna: Ismert magyar bányamérők – Kolozsvári Gábor (1932–2009). Bányamérés az olajiparban: LIV. Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatcsere. Konferencia-kiadvány (pp. 36–50), Szerkesztő: Wéber 2000 Kft., Zalaszentlászló, 2015. 05. 20. – 2015. 05. 22.
- [7] Havasi István: Cséti Ottó – a magyar bányamérés ismert professzora. Bányászati és Kohászati Lapok (ISSN: 0522-3512) 149: (1) (pp. 6–10) (2016).

Kompetenciafejlesztési igények és megoldások a nyersanyagkutató mérnökképzés számára

Competence development gaps and solutions for mineral exploration engineering training

DR. MÁDAI FERENC, PhD, LL.M.
intézetigazgató egyetemi docens,
Miskolci Egyetem Ásványtani-Földtani Intézet



A Bolognai folyamat a kreditrendszer bevezetésével a 2000-es évek elején kezdődött, majd a többciklusú képzés 2005, illetve 2006 szeptemberben indult el az egyes alapszakokon, majd a mesterszakok 2010-ben indultak el. Ugyanakkor a Bolognai rendszerű képzés több fontos elemének kialakítása terén még mindig sok teendő van, leginkább ott, amelyek az oktatás finomhangolását teszik lehetővé. Ezek a kutatás és a gazdasági igények beépítése, valamint az a szemléletváltás, ami a hallgatóközpontú, tanulási eredményekre épülő oktatást hozza el a hagyományos oktatási módszerek helyett és mellett.

A tanulmány áttekintést ad a tanulási eredmény alapú („kompetencia-alapú”) oktatási szemléletről és az ipari elvárásokon alapuló kompetenciákról a nyersanyagkutató-kitermelő szektort érintő egyetemi képzések esetében és bemutat egy példát erre a TIMREX nyersanyagkutató nemzetközi közös képzésen keresztül.

The Bologna process has been started in early 2000s with the introduction of the credit system followed by the the two-cycle education starting in 2005 and 2006 for the BSc and in 2010 for the MSc programmes. However, some components of the Bologna-based education still need strong improvement, especially in issues which give the tools for the fine tuning of the training. These are the better involvement of research and needs of industry in the training as well as the change of mindset towards student-focussed education, based on learning outcomes instead or supplementing the conventional methodologies.

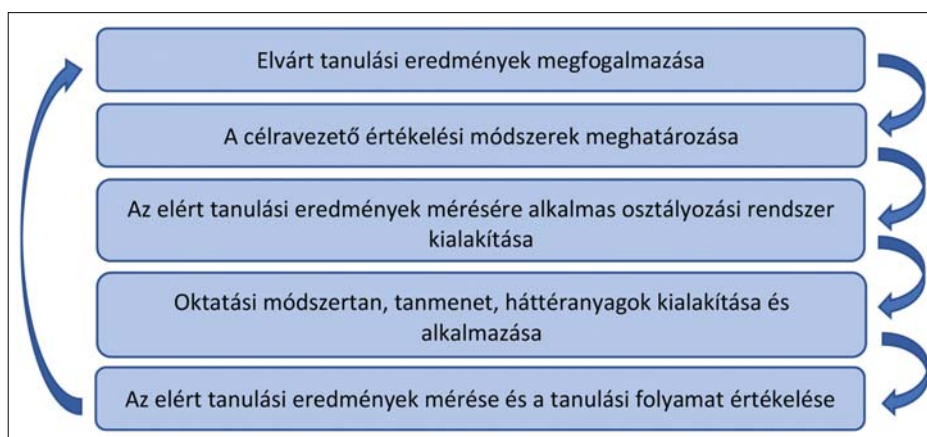
This study gives an overview about the learning outcome-based education requirements and industry-droven needs of competences for the mineral exploration and extraction sector and introduces an example for it through the TIMREX joint degree master programme.

Bevezetés, tanulási eredmény alapú szemlélet iránti igények és a megvalósításhoz vezető utak

Az Európai Felsőoktatási Térség (EHEA) oktatásának fő keretét 1999 óta a „bolognai rendszerű” képzés adja meg. Ennek leginkább szembevetendő tartalmi eleme a többciklusú képzés bevezetése volt, további jól ismert és alkalmazott elemei például a hallgatói és oktatói mobilitás segítése (pl. Erasmus+), kreditrendszer, ESG normákra alapozott minőségbiztosítási rendszer.

Ugyanakkor a Bolognai folyamatnak legalább ennyire fontos elemei az oktatás – gazdaság – kutatás három oldalának („tudásháromszög”) közelítése és a *tanulási eredményekre* (learning outcomes) felépített oktatás kialakítása és gyakorlati alkalmazása. Míg a kreditrendszer, többciklusú képzés vagy a mobilitás általános szervezeti-jogszabályi keret elemei, addig a tudásháromszög és a tanulási eredményeken alapuló oktatás működtetése az oktatók aktív hozzájárulásán, szemléletváltásán alapul.

A többciklusú képzés szerkezetének kialakítása és bevezetése a 2000-es években Európában megvalósult, de a tanulási eredményekre épülő, hallgató-központú oktatás kifejlődése ennél lényegesen lassabban történik. A Bologna folyamat megvalósításáról készült 2020-as jelentés [1] is megjegyzi, hogy a tanulási eredmény alapú hallgatói értékelés kialakítása „*a felsőoktatási intézmények számára egy hosszú tanulási folyamat az új szemlélet megértése és a tanulási eredmények megfelelő leírása érdekében*”. Ehhez egyrészt az *elvárt tanulási eredmények* pontos és mérhető megfogalmazása szükséges, másrészt az ezek eléréséhez alkalmas *oktatási módszerek kialakítása és alkalmazása*, harmadrészt az *elért tanulási eredmények* mérése és összevetése az elvárt tanulási eredményekkel. Az elvárt tanulási eredményeket egy képzési programhoz (például egy mesterszak) meg kell adni a program szintjén és erre építve meg kell adni a tantárgyak szintjén is. Ebből következően az elért tanulási eredmények – azaz a hallgató által meg-



1. ábra. A tanulási eredményekre épülő oktatás fő elemei

szerzett, birtokolt kompetenciák – is mérhetők a képzési program szintjén a képzés befejezésekor, valamint tantárgy szinten mérhetők a tárgy teljesítésénél. A tanulási eredményekre épülő oktatás folyamatát az 1. ábra szemlélteti.

Az elvárt tanulási eredményeket nemzeti szinten a Képesítési keretrendszer és részletekre bontva a Képzési és Kimeneti Követelmények (KKK) tartalmazzák. Az Európai Képesítési Keretrendszerre (EQF) épülő nemzeti képesítési keretrendszerek megszülettek a 2010-es években, így a magyar képesítési keretrendszer alapján újultak meg az alap- és mesterszakok képzési és kimeneti követelményei (KKK) 2015–16-ban. Ezek a KKK-k a képzési program szintű elvárt tanulási eredményeket tartalmazzák tudás, képesség, attitűd, valamint autonómia és felelősség kompetenciák terén (18/2016. (VIII. 5.) EMMI rendelet).

Egy képzési programon belül az elvárt tanulási eredményeket intézményi szinten a tantárgyleírások, oktatói szinten a tantárgyi programok adják az alapot a tárgy tematikájának, oktatási és számonkérési módszereinek kialakításához. E témához tartozó szakirodalom a Bloom Taxonómiát [2] ajánlja a tanulási eredmények pontos és mérhető megadásához.

A tanulási eredmény alapú oktatási programok kialakításához és fejlesztéséhez az EU több formában nyújt támogatást és háttérrel a felsőoktatási intézményeknek. Ilyenek az Erasmus+ program keretében elérhető kapacitásfejlesztő projektek, az Európai Egyetemek program vagy a Twinning projektek. Ezek közül több közvetlenül a nyersanyagsektorban érintett képzési programokra irányul és a Miskolci Egyetem is a megvalósítók között van (pl. IN4SOC, Circle LE, CircleTech). Ezek mellett az EIT, az Európai Innovációs és Technológiai Intézet kínál egy olyan képzési program fejlesztő rendszert az EIT Label minősítéssel, amit mindenképp érdemes megemlíteni.

A bányászati-nyersanyagkutatói szektorra vonatkoztatva az ipari elvárások és jövőben várható igények alapján az INTERMIN projekt (<https://interminproject.org/>) keretében dolgoztak ki egy

részletes szakmai képesítési keretrendszert. Ez a Horizont 2020-as projekt 2018–2020 között futott és első lépésben feltérképezte azokat a kompetencia (elvárt tanulási eredmény) hiányosságokat, amelyek a szektor szakképzésében globálisan jelentkeznek [3], majd a rendszer javításához ajánlott cselekvési tervet és egy szakmai képesítési keretrendszert [4]. Az ipari partnerek véleményére épülő jelentés szerint [3] a szakmai, technikai kompetenciák mellett nélkülözhetetlen a jövő szakembereinek jártassága a szociális, környezetvédelmi, fenntarthatósági témákban. Az INTERMIN projekt jelentései kiemelik a hallgatói képességek fejlesztését a kommunikáció, kreatív gondolkodás, problémamegoldó-készség, csapatmunkában való részvétel területén.

Szintén a gazdaság igényeiből kiindulva dolgozta ki az EIT azt a képzési követelményrendszerét, amelyet az egyes tagszervezeteiben („Tudás-Innováció Közösségek” – EIT KIC) támogatott oktatási programokban érvényesít. Az EIT az EU versenyképességéhez szükséges kiemelt fontosságú szakpolitikák – klíma, digitalizáció, élelmiszer, egészségügy, fenntartható energiaforrások, versenyképes gyártás, nyersanyagok, városi közlekedés, kultúra és kreativitás – megvalósítását innovációs és technológiai fejlesztésekkel segítő intézménye. Az EIT KIC-ek olyan közösségek, amelyek az egyetemek – kutatóintézetek – ipari partnerek „tudásháromszögön” belüli együttműködésére épülnek az innováció, fejlesztés, új vállalkozások beindítása és az ehhez illeszkedő szakképzés, oktatás területén. Ebből adódik, hogy az EIT célja a tudásháromszögek kialakításával egybevégez az a fontos bolognai céllal, amelyik a felsőoktatásban a kutatási eredményeket és a gazdaság igényeit integrálja az oktatási folyamatba.

Az EIT az általa támogatott oktatási programokra kialakította az *EIT Label minősítési rendszert*, ami az arra pályázó képzési programok számára egy önkéntes akkreditációs folyamat. Az EIT Label egy nemzetközi minőségi tanúsítvány olyan mester- vagy PhD-képzé-

si programok számára, amelyek eleget tesznek a következő feltételeknek:

- ❑ Korszerű, hallgató-központú képzési módszertant alkalmaz, amelyik a tanulási eredmények következetesen átgondolt, visszacsatolással működő rendszerére épül: az elvárt tanulási eredmények és a megvalósult tanulmányi eredmények (achieved learning outcomes) közötti összhang elérésére törekszik (aligned teaching).
- ❑ „T-alakú szakemberek” képzése: a végzett hallgatók a szakterületen alapos képzést kapnak és biztos tudással rendelkeznek, de ezen felül „átívelő kompetenciákkal” (Overarching Learning Outcomes – OLO) is, amelyek az innovációs és technológiafejlesztési feladatokban való közreműködéshez, szakmai integrálódáshoz szükségesek. Az EIT a Label követelményrendszerében hat OLO-t határoz meg: készség az innovációra, vállalkozói készségek, kreativitás, interkulturális készségek, értékítélet és érzékenység a fenntarthatóság felé, vezetői készségek.
- ❑ Nem egyetemi – ipari, kutatóintézeti – partnerek közvetlen bevonása az oktatásba legalább 15 kredit erejéig.
- ❑ Egyetemek közötti hallgatói mobilitás legalább 15 kredit erejéig.

Az EIT RawMaterials – mint az EIT azon tudás-innováció közössége (KIC), amelyik célja az EU nyersanyagpolitikájának megvalósításához szükséges innovációs, kutatási és képzési projektek gondozása és irányítása – keretében jelenleg hat EIT Label minősítéssel rendelkező közös mesterképzési program működik (<https://masters.eitrawmaterials.eu/>) és további három van bevezetési fázisban. Utóbbiak egyike a TIMREX program, amelyik célja egy EIT Label minősítéssel rendelkező nyersanyagkutató mérnök mesterképzés nemzetközi együttműködésben.

A TIMREX mesterképzési program

Az előzőekben vázolt oktatásfejlesztési törekvéseket a TIMREX képzési program példáján mutatjuk be, amelyik egyike az új EIT RawMaterials programoknak, melyek bevezetési fázisban vannak és az EIT Label minősítés elnyerésére pályáztak. A TIMREX fókuszában az innovatív nyersanyagkutató módszerek képzési programba integrálása áll és tartalmazza azon képzési elemeket és követelményeket, amelyek az EIT Label minősítés elnyeréséhez szükségesek.

A TIMREX elnevezés a „T-shaped Innovative Master Programme for Mineral Resource Exploration” névből képzett mozaikszó, amelyik több szempontot tükröz vissza a fentebb említett képzési elemekből. A képzés koncepciója és szerkezete az EIT RawMaterials pályázati felhívására válaszul született meg. Az EIT RawMaterials Oktatási Bizottsága 2020-ban felmérte az akkori Label-minősített mesterszakok képzési kínálatát és hiányolta a terepi munkára alapozó nyersanyagkutató szakember képzést. A felmérés az EU nyersanyagpolitikai céljaira és nyersanyagkutatói munkaerőpiacának elemzésére épült. A TIMREX program indokoltsága azóta csak nőtt a 2021-ben és 2022-ben történt politikai és gazdasági hatások – nyersanyag ellátási láncok átrendeződése a COVID alatt és után, ukrajnai háború (rövid elemzéseket lásd <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/>) – miatt, ami az EU-n belüli nyersanyagkutatás erősödését is igényli.

A TIMREX programmal szembeni elvárások az EIT irányából:

- ❑ Terepi munkára súlyozottan épülő, gyakorlatorientált képzés,
- ❑ Innovatív nyersanyagkutató módszerek és azok alkalmazása szervesen beépül a programba,
- ❑ Megfelel az EIT Label követelményeinek és megszerzi a minősítést,
- ❑ Legalább egy egyetemi partner a keleti EU tagországokban működik.



2. ábra. A hat átívelő tanulási kimenet az EIT Label kritériumok szerint

A konzorcium, amelyik elnyerte a kiírt pályázatot, a képzés piaci megalapozásánál a következő szempontokat emelte ki:

- Az EU nyersanyaggazdálkodását érintő, elfogadott szakpolitikák (Green Deal, klímavédelem, alkalmazkodás, energiastratégia...) teljesítéséhez az EU-n belüli nyersanyagvagyon intenzívebb használata szükséges, ami a jelenleginél intenzívebb nyersanyagkutatást igényel.
- A végzett hallgatók képesek legyenek a jövőben független földtani szakértőként dolgozni, akik a CRIRSCO elvárásokat is teljesíteni tudják, ezért ismerjék az EurGeol címet és legyenek alkalmasak ennek elnyerésére.
- A végzett hallgatók be tudjanak kapcsolódni a nyersanyagkutatási projektekbe, ehhez ismerjék az alkalmazott korszerű technikákat és eljárásokat.
- A végzett hallgatók kötődjenek az európai nyersanyagkutatás szempontjából kiemelt területekhez, mint Skandinávia és a kárpáti-balkáni régió.

A TIMREX az EIT RawMaterials oktatási projektjeként 2022 januárban indult, az EIT Label pályázat 2022. júliusban került benyújtásra az EIT-hez. A konzorciumot négy egyetemi partner és nyolc nem akadémiai partner alkotja és a projektet a Miskolci Egyetem vezeti. A négy egyetem mindegyike foglalkozik műszaki földtudományi képzéssel és rendelkezik olyan angol nyelven futó mesterszakkal, amelyik nyersanyagkutató – geológus, geofizikus – mérnököket, illetve szakembereket képez. A négy egyetemi partner: luleai Műszaki Egyetem Svédország, wroclawi Műszaki Egyetem Lengyelország, zágrábi Egyetem Bányászati-Földtani Kar (RGNF) Horvátország, Miskolci Egyetem. A hallgatók a képzést párhuzamosan a három kelet európai egyetemen – Miskolc, Wrocław, Zágráb – egyikén kezdenek, majd specializációtól függően folytathatják valamelyik partner intézményében. A TIMREX-képzésben a hallgatók az intézményi mobilitás révén kettős diplomát fognak kapni. A két

tanév közötti nyáron a hallgatók részt vesznek a luleai Műszaki Egyetem speciális, egyhetes nyersanyagkutató terepgyakorlatán, valamint nyári szakmai gyakorlatot teljesítenek.

A képzésben a tudásháromszög megvalósítása, azaz az ipari és kutatóintézeti partnerek részvétele a képzési folyamatban kiemelt feladat. A nyolc nem akadémiai partner olyan kutatóintézetet, illetve ipari vállalatot képvisel, akik több ponton aktívan hozzájárulnak a képzés megvalósításához és ezáltal az átfogó tanulási eredmények (OLO-k) teljesítéséhez. A nem akadémiai partnerek döntően olyan, horizontális oktatási egységek megvalósításában vesznek részt, amelyek minden hallgatóra vonatkoznak. A European Federation of Geologists (EFG) tatja az Exploration of Entrepreneurship tárgyat, amelyik az EFG mentor programjára épül és a hallgatókat hozzásegíti ahhoz, hogy később vállalkozásban, EurGeol (vagy ezzel egyenértékű) cím birtokában végezzék munkájukat. A tárgy keretében a hallgatók gyakorló ipari szakemberektől kapnak képzést és mentorálást.

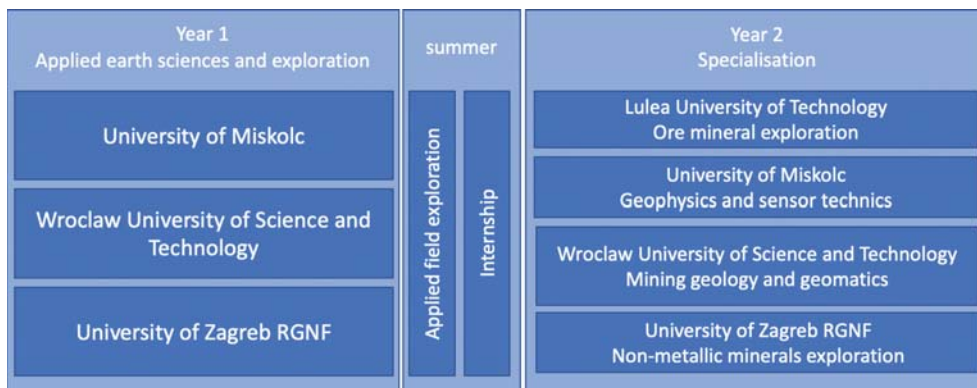
A kutatóintézetek – INESC TEC, UGR, Cuprum, GeoZS – aktív innovációs és kutatási technológia-, illetve módszerfejlesztési tevékenységet folytatnak és komoly kutatási infrastruktúrával rendelkeznek. A hallgatók önálló kutatómunkát, illetve diplomatervet készíthetnek a kutatóintézeti partnerek közreműködésével olyan területeken, mint a robotizált technológiák alkalmazása, tenger alatti nyersanyagkutatás.

Az ipari partnerek – Boliden Minerals, Geogold Kárpátia – a terepi programokhoz, diplomatervek készítéséhez járulnak hozzá. A diplomafélév része egy speciális kisebb gyakorlat (SOC internship), amelyik a hallgatók szociális és társadalmi kompetenciáit erősíti.

A tanterv ezzel a szerkezettel mindegyik OLO-kompetenciát kellő részletességgel lefedi és teljesíti az EIT Label minősítés összetett elvárásait.

Tanulási eredmény (kompetencia-) listák összehasonlítása

A TIMREX projekt egyik munkacsomagjának részeként készült el egy kompetencia lista, amelyik a



3. ábra. A TIMREX-képzés szerkezete és specializációi

nyersanyagkutató mesterszakos végzetek számba vehető kompetencia kívánalmait sorolja fel több nemzetközi forrás alapján. A lista elkészítéséhez [5] korábbi projektek – INTERMIN, MOBI-US – és publikációk elemzését használtuk fel, melyek minden esetben ipari partnerek véleményét tükrözik. Az összesített lista 170 kompetenciát sorol fel, melyeket öt csoportba lehet besorolni:

1. Üzletvezetés és vállalkozás – 30 felsorolt kompetencia, amelyek a nyersanyagkutatáshoz releváns gazdasági, vállalkozói ismeretekre, készségekre irányulnak.
2. Adatgyűjtés és feldolgozás – 18 kompetencia, melyek a korszerű nyersanyagkutatási módszerek alkalmazása során keletkező nagymennyiségű és komplex adathalmazok kezelésére vonatkoznak.
3. Nyersanyagkutatáshoz alkalmazott kapcsolódó technológiák és eljárások – 16 kompetencia a korszerű nyersanyagkutatáshoz interdiszciplinárisan kapcsolódó technológiák és módszerek (pl. gépi tanulás, robotika, automatizálás, virtuális valóság) felsorolásával.
4. Nyersanyagkutatáshoz alkalmazott technikai megoldások – 29 kompetencia, amelyek az innovatív nyersanyagkutatási technikákhoz kapcsolódnak.
5. Társadalmi kihívások és teljesítmény – 73 kompetencia, melyek jelentős része attitűdjellegű. Ez a csoport tartalmazza a legtöbb felsorolt kompetenciát, ami talán túl hosszú, minden esetre kellőképpen hangsúlyozza azt, hogy a nyersanyagkutató szakemberek számos olyan készséggel kell rendelkezzenek, amelyekre a sikeres munkavégzéshez és a partnerekkel való kapcsolattartáshoz, megállapodáshoz van szükség.

A TIMREX projektben összeállított lista (továbbiakban „TIMREX lista”) az általánosan elvárt alapos szaktudáson és készségeken túl felmerülő kompetenciákat és kompetencia területeket célozta meg, mivel a projekt egyik kiemelt célja az EIT Label minősítéshez kapcsolódó kompetencia területek fejlesztése. Ezért a lista a hat *átívelő tanulási eredmény* (OLO) megvalósításához szükséges kompetenciákat tartalmazza (2. ábra), de a lista összeállítása a nyersanyagok szektor ipari partnereinek véleményét, ajánlásait tükrözi.

A TIMREX kompetencia listát összevetettük a magyar földtudományi mérnöki mesterszak képzési és kimeneti követelményeiben (KKK) szereplő kompetenciákkal (továbbiakban „KKK lista”). A mesterszak kompetenciái (KKK lista) a KKK 2015–16-os felülvizsgálata és megújítása során (18/2016. (VIII. 5.) EMMI rendelet) születtek meg a jelenlegi formában és a felülvizsgálati folyamat által elvárt szerkezetben és szempontok szerint készült el. A KKK-leírásokban

a kompetenciákat a magyar képesítési keretrendszer (HuQF) [6] előírásainak megfelelően négy csoportba sorolták: tudás, képesség, attitűd, valamint autonómia és felelősség. Utóbbi kettő tartalmaz olyan fontos kompetenciákat – döntően szociális és társadalmi –, melyeket nem az egyes tantárgyak keretében lehet fejleszteni, vagy ezek fejlesztése újszerű oktatási módszereket igényel.

A két kompetencia lista összevetése azt eredményezte, hogy a TIMREX listában szereplő kompetenciák közel felét a földtudományi mérnöki mesterszak kompetenciái lefedik, és jól meghatározhatók azok a kompetenciák, melyek fejlesztésén érdemes, szükséges dolgozni.

Üzletvezetés és vállalkozás

Az első csoport – üzletvezetés és vállalkozás – főleg a gazdasági és vállalkozási ismeretek és készségek irányában mutat fejlesztési igényeket. Ez az EIT Label OLO-k közül az innovatív, vállalkozási, vezetői készségek (OLO 1, 2, 6) kompetenciáit erősíti.

Az első csoport kompetenciáinak mintegy felét fedik le a földtudományi mérnöki mesterszak releváns kompetenciái, melyek közül több kiemeli az innovációs és vezetői készségeket.

Amit a TIMREX lista ennél a csoportnál többlet kompetencia igényként tartalmaz, az a vállalkozási készség és fejlett közgazdasági ismeretek oldalán jelentkezik. A vállalkozási készségek fejlesztése új igényként jelentkezett a mérnökképzésben az elmúlt években. Ez még nem merült fel igényelt kompetenciaként a KKK felülvizsgálatának idején (2015–16) és most is újdonságnak számít, habár már több tananyag, kompetenciafejlesztő segédanyag érhető el nemzetközi szinten.

A fejlett közgazdasági ismeretek, mint üzleti elemzési technikák ismerete, pénzügyi kimutatások értelmezése, olyan területek, melyeket a gazdasági és menedzsment tárgyak tartalmának felülvizsgálatával lehet kezelni. A vállalkozási készségek fejlesztéséhez az utóbbi években kiépült egyetemi programokat, támogató rendszert kell aktívan használni, mint a Miskolci Egyetem Technológia és Tudástranszfer Igazgatóság által működtetett programok (Start ME U, Légy Te is Innovátor!), valamint a ProSkill projekt (<https://proskillproject.eu/>) eredményeként megszületett fejlesztő MOOC tartalmak.

A vállalkozási készségek fejlesztéséhez szükséges a szellemi tulajdonjogok terén szerzett ismeret is, melyet szintén fontos beépíteni a képzési programba.

A TIMREX lista egy kiemelten fontos kompetenciát említ még ebben az első csoportban, amelyik egy földtudományi mérnöknek szükséges: a társadalmi felelősségvállalás és a nyersanyagok szektor társadalmi elfogadottságának problémái. Ennek hiánya a nyers-

1. táblázat. Az első csoportban kiemelt, fejlesztendő kompetenciák – Üzletvezetés és vállalkozás

Elemzi a piacot, hogy előre jelezze a jövőbeli keresleti/kínálati trendeket, és felismeri az új üzleti lehetőségeket, és ezeket a lehetőségeket új termékekké és szolgáltatásokká fejleszti
Érti a vállalkozás alapjait, értékteremtést, ötletgenerálást, lehetőségeket, számvitelt, pénzügyeket, technológiát, marketinget, kockázatot (pénzügyi műveltség)
Mélyen ismeri a „Social License to Operate” témát, valamint a legjobb környezetvédelmi és társadalmi gyakorlatok megvalósítását
Vállalkozás létrehozásának és működtetésének ismerete. Megérti az induló vállalkozás életciklusát és fázisait a kezdeti ötlettől a megszilárdult cégig
A szellemi tulajdonjogokkal kapcsolatos ismeretek
Üzleti elemzési technikákat ismer és képes alkalmazni (pl. 6 szigma, LEAN folyamatok)
Megérti a nyersanyagár-ingadozások fontosságát és ennek hatásait a nyersanyagprojekt üzletmenetére

anyagkutató és bányászati projekteknél könnyen veszélyeztetheti a megvalósítást, ezért a megoldásokhoz vezető ismeretek mesterszakon végzett mérnökök számára kiemelten fontos.

Adatgyűjtés és feldolgozás

Ez a csoport azért került elkülönítve a listára, mert a nagyméretű és többdimenziós adathalmazok előállítás, kezelése és komplex feldolgozása terén igen jelentős fejlődés történt az utóbbi évtizedben. A GIS alkalmazások, 3D modellezés, programozási készségek a legfontosabb kompetenciák közé kerültek a földtudo-

mányi mérnök mesterképzésben. A mesterszak képzési program szintű kompetenciái ebben a csoportban jól lefedik a TIMREX lista által megjelölt kompetenciákat, de a tananyagfejlesztéshez, pontosításához jó háttérrel nyújt. A kiemelt, pontosítandó kompetenciákat a következő táblázat összegzi:

Nyersanyagkutatáshoz alkalmazott kapcsolódó technológiák és eljárások

A harmadik csoport is olyan kompetenciákat tartalmaz, amelyek az utóbbi évtized innovatív nyersanyagkutató technológiáit jellemzik és multidiszciplináris

2. táblázat. A második csoportban kiemelt, fejlesztendő kompetenciák – adatgyűjtés és feldolgozás

Képes Big Data és nagy adathalmazok kezelésére és elemzésére, több, különböző típusú és különböző tudományágakból származó nagy adatkészletek integrálására
Ismeri a fejlett/prediktív adatelemzési, digital twinning és szimulációs modellezési technikákat
Korlátozott adatokkal előrejelzéseket és problémamegoldásokat készít
Érti a valós idejű adatelemzést és képes ilyen elemzéseket végezni
Ismeri a neurális hálózatok szerepét az adatfeldolgozási, elemzési technikákban

3. táblázat. Az ötödik csoportban kiemelt, fejlesztendő kompetenciák – társadalmi kihívások és teljesítmény

Ismeri a korszerű mélyfúrás technológiákat és ezek alkalmazását új környezetekben
Képes szenzorokat használni adatgyűjtésre
Ismeri a robotika, az automatizálás, a távolról irányítható berendezések és a mesterséges intelligencia eredményeit
Ismeri a kiterjesztett és a virtuális valóságot (augmented and virtual reality) és ezek alkalmazását a nyersanyagkutatásban
Ismeri a Blockchain technológiát és annak alkalmazási lehetőségeit
Ismeri a mély tanulás és a gépi tanulás alapjait
Mechatronikai ismeretekkel rendelkezik
Kvantumszámítási ismeretekkel rendelkezik

módon egészítik ki, döntően az adatnyerés, adatelemzés, értelmezés területén. Ebben a csoportban speciális ismeretek, kompetenciák szerepelnek, melyeket a Földtudományi mérnök KKK alapvetően nem említ. A csoporthoz társítható, KKK-ban megjelölt kompetencia: alkalmazói szinten ismeri a számítógépes tervezés és elemzés térinformatikai módszereit és a geoinformatikai rendszereket.

A TIMREX lista ebben a csoportban a következő speciális kompetenciákat sorolja fel:

E kompetenciák többsége olyan, melyeket speciálisan a diplomamunka készítéshez, illetve szakmai gyakorlat, vagy egyéni kutatómunka során szerezhethet meg a hallgató. A korszerű mélyfúrási technológiák ismerete és a szenzorok alkalmazása az adatgyűjtés során két olyan téma, amelyeket a képzés törzsanyagába kell beilleszteni.

Nyersanyagkutatáshoz alkalmazott technikai megoldások

Ezen a téren is komoly fejlődés történt, mint például a drónokra szerelhető szenzorokkal történő adatnyerés, hordozható terepi analitikai eszközök alkalmazása (hordozható XRF, LIBS), hiperspektrális kamerák alkalmazása a fűrőmagok, feltárások felmérésében és kiértékelésében. Ebben a csoportban a TIMREX listában felsorolt kompetenciák többsége – 29-ből 17 – le van fedve a földtudományi mérnök KKK kompetenciáival. A TIMREX lista ugyanakkor jó támpontot ad a képzési program, tananyagok fejlesztéséhez.

A drón alapú adatnyerési eljárások, IoT (internet on things) eszközökkel történő adatszerzés az utóbbi években váltak elterjedté, így ezek a KKK-ban még nincsenek említve, de ezek beépítése a képzési programba igen indokolt.

A felsorolt kompetenciák egy része speciális területekre irányul, mint a vízalatti – felszín alatti elárasztott térségek, vagy mélytengeri – nyersanyagku-

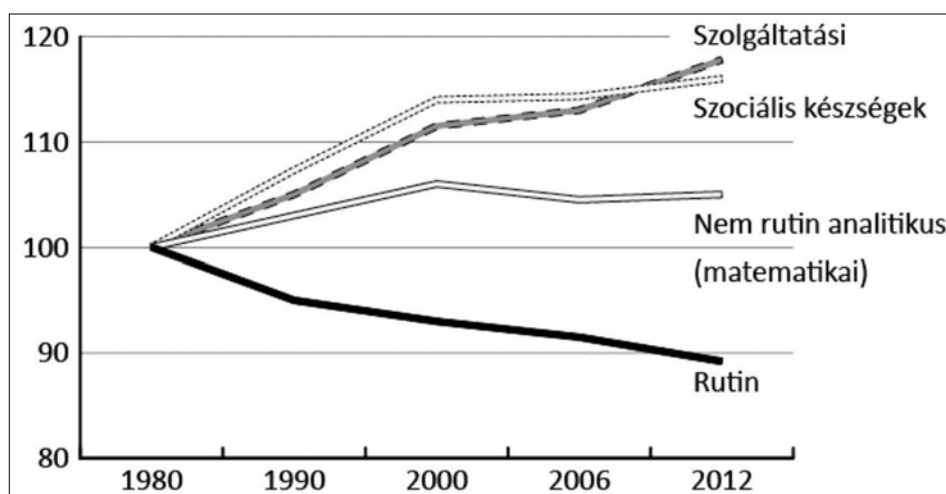
tatási módszerek, vagy a biotechnológiai módszerek, melyeket személyre szabottan diplomamunka, egyéni hallgatói kutatómunka keretében lehet fejleszteni.

A TIMREX lista rávilágított a KKK lista két fontos hiányosságára: egyrészt a kémiai analitikai módszerek és mintavételi technikák ismerete és alkalmazása a földtani kutatás során, másrészt az ásványvagyon osztályozási rendszerek ismerete. A földtudományi mérnök mesterszak tananyagban mindkettő kellő részletességgel szerepel, de a KKK listáról hiányoznak.

Társadalmi kihívások és teljesítmény

A TIMREX lista ötödik csoportjában 73 kompetencia van megjelölve. Ezek döntő többsége nem-kognitív készség, melyek fejlesztése a képzési program során nem köthető egy-egy tantárgy tematikájához, hanem megfelelő korszerű oktatási módszerekkel, a tanulási eredményekre épülő, hallgatóközpontú oktatással fejleszthető. A TIMREX lista hosszúsága ebben a csoportban értehető, mivel a nem-kognitív készségeket a munkáltatók egyre inkább elvárják az alkalmazottaktól. Az elmúlt évtizedben ezen a téren jelentős átalakulás történt a fejlett országok munkareópiacán [7]. Ennek oka, hogy folyamatosan növekedett és nő a nem-kognitív, érzelmi-szociális készségeket igénylő és szolgáltatásokhoz kapcsolódó munkafeladatok aránya, míg folyamatosan csökkent az automatizálható, rutin-jellegű feladatok aránya és kezdetben enyhén nőtt, majd stagnált a kognitív, műszaki-természettudományi (STEM) ismereteket igénylő munkafolyamatok iránti igény [8].

A nyersanyagszektor tekintetében a fejlett szociális készségekkel rendelkező szakemberek iránti igény az ipari partnerek véleményére alapuló TIMREX listából egyértelműen kitűnik. Az EIT OLO-k fele – interkulturális, vezetői készségek, fenntarthatóság iránti érzékenység (OLO 4, 5, 6) – is ezek fejlesztésére irányul.



4. ábra. Munkafeladatok jellegének változása az USA gazdaságában 1980–2012 között [8]

4. táblázat. Az ötödik csoportban kiemelt, fejlesztendő kompetenciák – társadalmi kihívások és teljesítmény

Képes interaktív párbeszéd folytatására
Képes problémák megoldására egyértelmű válaszok hiányában is
Képes különböző személyiségekkel, nézőpontokkal, szakterületekkel, iskolai végzettségű és képességű személyekkel való együttműködésre, beleértve azokat is, akiket nem szeret
Képes elemző gondolkodásra
Kreatív gondolkodású
Képes konfliktusok megoldására
Tud kommunikálni és tárgyalni a befektetőkkel, és a helyi közösség képviselőivel
Tud kommunikálni és tárgyalni szakhatóságok képviselőivel
Képes hálózatépítésre és másokkal tárgyalni
Stressztűrő képességgel rendelkezik, képes problémákat feszült helyzetekben kezelni
Rendelkezik interkulturális érzékenységgel különböző társadalmi, etnikai, nemzetiségi csoportok és személyekkel való kapcsolataik során

A földtudományi mérnök mesterszak képzési programjának átgondoltságát, korszerűségét mutatja, hogy a KKK-ban meghatározott kompetenciák a TIMREX lista közel felét lefedik. Ugyanakkor ezen készségek továbbfejlesztése a jövőben szükséges.

A következő táblázat azon kompetenciákat sorolja fel, melyek fejlesztése kiemelt fontosságú.

Összefoglalás

A TIMREX projekt során összeállított részletes kompetencia lista és a földtudományi mérnök mesterszak program szintű tanulmányi kimeneteinek összehasonlító elemzése azt mutatja, hogy a mesterszak kompetencia követelményei egy korszerű nyersanyagkutató mérnöki mesterszagnak megfelelőek. A 2015-ben készült mesterszacos kompetencia lista ugyanakkor több ponton fejlesztést igényel. A fejlesztési irányok közül szakmailag legfontosabb a geoinformatikai, adatfeldolgozási és adatkezelési, értékelési kompetenciák fejlesztése és ezek tananyagba illesztése döntően gyakorlati és terepi feladatokhoz kötve.

A másik fejlesztésre javasolt terület a szociális és gazdasági készségekre irányul. Ezek segítenek a hallgatóknak, hogy a szakmai tevékenységüket szakszolgáltatást nyújtó vállalkozóként, szabadúszó földtani szakértőként végezzék, vagy könnyen beilleszkedjenek egy kutatással foglalkozó cégbe. A szociális és társadalmi kompetenciák különösen szükségesek a szakmában a nyersanyagsektor társadalmi elfogadottságának növeléséhez.

Mindegyik fejlesztendő területhez előnyösen járul hozzá, hogy a földtudományi mérnöki mesterszak beilleszkedik a TIMREX nemzetközi közös képzési programba.

IRODALOM

- [1] European Commission/EACEA/Eurydice (2020): The European Higher Education Area in 2020: Bologna Process Implementation Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [2] Bloom, B. S. (1956): Taxonomy of Educational Objectives, Handbook: The Cognitive Domain. David McKay, New York.
- [3] Martins M. C., Bodo B. (2019): Report on skills gaps. (INTERMIN Deliverable 2.1). <https://interminproject.org/wp-content/uploads/DELIVERABLE-2.1-REPORT-ON-SKILL-GAPS.pdf>
- [4] Correia V., Sánchez A., Fernandez I. (2019): International Qualification Framework for the raw materials sector. (INTERMIN Deliverable 3.1). <https://interminproject.org/wp-content/uploads/DELIVERABLE-3.1-INTERNATIONAL-QUALIFICATION-FRAMEWORK-FOR-THE-RAW-MATERIALS-SECTOR.pdf>
- [5] Lopez L. (2022): TIMREX: Strategic implementation of innovation and entrepreneurship. TIMREX D4.1 in prep.
- [6] Derényi András – Vámos Ágnes (2015): A felsőoktatás képzési területeinek kimeneti leírása – ajánlások. Oktatási Hivatal, Budapest. <http://www.mrk.hu/wpcontent/uploads/2015/06/Kimeneti-leirasok-BELIV-FUZETNYOMDA.pdf>
- [7] Fazekas K. (2018): Nem-kognitív készségek hiánya a munkaerőpiacon. Magyar Tudomány 179(2018)1, 24–36
- [8] Deming D. J. (2015): The Growing Importance of Social Skills in the Labor Market. (NBER Working Paper Series, 21473), <http://www.nber.org/papers/w21473>

Városi bányászat: fókuszban az elektronikai hulladékok

Urban mining: waste electrical and electronic equipment in focus

DR. NAGY SÁNDOR

Miskolci Egyetem, Nyersanyag-előkészítési
és Környezeti Eljárástechnikai Intézet

A Miskolci Egyetem Nyersanyag-előkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézete már több jelentős projekt és ipari megbízás keretén belül foglalkozott elektronikai hulladékok feldolgozásával, előkészítési technológia kidolgozásával. Ebben a cikkben ismertetésre kerülnek a jelentős számban, és különböző területeken alkalmazott elektronikai eszközök felépítésével, és – első sorban – mechanikai előkészítésével kapcsolatos eredmények, lehetőségek. A vizsgálatok kiterjedtek a Li-ion akkumulátorokra, LED (Light-Emitting Diode) fényforrásokra, autó elektronikákra és számítógép alkatrésze (Solid State Drive (SSD) meghajtók).

Institute of Raw Material Preparation and Environmental Processing at the University of Miskolc investigated during the last years the topic of electronic waste processing, and developed technologies for preparation of these wastes in the frame of relevant projects and industrial assignments. In this paper the results and possibilities of electrical and electronic equipment investigations are introduced, focusing their structure and mechanical processing. Investigations includes Li-ion batteries, LEDs, vehicle electronics and computer parts (SSD).

Bevezetés

Elektronikai hulladékok fajtái és mennyiségei

A 20-as évekre hatalmasra nőtt a megtermelt hulladékok mennyisége. Világviszonylatban az évente keletkező elektronikai hulladékok mennyisége meghaladja az 50 millió tonnát [Web5]. A növekedés okai az egyre többféle elektronikai eszköz megjelenése (pl. akkumulátoros változatok megjelenése); az eszközök világviszonylatban egyre több emberhez történő eljutása; az eszközök élettartamának csökkenése; valamint a technológiák gyors változása. Utóbbira jó példa, amikor egy jelentős sportesemény előtt sokan lecserélték hagyományos – még tökéletesen működő – TV-jüket a minden tekintetben korszerűbb LCD TV-re, így téve élvezetesebbé a közvetítések megtekintését.

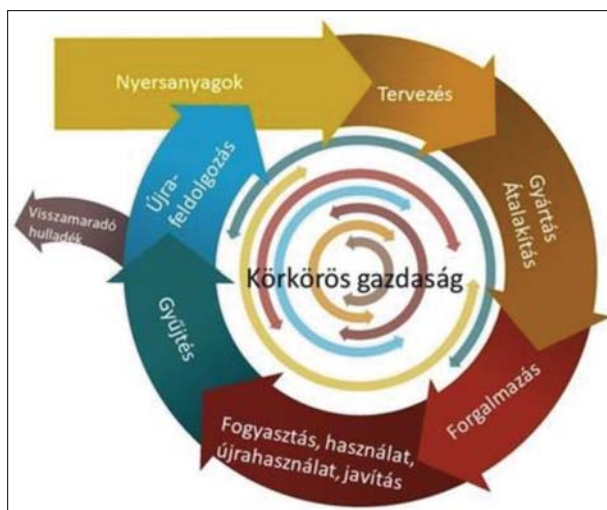
Jól megfigyelhető tendencia továbbá, hogy egyre több eszközben jelennek meg nyomtatott áramkörök, LCD kijelzők (pl. okos hűtő) és akkumulátorok (pl. akkumulátoros porszívó, ventilátor, forrasztópáka). Jellemző a gépjárművek (élettartamuk végére ért, sérült, vagy meghibásodott gépjárművek) esetén is megjelenő különféle elektronikai hulladékok, úgy, mint számítógépek (NyÁK-ok), szenzorok, Li-ion akkumulátorok, LCD kijelzők (személygépkocsik műszerei, autóbuszok, vasúti járművek kijelzői, reklámfelületei), LED fényforrások. Ezek a tendenciák – a kategóriák közti átfedések - nehezítik az egyes hulladék áramok elkülönített módon történő begyűjtését.

A hatályos EEB kategóriák a következő hat termékkör szerint csoportosíthatók:

- ❑ Hőcserélő berendezések (pl. hűtő- és fagyasztógép, légkondicionáló, hőszivattyú),
- ❑ Képernyők, monitorok és 100 cm²-nél nagyobb képernyőt tartalmazó berendezések,
- ❑ Lámpák (pl. fénycsővek, kompakt fénycsővek, LED lámpák, stb.),
- ❑ Nagygépek (bármely külső méret meghaladja az 50 cm-t),
- ❑ Kisgépek (egyik külső méretük sem haladja meg az 50 cm-t),
- ❑ Kisméretű számítástechnikai berendezések és távközlési berendezések (egyik külső méretük sem haladja meg az 50 cm-t).

Körforgásos gazdaság

EU környezetvédelmi és gazdaságpolitikájának egyik legfontosabb célkitűzése a körforgásos gazdaság irányába történő elmozdulás. A körforgásos gazdasági modellben minden nem megújuló anyag zárt körben kering. A körforgásos gazdaság termelési és fogyasztási modellje arra épül, hogy egyszeri fogyasztás helyett a termékek élettartamát a lehető legjobban meghosszabbítsuk. Erre alkalmas módszer lehet, ha vásárlás helyett kölcsönzünk, a már megvásárolt termékeknek pedig „második esélyt” adunk azzal, hogy megjavítjuk, átalakítjuk, esetleg továbbadjuk őket. Amikor az adott termék eléri az életciklusa végét, akkor a szerkezeti anyagokat újra lehet hasznosítani. Így csökken a hulladék mennyisége, ráadásul az alapanyagok és késztermékek újbóli felhasználása gazdaságilag is értéktéremtő [Web3].



1. ábra. Körforgásos gazdaság modellje [Web1]



2. ábra. Lineáris gazdaság modellje [Web1]

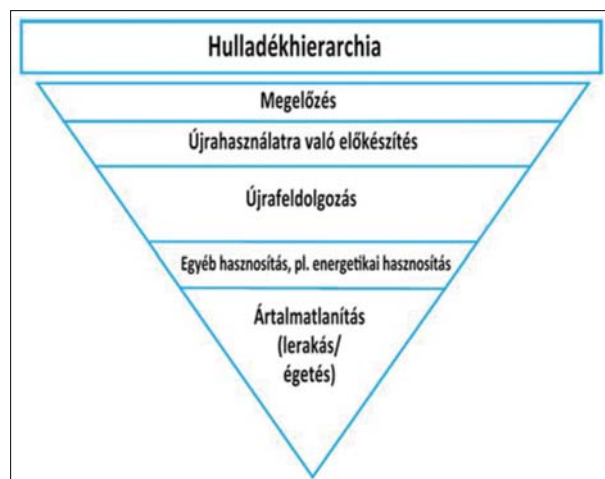
Ezzel szemben a hagyományos lineáris gazdasági modell egyszeri fogyasztással számol. Emiatt a termékek olcsó, könnyen hozzáférhető alapanyagokból készülnek, az alacsonyabb minőségük miatt pedig nem is olyan tartósak [Web1, Web2, Web3]. Természetesen az elmúlt évtizedekben is jelentős törekvések voltak már az újrahasznosítás tekintetében, mind gazdasági, környezetvédelmi ill. jogi megfontolásokból.

Kritikus elemek

A fémek, ásványi anyagok és természetes anyagok mindennapi életünk részét képezik. A kiemelkedő gazdasági jelentőségű és az ellátás szempontjából magas kockázatot jelentő nyersanyagokat kritikus fon-

1. táblázat. Kritikus fontosságú nyersanyagok (2020 évi állapot) [Web4]
(A 2017. évi listához képest új anyagok vastag betűvel szedve)

A kritikus fontosságú nyersanyagok 2020. évi listája		
antimon	hafnium	foszfor
barit	nehéz ritkaföldfémek	szkandium
berillium	könnyű ritkaföldfémek	szilíciumfém
bizmut	indium	tantál
borát	magnézium	volfrám
kobalt	természetes grafit	vanádium
kokszosítható szén	természetes gumi	bauxit
folypát	nióbium	lítium
gallium	platinacsoportba tartozó fémek	títán
germánium	nyersfoszfát	stroncium



3. ábra. Hulladékhierarchia

tosságú nyersanyagoknak nevezzük. E nyersanyagok nélkülözhetetlenek számtalan ipari ökoszisztéma működéséhez és integritásához: például a mobil-telefonok rezgő hívásjeléhez volfrám kell, a fénykibocsátó diódás (LED) technológiához galliumra és indiumra van szükség, a félvezetőkben szilíciumfémeket használnak, a hidrogén-cellák és az elektrolizátorok platina-csoportba tartozó fémeket tartalmaznak [Web4].

Az egyes nyersanyagok kritikus fontosságának meghatározásához használt két fő paraméter a gazdasági jelentőség és az ellátási kockázat. A gazdasági jelentőség megállapításához azt vizsgálják részletesen, hogy a nyersanyagok mely ipari alkalmazásokon alapuló végfelhasználásokhoz rendelkeznek hozzá. Az ellátási kockázattal kapcsolatban pedig az a mérvado, hogy az elsődleges nyersanyagok globális termelése és az EU beszerzési forrásai egy-egy országban összpontosulnak-e, és ezeknek az országoknak milyen a politikai irányítása, de ide-tartoznak a környezetvédelmi szempontok is, az újrafeldolgozás (azaz a má-



4. ábra. Aprítás és szétválasztás kapcsolata

sodlagos nyersanyagok) részaránya, a helyettesíthetőség, az EU importfüggősége, valamint a harmadik országokkal szemben alkalmazott kereskedelmi korlátozások is [Web4].

Szemben a 2011-es listát alkotó 14 anyaggal, a 2014-es lista tárgyát képező 20 anyaggal, illetve a 2017-es listán szereplő 27 anyaggal, a 2020-as uniós lista 30 anyagot tartalmaz. Ezek közül 26 eddig is szerepelt a listán. A bauxit, a lítium, a titán és a stroncium most került fel rá [Web4].

A kritikus stratégiai elemek hazai nyersanyagforrásokból történő előállítására alapvetően három út kínálkozik:

- 1) egyrészt a primer érces ásványelőfordulások anyagának bányászati kitermelése, előkészítése és kohászati feldolgozása;

- 2) másrészt az érces ásványok bányászati meddőinek kitermelése, előkészítése és kohászati feldolgozása, valamint a szemek kitermelése és energetikai hasznosítása maradékanyagai és melléktermékeiből történő kinyerése;
- 3) harmadrészt a lakossági és ipari célra gyártott és elhasznált elektronikai eszközök alkatrészeiben, szerkezeti anyagokban rejlő kritikus elemek kinyerése – városi bányászat [1].

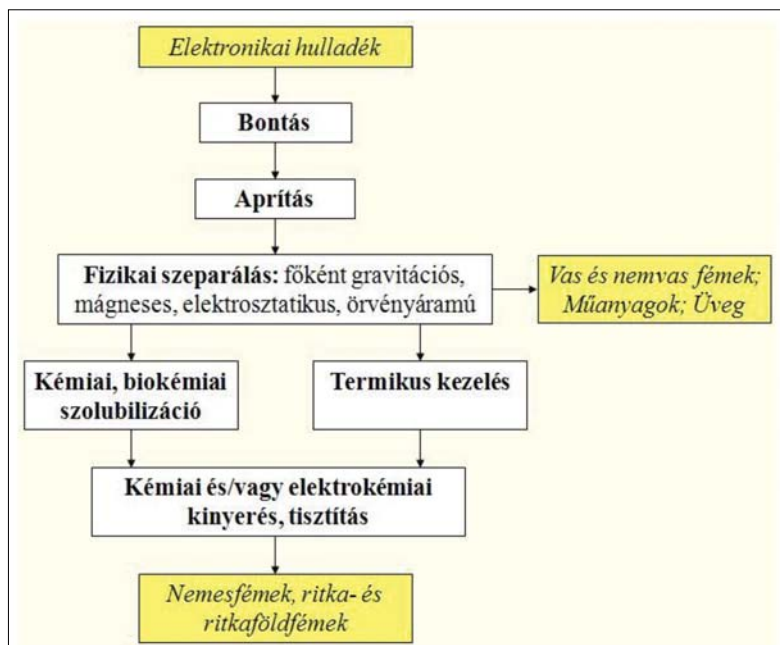
Jelen munka az újonnan nagy számban megjelenő elektronikai hulladékok témakörével foglalkozik, kiemelten azokkal, melyek több hulladékáramban is megtalálhatók. Az elektronikai hulladékok előkészítésének a Miskolci Egyetem Nyersanyag-előkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében jelentős hagyománya van, számos ipari megbízás, projekt és diplomamunka fókuszált és fókuszál e témakörre [1–5, 7–12, 14].

Mechanikai előkészítés jelentősége

A mechanikai eljárások (szétszerelés, aprítás, osztályozás-szítálás, szétválasztás-szeparálás) célja, a hulladékok szemcséinek szétválasztása olyan szerkezeti anyagokra, összetevőkre, amelyek részben közvetlenül újrahasznosíthatók, ill. lehetőség teremtése arra, hogy kémiai, esetleg biológiai eljárások alkalmazásával az alkotó anyagok (elemek) közvetlenül vagy vegyület formájában visszanyerhetők legyenek [2, 5].

Az aprítás ill. szétválasztás általános sémáját a 4. ábra mutatja, melynek során az aprítást követően a szerkezeti anyagok (esetleg alkatrészek) feltárt állapotba kerülnek, alkalmassá válnak a különböző fizikai tulajdonságok eltérésén alapuló szétválasztásra.

Amíg a színesfémek leggyakrabban vastagabb rétegekben (nagyobb méretben) fordulnak elő, addig a nemesfémeket vékonyabb rétegekben találjuk, a kritikus elemek (és részben a nemesfémek) pedig rendszerint ötvözetalkotók (vagy hintetten beépülnek az alapanyagba). Ebből következően, amíg a színesfémek aprítást követően fizikai szeparálás útján is jórészt visszanyerhetők, addig a nemesfémek és a kritikus elemek, már csak kémiai (és/vagy biokémiai) úton tárhatók fel és választhatók le (5. ábra) [1].



5. ábra. Elektronikai hulladékok előkészítésének általános törzsfája



6. ábra. Főbb Li-ion akkumulátor alkalmazási területek (elektromos autó, kéziszerszám, mobiltelefon)

A további fejezetekben néhány kiemelt, napjainkban fontos alkatrész, ill. eszköz előkészítésének kérdéseiről lesz szó, alapvetően a Nyersanyag-előkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet vizsgálataira alapozva.

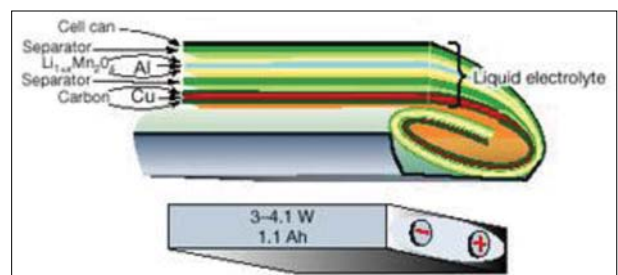
Li-ion akkumulátorok

A Li-ion akkumulátorok (6. ábra) terjedése töretlen, azonban a hulladékká vált akkumulátorok feldolgozására azonban számottevő kapacitás még nem áll rendelkezésre.

Feldolgozandó akkumulátorok nem csak az eszköz élettartamának végén keletkeznek (pl. autó élet tartamának vége), hanem az akkumulátorok sérülése, ill. meghibásodása esetén is. Bizonyos nagyobb méretű akkumulátorok, melyek kapacitása lecsökken, más alkalmazásra kerülhetnek (pl. energiatárolás épületekben). Kisebb méretű akkumulátorok esetén probléma, hogy egy részük a lakosságnál reked (pl. eltárolt korábbi mobiltelefonok), ill. más részük lerakókon véggezheti (pl. készülékekbe beépített akkumulátor). A jelen kihívása a már forgalomban lévő, ill. forgalomba kerülő – különféle méretű és összetételű – Li-ion akkumulátorok későbbi feldolgozási lehetőségeinek kialakítása.

Az intézet több oldalról is vizsgálja a feldolgozási lehetőségeket. Vizsgálatokat folytattunk mobiltelefonból, laptopból és személygépkocsiból származó (kis teljesítményű akkumulátor hibrid járműből ill. akkumulátor elektromos autóból) akkumulátorok felépítését ill. mechanikai és akár bioeljárástechnikai előkészítését illetően.

A Li-ion akkumulátorok kémiai összetétele jelentős eltérést mutat a különböző típusok tekintetében, a főbb fajták: Lítium-kobalt-dioxid (LiCoO_2), Lítium-mangán-oxid (LiMn_2O_4), Lítium-nikkel-mangán-kobalt-oxid (LiNiMnCoO_2 vagy NMC), Lítium-nikkel-kobalt-alumínium-oxid (LiNiCoAlO_2 vagy NCA), Lítium-titán ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), Lítium-vas-foszfát (LiFePO_4). Felépítésük többféle lehet, a főbb alkatrészek a következők (7. ábra):



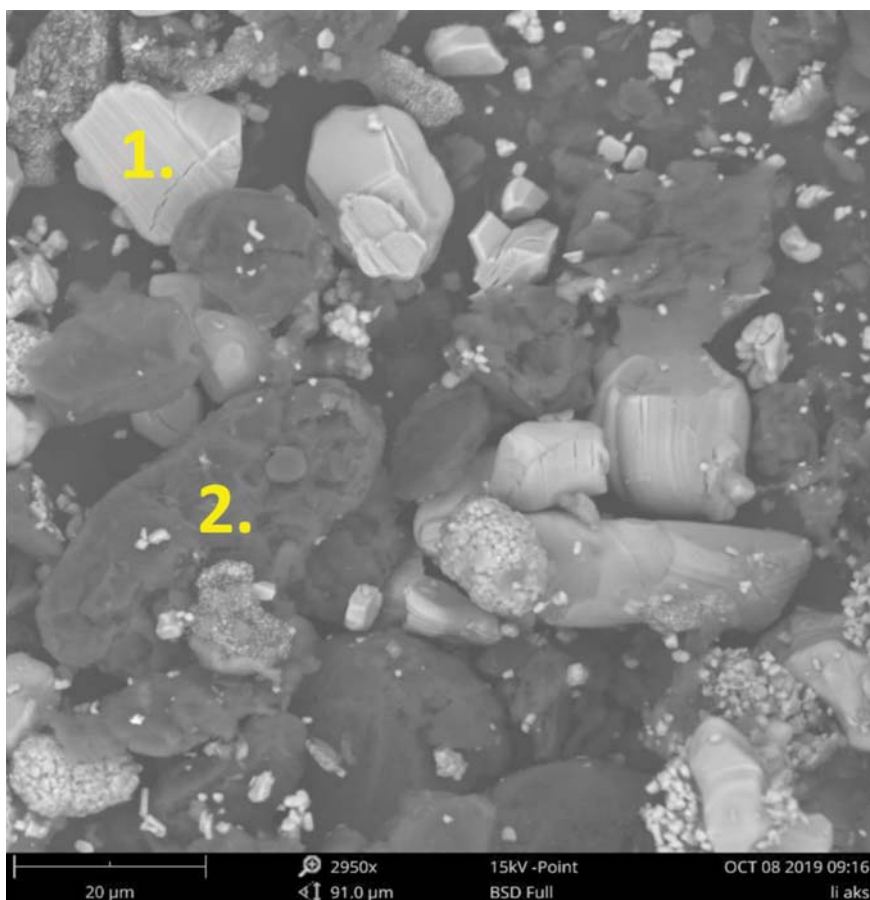
7. ábra. Li-ion akkumulátor felépítése (példa) [6]



8. ábra. Szétbontott mobiltelefon-akkumulátor: anód- és katódtekercek (b), ház és black mass bevonat (j) [7]

- ❑ katód (alumínium gyűjtőfólia és lítium-fémoxid fő alkotójú bevonat),
- ❑ szeparátor film: PE/PP fólia,
- ❑ anód (réz gyűjtőfólia, grafit fő alkotójú bevonat),
- ❑ elektrolit (szerves oldószer, sók, adalékok),
- ❑ burkolat, ház (alumínium, fóliák, csatlakozók, keret, elektronika, hűtőrendszer stb.)

A mobiltelefonokból származó akkumulátorok (24 db-os minta, 8. ábra) esetén a következő folyamat szerint jártunk el: sóoldatban történő kisütés 24 órán át; aprítás kalapácsos törővel (20 mm-es szitabetéttel), durva frakció (>0,5 mm) szeparálása légáramkészülékkel és elektrodinamikus szeparátorral; értékes fémeket tartalmazó finom frakció (<0,5 mm) további – nem mechanikai – feldolgozása. SEM-vizsgálatot végeztünk a <0,5 mm-es frakción (black mass anyaga), mikroszondás mérés alapján (9. ábra) a katód világosabb szemcsék jelentős kobalt tartalommal bírtak (61,4%), az anód sötétebb szemcsék 86,8%-ban szenet tartalmaztak [7].



9. ábra. 0,5 mm alatti szemcsék SEM-vizsgálata [7]

A gépkocsiból származó akkumulátorok is igen eltérőek lehetnek, a 10. ábra két jellemző példát mutat: hibrid gépkocsiból származó, kis kapacitású akkumulátor rozsdamentes, oldhatatlan kötással lezárt elektromos autóból származó, kibontott akkumulátor cella vékony alu-



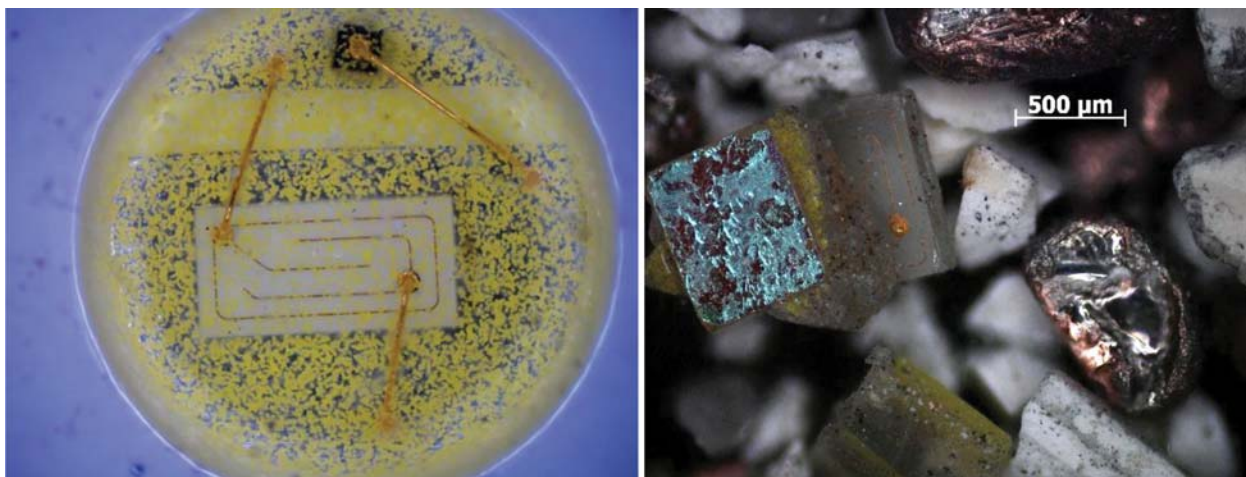
10. ábra. Hibrid személyautó kis teljesítményű Li-ion akkumulátora (j), elektromos jármű Li-ion akkumulátor cellája (Fotó: Pataki Gábor) (b)

mínium házban (mindkét mintát az Auto Mandy Car Kft. partnerünktől kaptuk). Utóbbinak a gépi aprítását elvégeztük forgótárcsás nyíró aprító berendezésben.

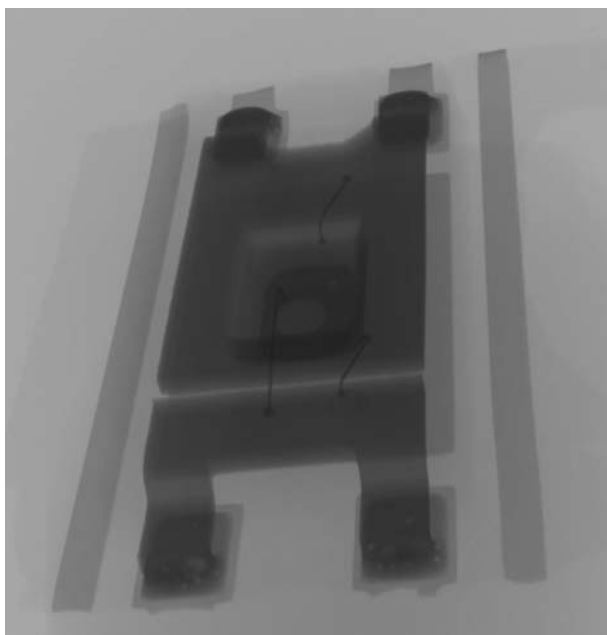
A Li-ion akkumulátorok esetén is kiemelt szerepet bír a mechanikai előkészítés, legtöbb technológiának ez az első része, ezt követi a hidrometallurgiai feldolgozás. Speciális igény az akkumulátorok kisütése az aprítás előtt. Az aprítás nedves és száraz módon is történhet (pl. védőgáz közegben) a kigyulladás elkerülése érdekében, továbbá a veszélyes anyagokat tartalmazó elektrolit eltávolítását is meg kell oldani. Az aprítás fő szerepe a legértékesebb anyagokat tartalmazó black mass feltárása (egyfajta szelektív szemcseméret csökkentés), annak érdekében, hogy az szemcseméret szerint leválasztásra tudjon kerülni.

LED fényforrások

A LED-ek térnyerése töretlen, legtöbb helyen már velük találkozunk, mint fényforrás. Az otthonokban, munkahelyeken, közvilágítás esetén, gépkocsik első és hátsó fényszóróikban (sok autótípus már csak LED világitással érhető el), kijelzők háttérvilágitásaként (LCD LED TV-k és monitorok), és hordozható fényforrásokban gyakran Li-ion akkumulátorokról táplálva. E kis méretű világitótestek számos értékes elemet tartalmaznak (pl. kritikus elemek, arany), viszont a LED-ek kis mérete, ill. a kis koncentrációk miatt, valamint a számtalan területen meglévő jelenlétük miatt (valósággal diszpergált formában vannak jelen a világban) begyűjtésük és hasznosításuk jelentős, meg



11 ábra. LCD héttérvilágítás LED mikroszkóp alatt (a) és aprítást követően a feltárt alkatrészek (b) [8, 9]. A LED-ek felépítésének pontosabb megértése érdekében CT-vizsgálatot végeztünk rajtuk (3D Laboratórium, Miskolci Egyetem, XYLON FF35 Dual CT, FeinFocus 190 kV nanofocus röntgenszó). Az így készült felvételeken az alkatrész fém részeinek elhelyezkedése, és geometriai kiterjedése határozható meg (12. ábra) [10]



12. ábra. Samsung LED CT-felvétele [10]

nem oldott kihívás. Az intézetünkben vizsgálatokba vontuk az LCD kijelzők héttérvilágitásait és személygépkocsik első ill. hátsó lámpáiból származó LED-jeit. Előbbiekből 60–80 db található a készülékekben, egy LED tömege kb. 0,02 g. A LED chip (téglalap alakú, zafír tömb alapú alkatrész gyantával beágyazva, a 11b. ábra közepén) tartalmazza a kritikus elemek nagyrészét (gallium és indium) félvezető formában, a zafír tömb felületén vékony rétegben. A gyantában is számos egyéb kritikus elemet mértünk minimális koncentrációban. A chipre a feszültség színarany szálakon jut el [8, 9].

A mechanikai eljárások a következő lépésekből álltak: panelről történő LED-eltávolítás, aprítás, vezetőképesség szerinti szeparálás a réz kinyerése érdekében, sűrűség szerinti szeparálás (LED chip. ill. műanyag szétválasztása). Ezek eredménye a 2. táblázatban látható, minden elem esetén, ami a chipben található legalább két nagyságrendű dúsítást értünk el, és a réztartalmat gyakorlatilag leválasztottuk.

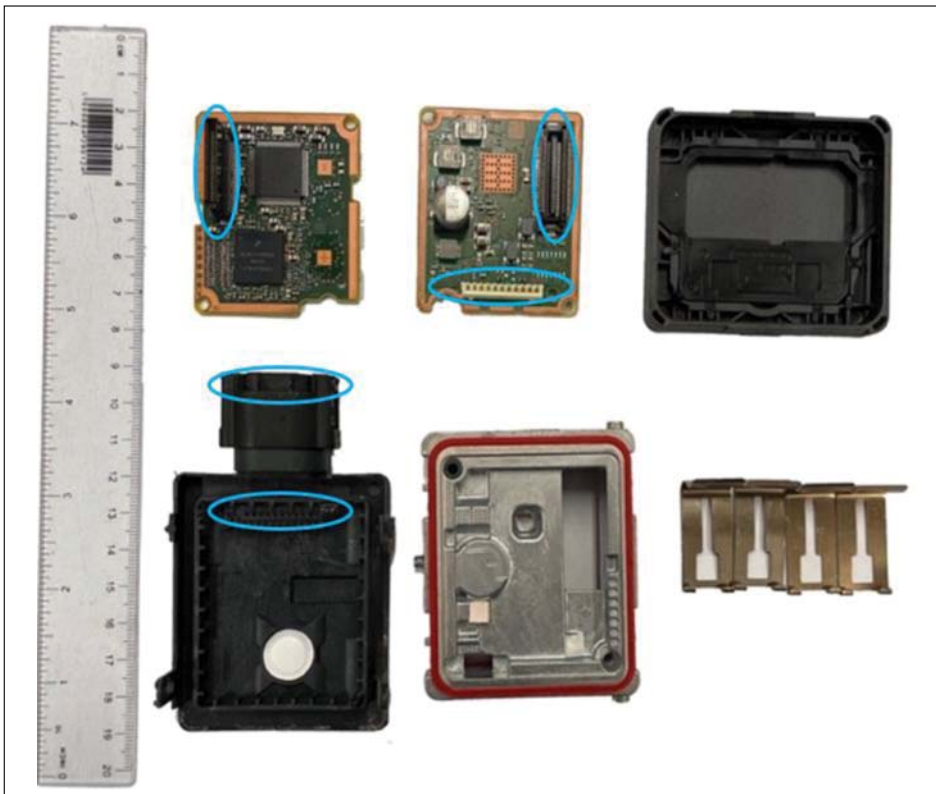
2. táblázat. LED-ek mechanikai előkészítésének (chipkinyerése) eredménye [8, 9]

LED háttérvilágítás (panelről eltávolított LED-ek)				LED háttérvilágítás chip (aprítást követően a nem vezető, nehéz termék)			
Elem	c_i [mg/kg]	Elem	c_i [mg/kg]	Elem	c_i [mg/kg]	Elem	c_i [mg/kg]
Au	167	Cu	545 000	Au	30 400	Cu	40
Ga	184	In	0,3	Ga	19 000	In	244

Mechano-kémiai és termikus kezelésekkel az értékes elemek további dúsítását tudtuk elérni [11].

Gépjármű-elektronikák: ACC (Adaptive Cruise Control)

A gépjárművekben napjainkban kifejezetten sok elektronikai és azokhoz tartozó vezérlés (számítógép) található. E cikkben a távolságtartó radar szenzor (13. ábra) előzetes vizsgálata kerül ismertetésre, melyet az Auto Mandy Car Kft. partnerünk bocsátott a rendelkezésünkre.



13. ábra. ACC egység személygépkocsiból [12]

3. táblázat. ACC részegységek tömege és aranytartalma

Részegység	Tömeg, m_i [g]	Aranytartalom, c_i [g/t]
műanyag burkolatok	53,94	50,4
alumíniumház	107,89	
NyÁK-lapok	35,89	81,3
Fémkapcsok	8,80	
Összesen	206,52	27,3

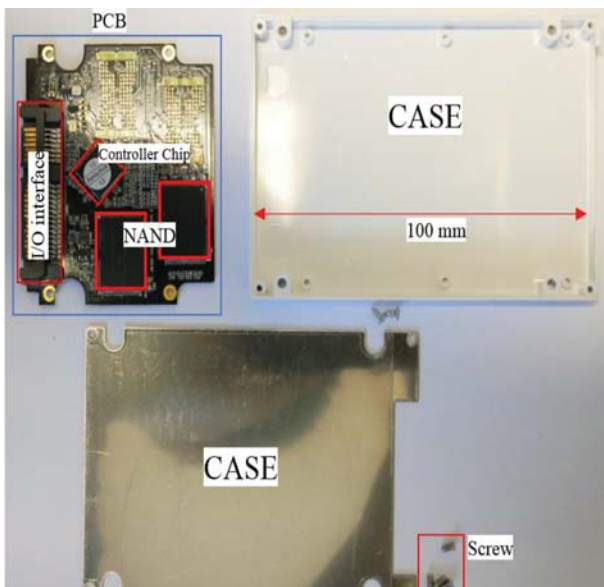
Az ACC-ben a csatlakozók túlnyomórészt vékony aranybevonatot. Az részegységek tömegét ill. aranytartalmát mutatja a 3. táblázat.

A mechanikai előkészítés során röplítő törővel végeztük a szemcseméret-csökkentést, ez kíméletesen, gyakorlatilag alkatrészekre bontotta az ACC-t. Ezt követően osztályozással, örvényáramú és mágneses szeparátorral különítettük el a részegységeket, ill. szerkezeti anyagokat (így az arany tartalmú csatlakozókat) [12].

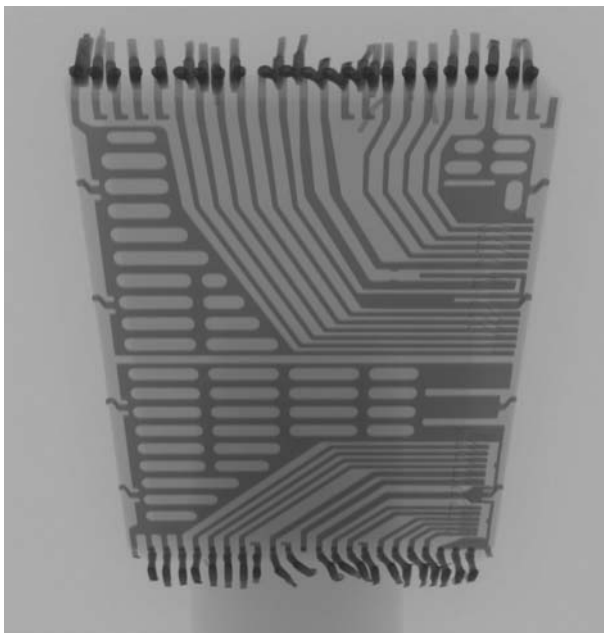
Számítógép-alkatrész: SSD

A Solid State Drive (SSD) adattárolók NAND flashmemóriát tartalmazó egységek, amiket a késői 2000-es években mutattak be. Számos előnnyel rendelkezik, nagy feldolgozási sebesség, tartósság, ill. kedvező energiafogyasztás, ezért fokozatosan egyre nagyobb teret nyer. Statista [13] szerint 2018 második negyedévében már 47,8 millió egységet értékesítettek világviszonylatban. Az SSD-k nem tartalmaznak mozgó, ill. forgó alkatrészeket, viszonylag egyszerű felépítésűek (14. ábra):

- Input/Output Interface or I/O interface: csatlakozó, amely összeköti a betápot és adatokat az SSD-hez (típusai: SATA, PCIe, és SAS);
- Kontroller: az SSD minden funkcióját kezeli;



14. ábra. SSD meghajtó komponensei [14]



15. ábra. SSD NAND-ról készült CT-felvétel [10]

- Flash Memory: ebben tárolják az adatokat, leggyakrabban NAND típusú;
- NyÁK: nyomtatott áramkör, melyre a fenti három alkatrész típust szerelik.

Jól alkalmazható volt a CT-vizsgálat az SSD NAND esetén (15. ábra), amelyen makroszkópicusan mindössze a fekete ház látható, míg a CT-felvételen a teljes belső fémszerkezet megfigyelhető [10].

Két SSD átlagos összetételét mutatja a 4. táblázat (Kingston A400 and Goodram CX400).

Aranyat mutattunk ki a PIN-eken, és a NyÁK-on. Kíméletes aprítással az alkatrészek elkülöníthetők egymástól (akárcsak az ACC esetén, és mechanikai úton az aranytartalmú egységek kinyerhetők, dúsíthatók a 4 mm alatti frakcióban (PIN-ek).

Összefoglalás, főbb kihívások

E nyersanyagokból az értékes alkotó kinyerése három fázisból áll: 1) az elhasznált készülékek szelektív begyűjtése, ami a nyersanyagforrást biztosítja; 2) a nyers elektronikai hulladék előkészítése – az értékes alkotók dús koncentrátumokba vitele – mechanikai és kémiai/biológiai eljárásokkal; 3) és végül a kapott koncentrátumokból kohászati úton a tiszta fémek kinyerése [1]. Sok esetben azonban jelentős kihívásokkal szembesülünk, ill. szembesülnek a hulladékfeldolgozó cégek. A fent bemutatott példák esetében is látható, hogy azonos típusú eszközök, különböző anyagáramokban jelennek meg: az ACC elektronikai hulladék típusú eszköz, ami a roncsautó anyagáramban jelenik meg, és azzal a technológiával az értékes részek nem, vagy csak rossz határfokkal nyerhetők ki, ellenben a műanyag hányad, melléktermék aránya jelentős. Jelentős problémát jelentenek az értékes elemek rendkívül kis koncentrációi a hulladékokban (néhány g/t). E hightech eszközök összetett szerkezetek, sok esetben vékony rétegek, bevonatok formájában vannak jelen az értékes elemek, ami a mechanikai előkészítést, dúsítást követően további eljárásokat igényel. A külön-

4. táblázat. SSD alkatrészek [14]

Részegység	Tömeg, m_i [g]	Tömeghányad, [%]
Ház	26,0648	70,60
Controller Chip	0,1933	0,52
NAND Chip	1,1052	2,99
Arany PIN	0,2519	0,68
I/O interface	1,2634	3,42
NyÁK	7,4474	20,25
Egyéb	0,5654	1,53
Összesen	36,8914	100,00

böző elemekből alkalmazott mennyiségek csökkennek a gyártási technológiák fejlődésével (több termék, kisebb koncentráció). Megnehezíti a tervezést a technológia váltások, ill. az esetlegesen előforduló elem kiváltások (pl. Li-ion akkumulátor esetén számos kutatás irányul az értékes elemek kiváltására); valamint a kinyerni kívánt alkotók, elemek tőzsdei árának jelentős ingadozása.

A körforgásos gazdaság szellemében a fent leírt problémák enyhíthetők, azonban ehhez szükséges már a termékek bevezetésekor, gyártásakor kidolgozni a hulladékok begyűjtésének rendszerét, és feldolgozásának technológiáját.

Köszönetnyilvánítás

A tématerületi kutatás a Miskolci Egyetem „Társadalmi hasznosság növelő fejlesztések a hazai felszín alatti természeti erőforrások hatékonyabb kiaknázása és hasznosítása területén” című, az Innovációs és Technológia Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kibocsátott támogatói okirat (Támogatói Okirat ikt. száma: TKP-17-1/PALY-2020) alapján zajló projektje részeként valósult meg.

IRODALOM

- [1] Csőke Barnabás, Fajtli József, Nagy Sándor, Mádainé Üveges Valéria, Magyar Tamás (2013): Kritikus elemek a másodnyersanyag-forrásokban, elektronikai hulladékokban: Critical elements in secondary raw material resources, in electronic wastes. *Bányászati és Kohászati Lapok – Bányászat* 146:5–6 pp. 48–57., 10 p.
 - [2] Bokányi Lj., Varga T., Mádai-Üveges V., Paulovics J. (2011): Bioprocessing research in institute of Raw Material Preparation and Environmental Processing. University of Miskolc, Proceedings of the 2nd International Conference on Biotechnology and Metals, pp. 5–8.
 - [3] Bokányi L., Hornyák G., Nagy S., Mádainé Üveges V. (2020): Li-ion akkumulátor bioszolubilizálásának vizsgálata A. ferrooxidans és A. ferridurans baktériummal. In: Fajtli József (szerk.) Proceedings of the Miskolc IPW-IV. Sustainable raw materials international project week. Miskolc-Egyetemváros, Magyarország: Institute of Raw Material Preparation and Process Engineering, University of Miskolc, Paper: B81, 7 p.
 - [4] Mádainé Üveges Valéria, Bokányi Ljudmilla (2020): Fémek kinyerése elektronikai hulladékokból bioszolubilizációval. *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat* 153:2020/4 pp. 35–41., 7 p.
 - [5] Csőke B., Böhm J., Márkus Zs., Ferencz K., Török E. (2008): Processing of Used Small Electronic Household Appliances. Proceedings of XXIV. International Mineral Processing Congress, ISBN: 978-7-03-022711-9, Beijing. Vol. 3, pp. 3529–3539.
 - [6] Tarascon J. M., Armand M. (2001): Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature* 414, 359–367. <https://doi.org/10.1038/35104644>
 - [7] Orosz Kinga Andrea, Romenda Roland Róbert, Mádainé Üveges Valéria, Nagy Sándor (2019): Mobiltelefonokból származó lítium-ion akkumulátorok felépítésének és apríthatóságának vizsgálata. In: Czupy Imre (szerk.) III. Ring – Fenntartható Nyersanyag-Gazdálkodás – III. Sustainable Raw Materials Konferenciakötet – Proceedings Sopron, Magyarország: Soproni Egyetem Kiadó 310 p. pp. 203–209., 7 p.
 - [8] Nagy Sándor, Pólya Imre, Zajzon Norbert (2014): Gallium in the light emission diodes: What leads a LED? In: Földessy J. (szerk.) Basic research of the strategic raw materials in Hungary. Miskolc, Magyarország: Milagrossa Kft. 159 p. pp. 96–100., 5 p.
 - [9] Pólya Imre Mátyás (2015): LCD LED kijelzők háttérvilágításában található kritikus elemek dúsítása mechanikai úton. Diplomamunka. ME, NyKE Intézet. Konzulens: Nagy Sándor.
 - [10] Mádainé Üveges V., Bokányi L., Papp R. Z., Szamosi Z., Romenda R. R., Nagy S. (2020): Valuable Elements in Waste Electrical & Electronic Equipment (Weee) and Their Possible Recovery Methods Introduction. *Geosciences and Engineering: A Publication of University of Miskolc* 8:12, pp. 71–83., 13 p.
 - [11] Nagy S., Bokányi L., Gombkötő I., Magyar T. (2017): Recycling of Gallium from End-of-Life Light Emitting Diodes. *Archives of Metallurgy and Materials* 62:2 pp. 1161–1166., 6 p.
 - [12] Gyűrök Barbara (2021): Investigation of mechanical processing options for end of life driving assistant systems in order to yield the valuable material components. Diplomamunka, Miskolci Egyetem, NyKE Intézet. Konzulensek: Nagy Sándor, Romenda Roland.
 - [13] Statista (2019): Solid State Drive (SSD) Shipments Worldwide from 2013–2018, by quarter (in million units).
 - [14] Faisal Fadhil Muhammad, Nagy Sándor, Romenda Roland Róbert, Papp Richárd Zoltán (2019): Recycling Possibility of End of Life Solid State Drive (SSD). In: Rákhely Gábor, Hodúr Cecilia (szerk.) II. Sustainable Raw Materials Conference Book – International Project Week and Scientific Conference. Szeged, Magyarország: University of Szeged, 312 p. pp. 10–18., 9 p.
- [Web1] HOSZ, <https://www.hosz.org/korforgas>
- [Web2] <http://www.bayzoltan.hu/hu/korforgasos-gazdasag/>
- [Web3] Európai Parlament (<https://www.europarl.europa.eu/portal/hu>): Körforgásos gazdaság: mit jelent, miért fontos és mi a haszna? Gazdaság. Frissítve: 2022.4.22. 14:24
- [Web4] Document 52020DC0474; Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of the Regions Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards Greater Security and Sustainability; COM/2020/474 final
- [Web5] Ian Tiseo: Global e-waste generation 2010–2019, (Oct 4, 2022), <https://www.statista.com/statistics/499891/projection-ewaste-generation-worldwide/>

Ásványokkal a klímaharcban – rövid áttekintés és példák

Minerals in the climate struggle – short review and examples

DR. KRISTÁLY FERENC, PhD

tudományos főmunkatárs

Miskolci Egyetem, Ásványtani-Földtani Intézet

E-mail: askkf@uni-miskolc.hu

A környezetvédelemben alkalmazott ásványi anyagok és azok termékei fontos alapját képezik a klímaváltozással járó problémák kezelésében. A több évtizede használt anyagok és megoldások mellett mindig jelennek meg új alkalmazási lehetőségek, anyag típus-szükségletek, ezért hasznos lehet időnként áttekinteni a vonatkozó nemzetközi fejleményeket a hazai nyersanyagok szempontjából is.

Mineral raw materials and their products applied in environmental protection have a substantial role in the mitigation of problems arising from climate change. Beyond materials and solutions employed since a few decades, there are always emerging new possibilities, needs, thus a periodical review of the relevant international developments with a view of local raw materials is useful.

Bevezetés

Az éghajlati viszonyok, környezeti adottságok és azok változása mindig is rányomta bélyegét az emberi civilizáció fejlődésére.

Mezőgazdasági munkálatok során a talajok állapotának és termőképességének serkentésére hosszabb ideje, hogy az emberiség alkalmaz ásványi anyagokat.

A jelenleg zajló klímaváltozás összetett módon érinti civilizációnkat, az extrém hőmérséklet ingadozásokon át a csapadékmennyiség és annak eloszlásának durva változásaival az ivóvízkészleteket, talajvizet, de még a levegő minőségét is jelentős mértékben rontja. Az ipari emissziók mellett a szántóföldek és kiszáradó gyér növényzetű területek nagy mennyiségű lebegő részecskét bocsáthatnak a légkörbe a kiporzás során, amit csak talajjavítással lehet megelőzni [1].

A klímaváltozás okozta problémák elsősorban a levegő – talaj – vízrendszer egyensúlyát bontják meg, így kézenfekvő, hogy ezen rendszer esetében tud az emberiség beavatkozni, hogy a negatív hatásokat csökkentse (<http://climate.org/>). Hogy az beavatkozások mennyire hatásosak, pozitívak és előre mutatóak, jelen tanulmánynak nem célja ezt a problémakört tárgyalni. Azonban kis túlzással megállapítható, hogy a több évtizede folyó vagy folyamatban lévő beavatkozások napjainkban egyre égetőbbé válnak, klímaharcá változnak, mivel a negatív hatások globális civilizációs krízis felé sodorják az emberiséget.

A nemzetközi szabályozások és nyilvántartások az IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/>) területe, így a folya-

matok és kapcsolódó jelenségek nomenklatúrája is itt keresendő.

Az általánosságban ismert ásványi anyagok, amelyek környezeti beavatkozásokkal kapcsolatban szélesebb körben ismer a közvélemény, az agyagok, zeolitok, mészkő – és az utóbbi másfél évtizedben elért CO₂-besajtolás és ásványi megkötés sikerei által, a bazalt.

Fontos kiemelni, hogy számos olyan anyagot is alkalmazunk a környezetvédelem és remediáció során, amelyek ugyan ásványi ekvivalensek, de a hatásfok növeléséhez vagy éppenséggel a reakciók kiváltásához szintetikus formában szükséges előállítani. Nagyon gyakran a nanotartományú (<100 nm) szemcse- és kristálméret, a növelendő fajlagos felület vagy helyettesítő elemek bevitel (dópolás) szükséges egy környezeti alkalmazású ásványi anyag előállításánál.

Levegővédelem

Ipari emissziók

A szilárd ipari emissziók leválasztásánál kevésbé, de tárolásánál, ártalmatlanításánál és felhasználásánál annál inkább szerephez jutnak ásványok, ásványi nyersanyagok.

A gáznemű ipari emissziók közül, amelyek esetében ásványi anyagok alkalmasak lehetnek a problémák csökkentésére, legnagyobb mértékű a kibocsátás a CO₂ esetében, de a veszélyesebb anyagok a SO₂, SO₃, N₂O, NO₂ és halogén gázok, főleg F és Cl is nagymértékű lehet bizonyos esetekben.

Mivel a gáznemű emissziók nem mindegyike semlegesíthető egyszerre, így a toxicitás és egyéb negatív

hatások szerint mérlegelni kell, milyen lépéseket teszünk meg elsőnek. A SO_2 -emisszió semlegesítése létfontosságú, így legtöbbször a hagyományosan CaCO_3 , ultrafinomra őrölt mészkő szuszpenziójával üzemelő FGD reaktorokat alkalmazzák. A reakciók során pedig további CO_2 -emisszió keletkezik, viszont a savas esők és a kihullásból keletkező talajszulfátosodás megakadályozható. A SO_2 -megkötés hatásfokát növelni lehet Mg jelenlétével, pl. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ szuszpenziójának befecskendezésével majd Ca/Mg hidroxid keverékbe való bevitelével, amely a $\text{Mg}(\text{HSO}_3)$ gyors keletkezése által növeli a Ca-szulfát képződését. A $\text{Mg}(\text{OH})_2$ alkalmazásának további előnye, hogy regeneratív rendszert hoz létre, a Ca-szulfát keletkezése során visszanyerhető a $\text{Mg}(\text{OH})_2$, ezáltal is csökkentve a költségeket és hulladék- (másodnyersanyag-) képződést [2].

A kéngázmegkötési folyamatok hozadéka, hogy a széntüzelésű erőművek esetében erősen mérgező elemeket (pl. Hg és Pb, [3]) és vegyületeket is le lehet választani a szilárd reakciótermékbe. Másrészt, kritikus elemek kinyerése is lehetséges, többek között a Se egyidejű leválasztása a SO_2 -dal, Ca-hidroxidos eljárással [4].

A hagyományos karbonát- és hidrátalapú kénleválasztás mellett a zeolitok alkalmazása is egyre nagyobb teret nyer, mivel nincs környezeti karbonterhelés a reakciók során. A klinoptilolit mint leggyakoribb ásványi zeolit természetes formájában is alkalmas a SO_2 adszorpciójára, de kationcserélt termékei még jobban teljesítenek [5].

CO₂-megkötés és -tárolás

A dekarbonizáció mint fogalom a zéróhoz közelítő fosszilis karbonemisszió (CO_2) elérésének a folyamata, elvileg globális törekvés a karbonsemleges energiatermelés, az ipar és közlekedés megteremtéséhez. A CO_2 -kibocsátás csökkentése mellett egyre inkább a légköri CO_2 kivonása és tárolása, elnyeletése, megkötése is része a klímabeavatkozásoknak. Az ugyancsak több évtizedre visszanyúló kutatásoknak köszönhetően általánosan ismert az Izlandon üzemeltetett földtani CO_2 -elnyelető rendszer. Ez a geológiai CO_2 -tárolás területe, amelyet olyan földtani formációkban lehet megvalósítani, ahol a magas porozitás és permeabilitás mellett (pl. kimerült szénhidrogén-rezervoárok) ásványi reakciók is lejátszódhatnak a pórusrésben és pórusrésben. Ilyen formációk a mélységi oldott sót tartalmazó akviferek, recens és korábbi sekélytengeri homokkő képződmények, széles elterjedéssel és elérhetőséggel a besajtolási és tárolási folyamatokhoz [6].

A kőzetalkotók, de egyéb ásványok közül is számos olyan van, amely kémiai reakcióba lép CO_2 -dal, vizes oldatban erősebb reakcióval. Ezek a karbonátos mállási reakciók, amelyeket felerősíthetünk mesterségesen, és elsősorban a Mg- és Ca-dús ásványok, főleg

szilikátok esetében használható ki az a „carbon capture and storage” területén. A legnagyobb hatásfokkal működő ásványok a wollastonit (CaSiO_3) és brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) lennének, bár épp ezek természetes elfordulásai, főleg telepei ritkák. Ellenben a szerpentin ásványok (lizardit, krizotil, antigorit) és az olivincsoport Mg-gazdag tagjai gyakoribbak, főleg az óceánhátsági bazaltokhoz (Mid Ocean-Ridge Basalts, MORB) kötődően. Ebből kifolyólag jelenleg elterjedtebb a MORB bazaltokhoz kapcsolódó ipari léptékű CO_2 -besajtolás és ásványi megkötés, ahol az *in situ* reakciótermék MgCO_3 , a felszabaduló kovásvav pedig amorf gél vagy kvarc formájában csapódik ki. Az alkáli bazaltok esetében a Ca-dús fázisok jelentősebbek, főleg a bázikus plagioklászok – anortit, labradorit, bytownit –, amelyek ugyancsak magas reaktivitást mutatnak a CO_2 -tartalmú oldatokkal.

A kevésbé szokványos megoldások közé tartozik pl. a gyémántbányák meddőjének, a magas Mg-tartalmú kimberlit örlemények felhasználása [7], amely kőzet bár kifejezetten ritka, keletkezése mégis jelentős a gyémántbányászat intenzitását tekintve. A kimberlitmeddők esetében Mg-dús filloszilikát ásványok (klorit, phlogopit, talk, szmektit) az uralkodó ásványok, jelentős olivintartalommal, így magas a karbonátosodási potenciáljuk.

Hasonló alkalmazásra vonatkozik a IPCC „enhanced weathering” kifejezése is, de ez esetben a légköri CO_2 -megkötést helyezi előtérbe, finomszemcsés ásványi örlemények természetbe való kijuttatásával [8].

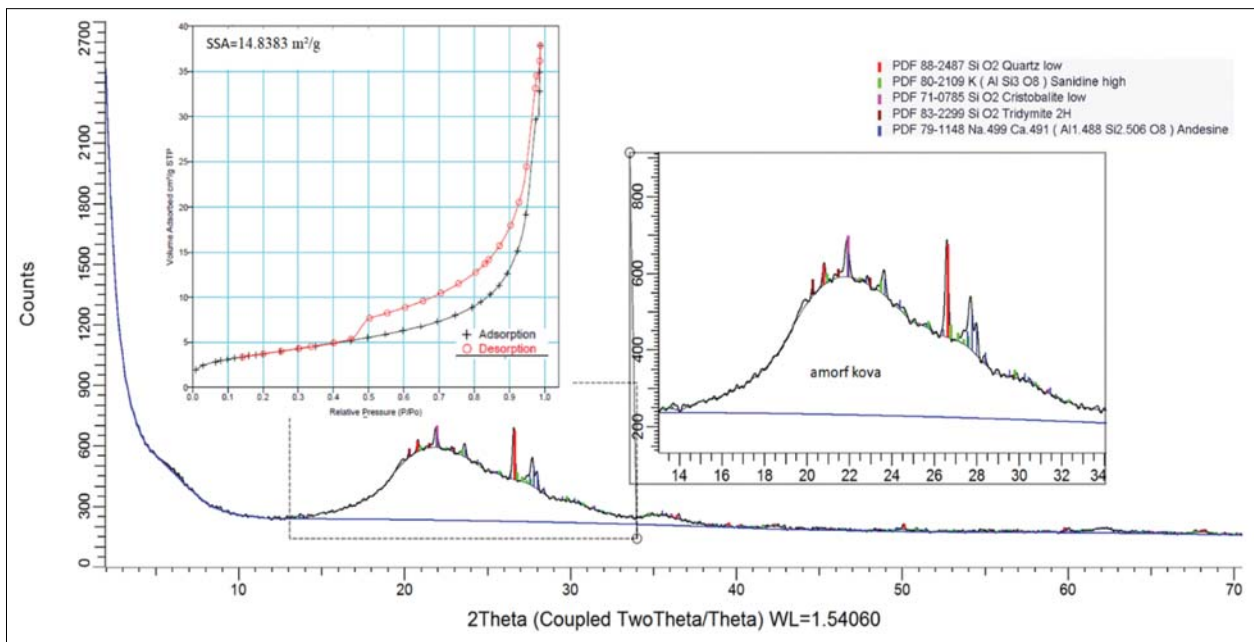
Vízvédelem

Ivóvízbázis

Az ivóvíz készletek kezelése és fertőtlenítésén túl szükséges a keménységet szabályozni, mérgező kémiai elemeket leválasztani (pl. As, Sb) és a lebegő szemcséket eltávolítani. Az As-tartalom leghatékonyabb eltávolítása mesterséges anyagokkal és kémiai eljárásokkal működik, azonban a Fe-, Al- és Mn-oxidok, oxihidroxidok [9, 10] jó adszorbensek az oldott arzénra, de a montmorillonit is kellő hatékonysággal alkalmazható. Az ivóvizek magas (néhány 100 ppm) fluortartalma ugyancsak egészségügyi problémákhoz vezethet, ezért sok területen szükséges a fluormentesítés. Ennek egyik megoldása duzzasztott agyaggyöngy (LECA, Light Weight Expanded Clay Aggregate), amely kezelt formájában akár több tíz mg/g fluoridiont is képes megkötni [11].

Szennyvíztisztítás

A szennyvizek szerteágazó típusai miatt a kezelésükhöz alkalmas ásványi anyagok szisztematikus áttekintése is bonyolult. Az ipari szennyvizek esetében a festékanyagok kiszűrése diatomittal általános alkalmazás



1. ábra. Zempléni diatomit röntgen-pordiffrakciós felvétele kristályos „szennyezőkkel”, ill. BET fajlagos felület (SSA) elemzése

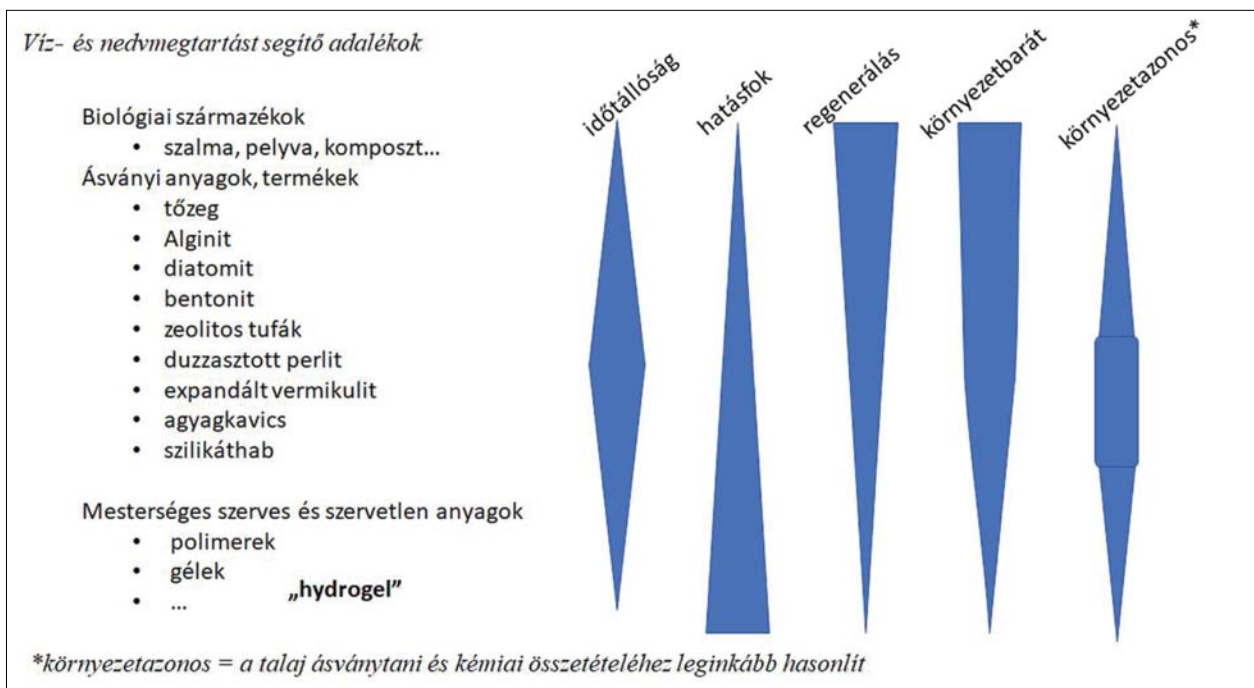
[12], de az agyagásványok sajátos típusai is kiváló anyagok, mint a szepiolit szerves anionokra és kationokra, montmorillonit fémionokra és festékekre vagy halloysit a szerves ionokra [15]. A hazai nyersanyagok közül a Zemplénben előforduló kovaföldnek kiváló adszorpciós képessége van a nagy fajlagos felület következtében (1. ábra), bár nagy tisztaságban csak kis mennyiségben fordul elő, általában montmorillonittal, kalcittal és vulkanoklasztos törmelékekkel keveredve alakultak ki a telepei.

A klinoptilolit és agyagásványok szerepe ezen a területen is kiemelkedő, bár alkalmazásuk leggyakrabban hordozóként érvényesül, a felületükre felvitt nanobevonatok adják a funkcionalitást.

Talajvédelem

Talajjavítás

A talajszerkezet lazítására alkalmas ásványi nyersanyag a diatomit [17]. Bár egyéb ipari alkalmazásai



2. ábra. Talajjavításhoz használt anyagok általános csoportosítása

gazdaságilag jelentősebbek (folyadéksűrítés, hőszigetelés, cementadalék [18]), az alacsony minőségű kovaföld nemcsak a talaj mechanikai tulajdonságait javítja, hanem a vízháztartás – vízmegtartás szempontjából is fontos hatása van. Továbbá, mivel a diatomit nélkülözhetetlen anyaga pl. a sörök derítésének – ezáltal olyan hulladék keletkezik, amelyet hasznosítani lehet a gabonatermesztésben vagy általánosan a talajjavításban másodnyersanyagként.

A természetes zeolitok közül a klinoptilolit és mordenit alkalmazásai elterjedtebbek, mert ezek adják az ásványi zeolittermelés zömét, és telepeik esetében a dúsulás mértéke lehetővé teszi a szeparálás és dúsítás nélküli alkalmazásukat is. Többek között a foszforháztartásra és ezáltal a termés hozamra van pozitív hatással [20]. Néhány, gyakrabban alkalmazott talajjavító adalék vázlatos környezeti szempontú értékelését a 2. ábra szemlélteti.

A magas kőzetüveg-tartalom, nanokristályos alkotók és mállás során keletkezett ásványok, mint zeolitok, agyagásványok, karbonátok és szulfátok jelenléte általában jó ásványi tápanyagforrássá teszi a vulkáni tufákat. A vulkanizmus geokémiai jellege szerint eltérő talajtípusokra és elemkioldásra lehet használni a bazaltos, andezites, dácitos vagy riolitos tufákat.

A füstgáz-kéntelenítési gipsz, megfelelő ellenőrzés mellett, alkalmazható talajjavító adalékként is, amely a talaj fizikai paramétereinek javítása mellett fontos tápelemforrás is a mezőgazdasági kultúrák számára [21].

Talajok vízháztartása

Számos talajjavító adalék, ásványi trágya már eleve hozzájárul a talajnedvesség szabályozásához is, de főleg a porózus kőzetek és zeolitos tufák egyik fontos alkalmazása a vízháztartás szabályozása.

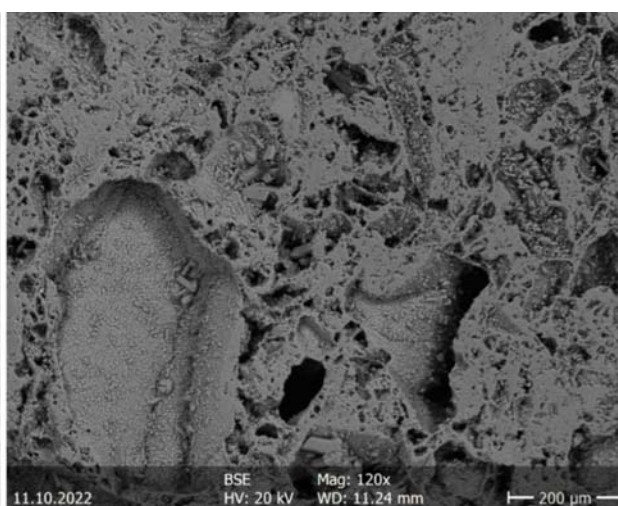
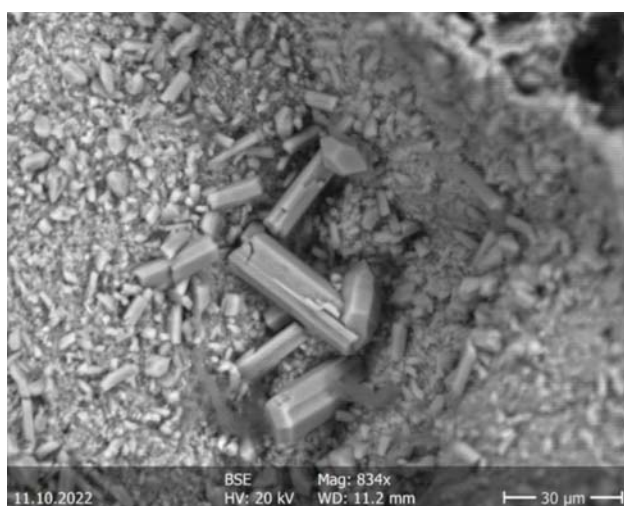
Magyarországi viszonylatban a zempléni riolitos tufák és azok átalakulási termékei hasznosulnak mezőgazdasági alkalmazásokban [24]. A bodrogkeresztúri Kakas-hegy riolittufájának egyedi pórusszerkezete (3. ábra) értékesebb tulajdonságokat sejtet, mint az ásványtani-kémiai összetétele.

Ásványi alapanyagok környezetvédelmi termékek gyártásához

A különféle környezetvédelmi alkalmazásokban nemcsak az elsődleges ásványi anyagokat vagy azok keverékét hasznosítjuk, hanem számos szintetikus (természetes analóggal rendelkező) vagy mesterséges anyagot is gyártani szükséges. Egyik legnagyobb terület a zeolitok hidrotermás szintézissel való előállítása [25], amelynek elsődleges alapanyaga a metakaolin [26]. Az amorf alumínium szilikát mátrixot nagy tisztaságú kaolinból lehet termikus kezeléssel előállítani, így áttételesen is a kaolinit az egyik legfontosabb ásvány a környezeti alkalmazásokban. A több száz mesterséges zeolittípus közül a Linde-típus, zeolit-A viszonylag egyszerűen előállítható [27], jó kationcserélő képességgel bíró anyag, kobalttelítés után jó NO-megkötő kapacitása alakul ki [28]. Továbbá megfelelő zeolittípust választva, akár a S-, N- és C-oxidok is szimultán leválaszthatók a füstgázból [29].

Másodnyersanyagok generálása

Néhány ipari folyamat nagy mennyiségben termel szilárd hulladékot, amelyek veszélyes kategóriába is tartozhatnak. Ide sorolható a kénmentesítés során képződő gipsz is, amely eleve egy környezetvédelmi beavatkozás terméke, de az olyan anyagok, mint az erőművi pernye, kőolaj-finomítói kén vagy éppenséggel a petrolkoksz is értékes nyersanyaggá válhatnak ásványi nyersanyagokat kiváltva. A finomítóknak



3. ábra. Riolittufa pórusszerkezete, bal: albit- és kvarckristályok a pórusokban, jobb: átnézeti kép a széles pórusméret eloszlásról (pásztázó elektronmikroszkópos felvétel)

keletkező kén veszélyes hulladéktárolása és ártalmatlanítása jelentős költségeket hordoz, ezért nyersanyag célú felhasználása szükségszerű [30]. Egyik alkalmazása az építőipar, ahol cementekhez adagolva javítja a beton fizikai tulajdonságait, pl. földrengésekkel szembeni ellenállóságát [31]. Az erőművi pernye sokféle hasznosítása közül az egyik legjelentősebb a szintetikus zeolitok gyártása [32], akár ásványi prekursorok kiváltására is, így a hulladék felszámolása mellett a környezetvédelemben is hasznosuló anyag. A petrolkocsz, lévén szervesetlen, nagy tisztaságú szén, így kiváló alapanyag grafit (Li-ion elektróda, [33]) és grafén gyártásához, ezáltal csökkentve a grafitbányászat környezeti lábnyomát.

Záró gondolatok

A nemzetközi klímakutatáshoz kapcsolódó prevenció és remediációs alkalmazások széles tárházából kirajzolódik, hogy ezeken a területeken a hagyományos ásványi nyersanyagok, ásványok igen jelentős szerepet töltenek be. Bár a nanoszintézis, és szerves-szervesetlen kompozit anyagok alkalmazása elkerülhetetlen, ezek alapanyagai is inkább ásványi formából származnak, és nagyobb volumenű alkalmazhatóságukhoz szükség van ásványi hordozókra, illetve azok bányászatára. De mindenekelőtt az innovatív anyagfelhasználás és gyártás kutatására, amely a kis értékű ásványi nyersanyagokból nagyobb hozzáadott értékkel rendelkező, hasznos terméket eredményez.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki Tompa Richárdnak a kézirat gondos bírálatáért.

IRODALOM

- [1] *Smarik S., Aney S., Boes A., Brown D., Dubois D., Edwards B., Elias E., Eve M., Steele R., Webb N., Wilson M., Zwicke G.* (2019): Dust mitigation handbook. Las Cruces, NM: U.S. Department of Agriculture, 697 p, <https://dust.swclimatehub.info/>
- [2] *Miyakawa H., Fujii H., Okada M., Shimatani, T.* (2000, June): Performance of Magnesium Hydroxide-Gypsum Flue Gas Desulfurization Process. In: 16th World Petroleum Congress. OnePetro.
- [3] *Blythe G., Owens, M.* (2007): Field Testing of a Wet FGD Additive for Enhanced Mercury Control-Task 5 Full-Scale Test Results. URS Corporation.
- [4] *Senior C. L., Tyree C. A., Meeks N. D., Acharya C., McCain J. D., Cushing K. M.* (2015): Selenium partitioning and removal across a wet FGD scrubber at a coal-fired power plant. *Environmental Science & Technology*, 49(24), pp.14376–14382.
- [5] *Sakizci M., Erdoğan Alver B., Yörükoğullari E.* (2011): Influence of the exchangeable cations on SO₂ adsorption capacities of clinoptilolite-rich natural zeolite. *Adsorption*, 17(4), pp.739–745.

- [6] *Kelemen P., Benson S. M., Pilorgé H., Psarras P., Wilcox, J.* (2019): An overview of the status and challenges of CO₂ storage in minerals and geological formations. *Frontiers in Climate*, 1, p. 9.
- [7] *Mervine E. M., Wilson S. A., Power I. M., Dipple G. M., Turvey C. C., Hamilton J. L., Vanderzee S., Raudsepp M., Southam C., Matter J. M., Kelemen P. B.* (2018): Potential for offsetting diamond mine carbon emissions through mineral carbonation of processed kimberlite: an assessment of De Beers mine sites in South Africa and Canada. *Mineralogy and Petrology* 112 (Suppl 2): S755–S765.
- [8] *Bach L. T., Gill S. J., Rickaby R. E., Gore S., Renforth P.* (2019): CO₂ removal with enhanced weathering and ocean alkalinity enhancement: potential risks and co-benefits for marine pelagic ecosystems. *Frontiers in Climate*, 1, p. 7.
- [9] *Kumar R., Patel M., Singh P., Bundschuh J., Pittman Jr. C. U., Trakal L., Mohan D.* (2019): Emerging technologies for arsenic removal from drinking water in rural and peri-urban areas: Methods, experience from, and options for Latin America. *Science of the Total Environment*, 694, p. 133427.
- [10] *Babaeivelni K.* (2014): Removal of arsenic from water using manganese oxides adsorbents. Doctoral dissertation, University of Illinois at Chicago.
- [11] *Sepehr M. N., Kazemian H., Ghahramani E., Amrane A., Sivasankar V., Zarrabi M.* (2014): Defluoridation of water via Light Weight Expanded Clay Aggregate (LECA): Adsorbent characterization, competing ions, chemical regeneration, equilibrium and kinetic modeling. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(4), pp.1821–1834.
- [12] *Hadri M., El Mrabet I., Chaouki Z., Draoui K., Hamdaoui M., Douhri H., Zaitan H.* (2022): Valorization of natural diatomite mineral: Application to removal of anionic dye from aqueous solution in a batch and fixed-bed reactor. *Journal of Central South University*, 29(6), pp. 2084–2098.
- [13] *Largo F., Haounati R., Akhouairi S., Ouachtak H., El Haouti R., El Guerdaoui A., Hafid N., Santos D. M., Akbal F., Kuleyin A., Jada, A.* (2020): Adsorptive removal of both cationic and anionic dyes by using sepiolite clay mineral as adsorbent: Experimental and molecular dynamic simulation studies. *Journal of Molecular Liquids*, 318, p. 114247.
- [14] *Parisi F., Lazzara G., Merli M., Milioto S., Princivalle F., Sciascia, L.* (2019): Simultaneous removal and recovery of metal ions and dyes from wastewater through montmorillonite clay mineral. *Nanomaterials*, 9(12), p. 1699.
- [15] *Filice S., Bongiorno C., Libertino S., Compagnini G., Gradon L., Iannazzo D., La Magna A., Scaless S.* (2021): Structural characterization and adsorption properties of dunino raw halloysite mineral for dye removal from water. *Materials*, 14(13), p. 3676.
- [16] *Kennedy K. K., Maseka K. J., Mbulo, M.* (2018) Selected adsorbents for removal of contaminants from wastewater: towards engineering clay minerals. *Open Journal of Applied Sciences*, 8(8), pp. 355–369.
- [17] *Aksakal E. L., Angin I., Oztas T.* (2012) Effects of diatomite on soil physical properties. *Catena*, 88(1), pp. 1–5.
- [18] *Ghobara M. M., Mohamed A.* (2019): Diatomite in use: Nature, modifications, commercial applications

- and prospective trends. *Diatoms: Fundamentals and Applications*, pp. 471–509.
- [19] Dessalew G., Beyene A., Nebiyu A., Ruelle M. L. (2017): Use of industrial diatomite wastes from beer production to improve soil fertility and cereal yields. *Journal of cleaner production*, 157, pp. 22–29.
- [20] Nur Aainaa H., Haruna Ahmed O., Ab Majid N. M. (2018): Effects of clinoptilolite zeolite on phosphorus dynamics and yield of *Zea Mays* L. cultivated on an acid soil. *PLoS One*, 13(9), p. e0204401.
- [21] Watts D. B., Dick W. A. (2014): Sustainable uses of FGD gypsum in agricultural systems: Introduction. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), pp. 246–252.
- [22] Al-Zboon K. K., Al-Tabbal J. A., Al-Kharabsheh N. M., Al-Mefleh N. K. (2019): Natural volcanic tuff as a soil mulching: effect on plant growth and soil chemistry under water stress. *Applied Water Science*, 9(5), pp. 1–10.
- [23] Al-Tabbal J. A., Al-Mefleh N. K., Al-Zboon K. K., Tadros M. J. (2020): Effects of Volcanic Zeolite Tuff on Olive (*Olea Europaea* L.) Growth and Soil Chemistry under a Constant Water Level: Five Years' Monitoring Experience. *Environment and Natural Resources Journal* 2020; 18(1): 44–54. DOI: 10.32526/enn-rj.18.1.2020.05
- [24] Köhler M. (2008): A riolittufa (vulkáni hamu) hasznosságáról a tápanyag gazdálkodásban és egyéb területeken. *Östermelő* 2008/3: 119–120.
- [25] Jacobs, P.A., Flanigen, E.M., Jansen, J.C. and van Bekkum, H., (2001): Introduction to zeolite science and practice. 2nd ed., Elsevier.
- [26] Pereira P. M., Ferreira B. F., Oliveira N. P., Nassar E. J., Ciuffi K. J., Vicente M. A., Trujillano R., Rives V., Gil A., Korili S., De Faria E. H. (2018): Synthesis of zeolite A from metakaolin and its application in the adsorption of cationic dyes. *Applied Sciences*, 8(4), p. 608.
- [27] Angell C. L., Flank W. H. (1977): Mechanism of zeolite A synthesis. ACS Symposium Series, Vol. 40, ISBN 13: 9780841203624
- [28] Zhu Z., Xu B. (2022): Purification Technologies for NO_x Removal from Flue Gas: A Review. *Separations* 2022, 9, 307. <https://doi.org/10.3390/separations9100307>
- [29] Rezaei F., Rownaghi A. A., Monjezi S., Lively R. P., Jones, C. W. (2015): SO_x/NO_x removal from flue gas streams by solid adsorbents: a review of current challenges and future directions. *Energy & fuels*, 29(9), pp. 5467–5486.
- [30] Khan S. H., Amani S., Amani M. (2021): Alternative and Potential Uses for the Sulfur Byproducts Produced from Oil and Gas Fields. *International Journal of Organic Chemistry*, 11(01), p. 14.
- [31] Efremova, S.Y., Panfilova, M.I., Zubrev, N.I., Politava, N.A. and Goryacheva, A.A. (2021) Sulfur-Modified Composites for Enhancement of Building Foundations. In: E3S Web of Conferences, Vol. 247, p. 01053. EDP Sciences.
- [32] Jha B., Singh D. N. (2016): Fly ash zeolites. *Advanced Structured Materials*, 78, pp. 5–31.
- [33] Nugroho A., Nursanto E. B., Pradanawati S. A., Oktaviano H. S., Nilasary H., Nursukatmo H. (2021): Fe based catalysts for petroleum coke graphitization for Lithium Ion battery application. *Materials Letters*, 303, p. 130557.
- [34] Saha S., Lakhe P., Mason M. J., Coleman B. J., Arole K., Zhao X., Yakovlev S., Uppili S., Green M. J., Hule, R. A. (2021): Sustainable production of graphene from petroleum coke using electrochemical exfoliation. *npj 2D Materials and Applications*, 5(1), pp. 1–8.

Egyedülálló komplex tudást ad a Miskolci Egyetem a hazai nyersanyagok feltárásához

A Covid-helyzet és az orosz–ukrán konfliktus rávilágított arra, hogy az energia- és nyersanyagellátási láncok sérülékenyek. A hazai nyersanyagforrások feltárásában szeretne élvonalos lenni a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kara – hangzott el a Regionális nyersanyagforrásaink címmel rendezett konferencián, amelyet a Magyar Tudományos Akadémia Miskolci Bizottságának székházában rendeztek október 6-án.

A megújuló energiatermelés az elmúlt évtizedekben a háttérbe szorította a fosszilis energiahordozók, köztük a szén felhasználását, ma azonban ismét felmerül a hazai szénvagyon hasznosítási lehetőségeinek újragondolása, a szénbányászati tevékenység újraindítása. A hazai szénbányászatnak erre akkor van esélye, ha fenntarthatósági alapelvek mentén tudja megfogalmazni a jövőjét – fogalmazott a konferencia megnyitóján Bánné Dr. Gál Boglárka, a B.-A.-Z. Megyei Közgyűlés elnöke. Ezt igyekszik segíteni az újra életre hívott megyei szénbányászati klaszter, amelyben szerepet vállalt a Technológiai és Ipari Minisztérium és a Miskolci Egyetem és a Miskolci Földtudományi Kara.

„Magyarországon Borsod-Abaúj-Zemplén megye rendelkezik a legnagyobb szénvagyonnal. A Miskolci Egyetem részéről adott a kutatóbázis ennek feltáráshoz és a hasznosításhoz. A mérnökök, kutatók, egyetemi oktatók tudása lehetővé teszi a meglévő erőforrásaink 21. századi módon történő hasznosítására, energiaellátásunk biztonságának megteremtésére” – hangsúlyozta a közgyűlés elnöke. Prof. Mucsi Gábor, a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának dékánjának nyitóelőadásán elhangzott, a mai kor gazdasági és energetikai kihívásaira megoldásokat kínál mások mellett a tisztaszén technológia, a körforgásos gazdaság megteremtése és a hulladékhasznosítás, amely területeken a Miskolci Egyetem egyedülálló komplex tudással, jól felszerelt laboratóriumokkal, nemzetközileg is elismert oktatókkal rendelkezik.

„Amíg korábban a szén és az érc voltak a legfontosabb stratégiai nyersanyagok, addig napjainkban egyre nagyobb szerep hárul a hulladékoknak mint másodlagos felhasználású anyagoknak a nemzetgazdasági szempontból fontos hasznanyaggá alakítására. De igaz ez az ellátási lánc széles spektrumára, amibe beletartozik a nyersanyagkutatás, -kitermelés, -feldolgozás, a kohászat, az anyagtudomány, a gépészet, határterületként pedig annak társadalomtudományi, gazdasági és jogi vonatkozásai. A Miskolci Egyetem ebből a szempontból egyfajta multidiszciplináris központként tudja segíteni a folyamatokat” – fogalmazott a dékán. A rendezvényt Riz Gábor ózdi országgyűlési képviselő, a magyarországi lignittermelés növeléséért, a villamos energia ellátásbiztonságáért és a lakossági fűtési célú energiaellátás biztonságáért felelős miniszteri biztos előadása zárta.

A Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyságnövelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének a Folyadék és tiszta technológiák eljárásai moduljának eredményeit áttekintő tanulmány

A study reviewing the results of the Liquid and clean technology processes module of the project “Development of enhanced engineering methods with the aim at utilization of subterranean energy resources” of the Research Institute of Applied Earth Sciences of the University of Miskolc

DR. ZÁKÁNYINÉ DR. MÉSZÁROS RENÁTA

tudományos főmunkatárs

DR. BARACZA MÁTYÁS KRISZTIÁN

tudományos főmunkatárs

VARGA GYULA

tudományos segédmunkatárs

Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet

A Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézete és partnerei projekt együttműködésében elért eredményei az Ásványvagyon-hasznosítás és készletgazdálkodási Cselekvési Terv általános célkitűzéseivel összhangban hozzájárulnak a konvencionális és nem konvencionális szénhidrogének kitermelését célzó intenzív termelési technikák fejlesztéséhez. A fenntartható energiagazdálkodás egyre sürgetőbb kérdéseire a választ a geotermikus energia technológiai lehetőségeinek vizsgálatán és új megoldások bevezetésén keresztül kerestük. Utóbbi hozzájárulhat a Magyarország Nemzeti Energia- és Klímatervében megfogalmazott, energia termelési módzatok diverzifikálásának folyamatához. A tanulmányban rövid ismertetőkön keresztül mutatjuk be a kiemelt kutatási irányzatok eredményeit és a megvalósulásukhoz vezető út közben kialakult részcélok tartalmát. A projekt ugyan lezárult, de a kidolgozott módszerek és létrehozott adatbázisok a jövőben további előremutató kutatási irányok alapját képezik majd.

The results achieved by the Research Institute of Applied Earth Sciences of the University of Miskolc and its partners in the project will contribute to the development of intensive production techniques for the extraction of conventional and unconventional hydrocarbons in line with the general objectives of the Mineral Resource Exploitation and Stockpile Management Action Plan. The increasingly pressing issues of sustainable energy management have been addressed by exploring the technological potential of geothermal energy and introducing new solutions. The latter can contribute to the process of diversification of energy production methods as outlined in the National Energy and Climate Plan of Hungary. In this paper, the results of the priority research lines and the content of the sub-objectives that have emerged on the way to their realisation are presented in brief. Although the project has now come to an end, the methods developed and databases created will form the basis for further forward-looking research directions in the future.

Bevezetés

A Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyságnövelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének a Folyadék és tiszta technológiák eljárásai moduljának keretében a következő altémákon belül folytak kutatások:

- földtani közeg energetikai célú, illetve a klímaváltozás hatásainak lassítását és mérséklését célzó hasznosításának lehetőségei,
- a földtani közeg védelme és a fluidum-transzporttal járó technológiák hatékonyságnövelésének kutatásai,
- természetes kőzetmagok mesterségesen konszolidált kőzetmagokkal történő modellezése,

technológiáinak kialakítása, korszerűsítése, optimalizálása, továbbfejlesztése, különböző igényeknek megfelelő adaptálhatóságának vizsgálata,

- a konvencionális és nem konvencionális fluidumbányászatban, geotermikus energia-termelésben, mélyfúrásokban, hozamnövelő eljárásokban használt folyadéktechnológiák vizsgálata.

A fenti tématerületek közül az alábbiakban bővebben a földtani közeg védelme és a fluidum-transzporttal járó technológiák hatékonyságnövelésének kutatásaira vonatkozó eredmények egy részét mutatjuk be.

Napjaink tudományos, ipari kihívásai között jelentős szerepet kap a különböző típusú nanoanyagok stabilitásának kérdésköre, melynek kapcsán a polimerek, tenzidek és azok elegyeinek diszperz részecskék felületi, elektromos felületi tulajdonságaira és aggregálódásának mértékére gyakorolt hatásának vizsgálata kulcsfontosságú. Az elmúlt években az egyre növekvő energiaigény miatt, a nem konvencionális tárolók arányának növekedése és az azokban rejlő gazdasági lehetőségek egyre nagyobb jelentőséget képviselnek [2].

A kőzetfelületeket a kőzetalkotó ásványok összetételéből kifolyólag borító nagyszámú funkciócsoportnak köszönhetően – általában COOH-csoportok, C-O-csoportok C=O-csoportok, OH-csoportok, C=C-csoportok stb. – a kőzetek főbb tulajdonságai jelentősen változhatnak, amikor a kőzetfelszín folyadékkal érintkezik. Így tehát a fúrási művelet és az ahhoz kapcsolódó eljárások kiemelt jelentőséggel bírnak.

A fúrási művelet célja, hogy egy vagy több kútból és/vagy kutakból hatékonyan kinyerhető nyersanyagot (olajat és/vagy gázt, illetve vizet), vagy hőt termelhessünk. Ennek eléréséhez a teljes fúrási program alatt, előre megtervezett, és megfelelően beállított fúrási iszapokra (öblítő közegre) van szükség. A fúrási iszapok olyan fizikai – kémiai és reológiai tulajdonságokkal bíró elegyek, amelyek a gyakorlatban döntően folyadék fázisúak. Azonban az öblítőközeg lehet egyfázisú [1] gáz vagy folyadék is, valamint kétfázisú gáz és folyadék vagy esetleg szilárd anyag valamilyen arányú keveréke. A fúrási iszapnak egyidejűleg számos feltételnek kell megfelelnie úgy, hogy azok lehetséges összefüggéseit és kölcsönhatásait is figyelembe kell venni. Mivel minden műszaki előírás által támasztott feltételnek eleget kell tennie, így sorrend nem állítható fel a következő szempontok között. Az öblítőfolyadék hazmazállapotától függetlenül feladatait az alábbiakban határozhatjuk meg.

Elsődleges feladatok:

- a fúróiszap támassza meg a lyukfalat, ezzel kellő ellennyomást biztosít a rétegnyomás ellen,
- a furadék felszínre szállítása,
- a fúrófej hűtése és a rudazat kenése,
- a szénhidrogén tároló rétegek védelmének biztosítása, illetve a réteggárosító hatás minimalizálása,
- szükséges iszaplepeny kiképzése a lyukfalon,
- differenciális megszorulás esélyének csökkentése,
- korrózióvédő hatás elérése,
- környezetre gyakorolt hatások minimalizálása,
- gazdaságossági és költség hatékonysági feltételeknek is teljesülnie kell.

A felsorolt elsődleges feladatokon túl törekedni kell arra, hogy az adott fúrási folyadék mindezekon felül biztosítani tudja a másodlagos feladatait is, úgy mint:

- folyadék veszteség megakadályozása, illetve csökkentése,
- kimosódások, lyuk bővülések megakadályozása (mérettartó lyuk biztosítása),
- a furadék szétesés megakadályozása,
- nagy fúrási sebesség biztosítása,
- megfelelő iszaplepeny minőség biztosítása, amely csökkenti a súrlódó erőket,
- lyukbefejezés és/vagy a cementezés elősegítése.

Tehát általánosan elmondható, hogy a fúrási folyadékok alapvető hatással vannak a kút műszaki biztonságára, ezzel nagymértékben befolyásolják a fúrási költségeket és a kút termelőképességét. Mindezek alapján az öblítő közeg megfelelő műszaki paraméterekkel kell rendelkezzen. Fontos továbbá, hogy az elérhető legjobb technológia kerüljön alkalmazásra, ennek pedig már a tervezési fázisban célkitűzésként kell szerepelnie. Ehhez az elérhető – vagy a megrendelő által megfizethető – legjobb rendszerek és a legjobb minőségű anyagok kiválasztása szükséges. Annak érdekében, hogy az adott fúrásponton a megfelelő iszap álljon rendelkezésre már a tervezés korai szakaszában rögzíteni kell a szükséges folyadék tulajdonságokat. Az öblítő közeg főbb tulajdonságai:

- sűrűség,
- reológia,
- vízleadás,
- alkalinitás,
- szilárdanyag tartalom,
- klorid tartalom.

Mindezen paraméterek a mikropórusok és a mikroszkópikus erők szintjén is kiemelt jelentőséggel bírnak a következők szerint. Egyes csoportok telített



1. ábra. ZETA sizer DT-310

szabad gyökké válnak (például Ca^{2+} -csoportok, CO-csoportok, Na^+ -csoportok stb.), illetve kettős elektromos réteget képeznek a határfelületen lévő ellenionokkal, míg a többiek telítetlen csoportok (például COOH-csoportok, C–O-csoportok, C=O-csoportok, OH-csoportok stb.), a szilárd felületen maradnak [3].

Ismert, hogy a funkciós csoportok közti kölcsönhatás különféle mikroszkopikus erőkként nyilvánul meg [4]. Például az elektrosztatikus erő a telített funkciós csoportok kölcsönhatása, míg az intermolekuláris erők és a hidrogénkötés elsősorban a töltés nélküli csoportok kölcsönhatásaiként vannak jelen [5–7]. Mindennek következtében a bonyolult pórusszerkezetek, a fejlett nanopórusok és a különféle mikroszkopikus erők (például Van der Waals-erő, elektrosztatikus erő és hidrogénkötés) amelyek a folyadékok és a szilárd felület közötti határfelületi kölcsönhatásokból keletkeznek, jelentős hatással bírnak a nedvesíthetőségre [8].

A rövid hatótávú Van der Waals-erő tükrözi a semleges molekulák vagy atomok közötti vonzást, amely döntő fontosságúvá válik a nano mérettartományban is. Van der Waals erővel összehasonlítva a telített molekulák vagy részecskék közötti elektrosztatikus erőket viszonylag nagy távolságon hatnak, és hatásuk fordítottan arányos a távolság négyzetével. Az elektrosztatikus erő vonzó vagy taszító is lehet, különösen, ha a szilárd-folyékony határfelületen elektromos kettős réteg képződik [9]. A hidrogénkötési erők a Van der Waals erők és az elektrosztatikus erők közötti intermolekuláris erők tág tartományába tartoznak.

A fentiek tükrében a fúróiszapok tanulmányozásának kiemelkedő szerepe lehet a folyamatok széles spektrumon történő feltérképezésében, így vizsgálataink során is ezen célokat kívántuk magunk elé tűzni.

A Projekt során beszerzésre került DT-310 mérőműszer (1. ábra), mely a zéta-potenciál nagy koncentrációjú rendszerekben történő meghatározását teszi lehetővé, és további segítséget nyújt a fenti összefüggések feltárása kapcsán, hiszen a zéta-potenciál-értékek a berendezés segítségével közvetlenül mérhetők az iszapban, további hígítás nélkül.

Az egyes fúrési iszapok alkalmazási korlátai

Egyre mélyebb kutak esetén egyre nagyobb kihívást jelent a hőstabilitás biztosítása a fúrési és kútmunkálati folyadékoknál. A várható réteghőmérséklet alapján olyan alapanyagok és adalékanyagok alkalmazását kell megtervezni, amely képes a hőstabilitást biztosítani. Az iszaphoz kapcsolódó felszíni rendszernél is figyelembe kell venni a becsült maximum-hőmérsékletet. Ez a hőmérséklet maximum a kifolyási pont környezetében mérhető. A hőmérsékletre való tervezés kritériuma, hogy a folyadéknak rendelkeznie kell tartalékkal a hőstabilitás tekintetében. Széles körben elterjedt az a nézet, hogy a kutató fúrásnál magasabb hőtartalékot kell biztosítani, mint feltáró fúrásnál. Különböző iszap típusok más és más hőmérsékletig alkalmazhatóak:

- *Agyag iszap*: alacsony hőmérsékletig jól alkalmazható, ahol a $H_{max} = 80$ °C. Polimerrel mint stabilizáló adalékkal 120–125 °C-ig használható. Magasabb hőmérsékleten a szintetikus

polimer és keményítőadalék biztosítja a hőtűrést.

- ❑ *Kalcium- (Ca²⁺-) bázisú iszap:* 150 °C felett is jó hőtűró, ha méshidrátot és szintetikus adalékkal kezelt.
- ❑ *Kationos polimer rendszerek:* hőmérsékleti (alkalmazási) határa 130–135 °C, 1,3 kg/l maximumsűrűség mellett.
- ❑ *Telített sós vizes iszap:* magnézium-oxiddal (MgO), szintetikus polimerrel, és xantánnal adalékolva 160 °C-ig hőtűró azonban, ha a sűrűség 1,4 kg/l értéket meghaladó, akkor a tartós hőmérséklet hatására a nehezítő anyag kiülepszik.
- ❑ *Formiát tartalmú polimer iszap:* alapját képezik olyan sóoldatok, amelyek általában nátrium-formiát- (NaCOOH-), és/vagy kálium-formiát- (KCOOH-) tartalmúak. Xantán, keményítő és méshidrátot hozzáadásával akár 165 °C-ig hőtűró lehet. További nagy előnye, hogy tárolórétég kímélő tulajdonságokkal rendelkezik. Használatával a szűrőrétég (iszaplepleny) könnyen eltávolítható savoldhatóságának köszönhetően. Ritkán használatos a cézium-formiát- (CsCOOH-) tartalmú iszap, amely rendkívül költséges, de a többi formiát összes előnyével rendelkezik, valamint az alkalmazásával elérhető maximális sűrűség 2,3 kg/l is lehet.

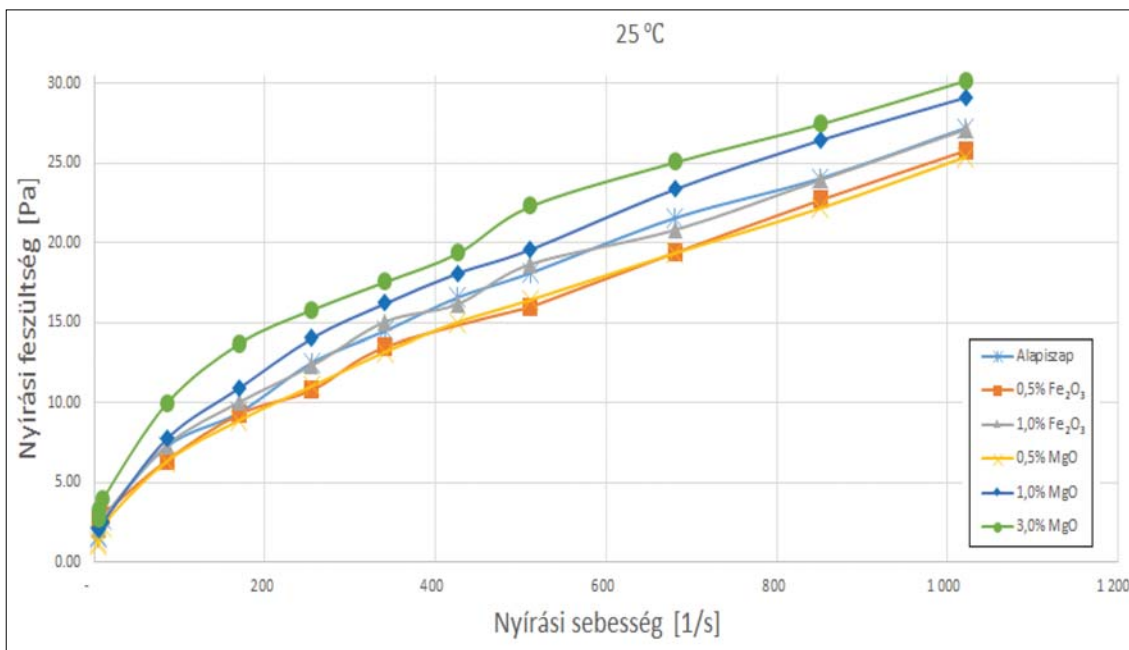
Nanofolyadékok reológiai mérései és eredményei

A nanofluidumok potenciálisan hasznosíthatók az olaj- és gáztermeléssel kapcsolatos alkalmazásokban számos folyamat teljesítményének a növeléséhez, úgymint a kutatási, mélyfúrási, elsődleges termelési és EOR műveletekhez [10–12]. Azonban vízbázisú iszapban (WBM = Water Based Mud) való alkalmazásuk fokozott figyelmet igényel, hogy hatékony fúrás lehessen elérhető a magas nyomású, magas hőmérsékletű (HPHT = High Pressure High Temperature) környezetben is. Jelen kutatásban egy fúráspontról származó fúrási folyadék folyási tulajdonságait elemeztük, illetve hasonlítottuk össze nanoadalékkal kezelt változatait. A nanofluidumokat 0,5, 1,0 és 3,0 tömegtört (wt%) nanorészecske-koncentrációkkal készítettük el. Megvizsgáltuk az így létrejött folyadék (NWBM = New Water Based Mud) folyási tulajdonságainak változását. Számos szerző végzett tanulmányokat a WBM-ről, melyben leírják annak reológiai viselkedését és adalékanyagok hozzáadásával előnyös tulajdonságait [13]. Azonban meg kell említeni a WBM hátrányos tulajdonságait, különösképpen azt, hogy magas hőmérsékleten a vízben oldódó polimerek degradálódnak [14]. A nanotechnológia ezekre a problémákra kínálhat megoldást. Bármely részecske

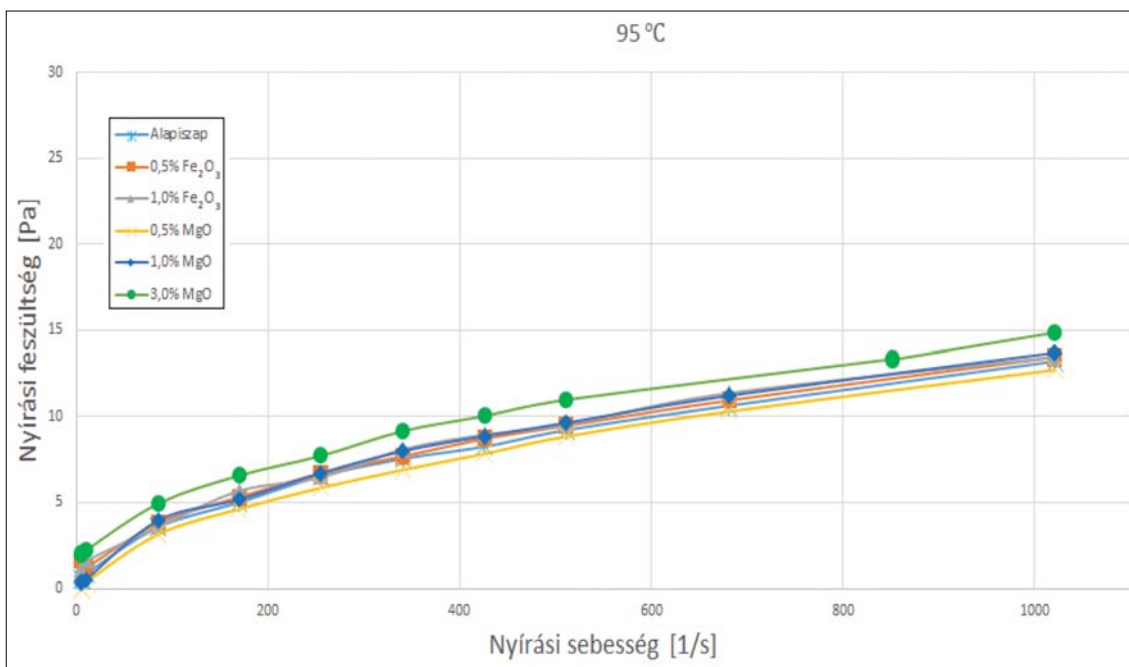
nanorészecskének minősül, melynek egy vagy több 100 nm-es vagy annál kisebb dimenziója van. Jelentőségük a nanorészecskék egyedi nagy felszín-térfogat arányukban rejlik, ami miatt nőnek a felszíntől függő anyagtulajdonságok [15]. A nanorészecskéknek a fluidumokban való szuszpenzióját nanofluidumoknak nevezzük. Ezek stabilak a nanorészecskék élénk Brown-féle mozgása révén, azonban a magas aktivitásuk miatt hajlamosak az agglomerációra [16]. A szilárd anyagoknak általánosságban nagyobb a hővezetőképességük, mint a folyadékoknak. A folyadékok hővezetőképessége növelhető fémpor hozzáadásával [17]. Ez az elképzelés indította meg a nanorészecskék használatát a fluidumok hővezetőképességének növeléséhez. Ebből kifolyólag ez a paraméter felelős leginkább a megnövelt hőtranszferért. A jelenlegi tanulmányok témája a nanorészecskék használata a mélyfúráshoz kapcsolódó problémák megoldásához, melybe beletartozik a fúrócső megszorulása, az iszapvesztés és a sűrűlódás is. Ilyen jellegű vizsgálatok viszonylag elterjedtek [18]. Païman and Al-Anazi [19] például megfigyelte, hogy a fekete nanokarbon-részecskék hozzáadása a fúrási folyadékhoz csökkenti az iszaplepleny vastagságát növekvő nyomás és hőmérséklet mellett, ebből kifolyólag lecsökkenti a fúrócső megszorulásának lehetőségét. Hasonló megfigyeléseket végzett Bedard et al. [20], melyek szerint a szilikon-nanorészecskék csökkentik a sűrűlódási nyomásvesztéseket. Zakaria et al. [21] nanorészecskéket alkalmazott a fúrási folyadékokban és kimutatta, hogy jelentősen csökkent az iszaplepleny vastagsága. Li et al. [22] a vas-oxid nanorészecskék használatát vizsgálta, hogy a fúróiszap *in situ* viszkozitásához (μ) kontrollmérést biztosítson. A jelen tanulmányban felhasznált nanorészecskék WBM-ban, palainhibitorként való használatára irányuló vizsgálatok szerint a nanorészecskék csökkentik a vízleadást a palába. Ezáltal csökken a fúrólyuk instabilitási problémája [23], amivel igazolták a nanopolimerek fúrásban való használatának szerepét és jelentőségét, valamint hitelesítették használatukat. Riley et al. [24] bemutatta a nanoszilika WBM-ban való használatát, illetve annak kiváló reológiai tulajdonságait a palagáz-rezervoárokhoz. Sedaghatzadeh és szerzőtársai [25] megalapozták a WBM és OBM (= Oil Based Mud) termikus, elektromos és reológiai tulajdonságainak fejlesztését többrétű nanoszén alkalmazásával. Amanullah et al. [26] kimutatta, hogy a nanoalapú fúrási folyadék fontos szerepet játszik a sűrűlódási nyomásvesztések kontrollálásában. A nanofluidumok alkalmazhatóságának további hitelesítését számos egyéb szabadalom alapozta meg [27]. A nanofluidumok WBM-ban való használata járható útnak tűnik, hogy megtartsuk az iszapok kedvező reológiai tulajdonságait HPHT környezetben.

A megfelelő nanofluidumok kifejlesztése megfelelő diszperziós közegre kíván meg, melynek kompatibilisnek kell lennie az adott rezervoárral, ahol a kompatibilitás a fentebb említett mikrotenyezőkre függvényében jellemezhető. Amennyiben megfelelő geológiai információval bírunk, például a hazai fúrásos folyadékok használatával kapcsolatban, akkor képesek lehetünk az adott tárolói környezethez legjobban viszonyuló fúrásos folyadék előállítására. Ahogy a biopolimerek, akárcsak a

xantán gumi (XG) vagy a guar gumi (GG) (mint reológiai módosítók, fúrásos folyadék-adalékanyagok, emulzióstabilizátorok és fluidumvesztés-szabályozók) az olaj- és gáziparban való alkalmazásuk miatt ismertek. Az XG sajátos reológiai tulajdonságokat biztosít: erős nyírásra vékonyodó karakter, amely viselkedés a merev polimerláncok komplex hálózatának tudható be. A XG és GG alkalmasak a stabilizált vasalapú nanofluidumok termelésére.



2. ábra. Az alapiszap és a nanofolyadékok folyásgörbéi 25 °C-on



3. ábra. Az alapiszap és a nanofolyadékok folyásgörbéi 95 °C-on

A fúrási folyadék polimerkomponensének mint bázisfluidumnak a használata jobb eloszlást biztosít a fúrási folyadék összetételében, és lehetővé teszi, hogy kiküszöböljük a nanofluidum-bázis hatását.

Jelen munkában, az elkészített Fe_2O_3 és MgO (50 nm) nanorészecskéket használtunk fel a WBM-ban. A nanofluidumokat 0,5, 1,0 és 3,0 wt%-os koncentrációval készítettük. Reológiai méréseket végeztünk rajtuk, hogy megértsük a nanofluidumok a WBM reológiai tulajdonságaira gyakorolt hatásait különböző hőmérsékleteken (25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95 °C). Az 50 nm-nél kisebb méretű és 97%-nál nagyobb tisztaságú Fe_2O_3 és MgO nanorészecskék a projekt keretein belül kerültek megvásárlásra közbeszerzési eljárással. A vizsgálathoz egy ultrahangos tartályt alkalmaztunk (amely 25 kHz-es frekvencián és 450 W teljesítménnyel üzemel). Az ultrahangos készülék behatási ideje egy óra hossza volt mintánként [28]. A NWBM-on végzett összes vizsgálat (reológiai, termikus és elektromos) a nanofluidumok elkészítésével egy napon készült, hogy jobb stabilitást és diszperziót érjünk el a WBM-ben [29]. A reológiai paraméterek mérését egy feszültséggel szabályozott légekuplingos reométerrel (Malvern Bohlin Gemini HR Nano Rheometer) végeztük. A fúrási tevékenység során a fúrási folyadékok a mélységgel egyre magasabb nyomásnak és hőmérsékletnek vannak kitéve. A nyomás és hőmérséklet WBM-re gyakorolt hatásai ellentétesek, a növekvő hőmérséklet hatására a fúrási folyadékok viszkozitása csökken a termikus expanszió

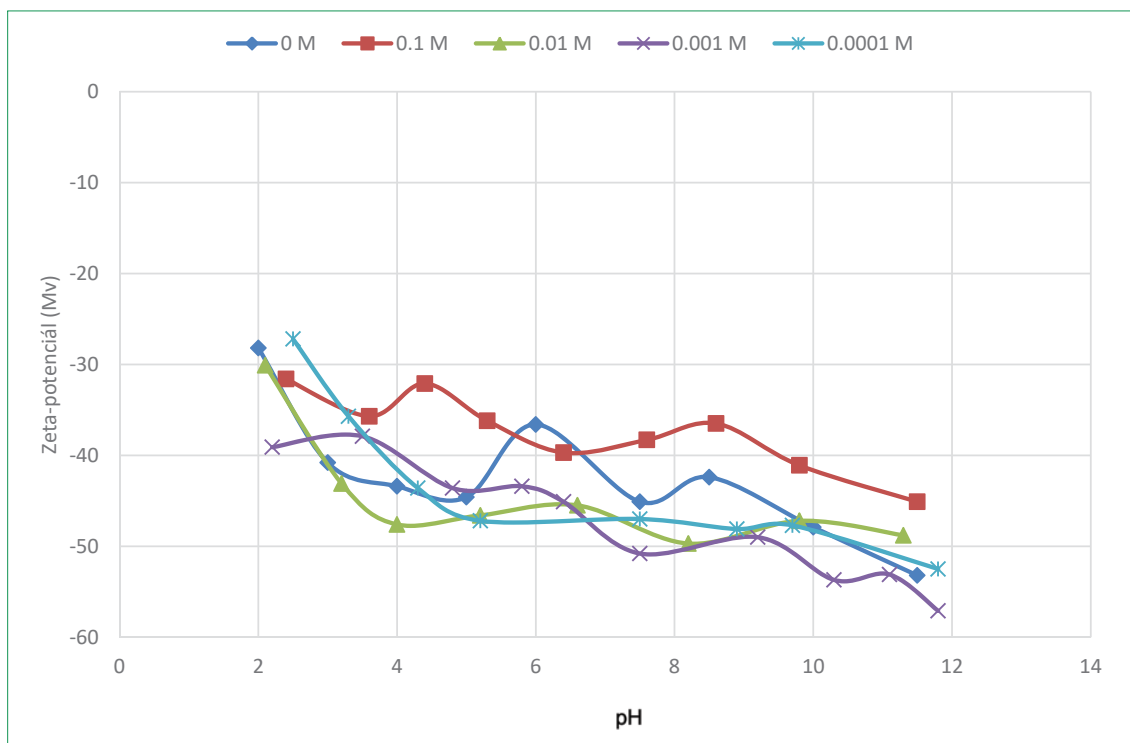
következtében, míg a kompresszió miatt a növekvő nyomás hatására nő a viszkozitás.

Az alábbi ábrákon (2., 3. ábra) láthatóak a különböző hőmérsékleteken kapott folyásgörbék. A hőmérséklet növekedésével természetesen a viszkozitás csökken az alapiszap és a nanofolyadékok tekintetében egyaránt, továbbá a folyásgörbék lefutása is hasonló a vizsgált hőmérsékleteken. Azonban megfigyelhető, hogy 25 °C-on jelentős eltérés mutatkozik a vizsgált folyadékok viszkozitása között, de ezek a különbségek a hőmérséklet növekedésével csökkennek. A hőmérsékleti vizsgálatok 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 és 95 °C-on zajlottak, azonban ebben a tanulmányban csak a két szélső érték vizsgálati során kapott ábrák kerülnek bemutatásra.

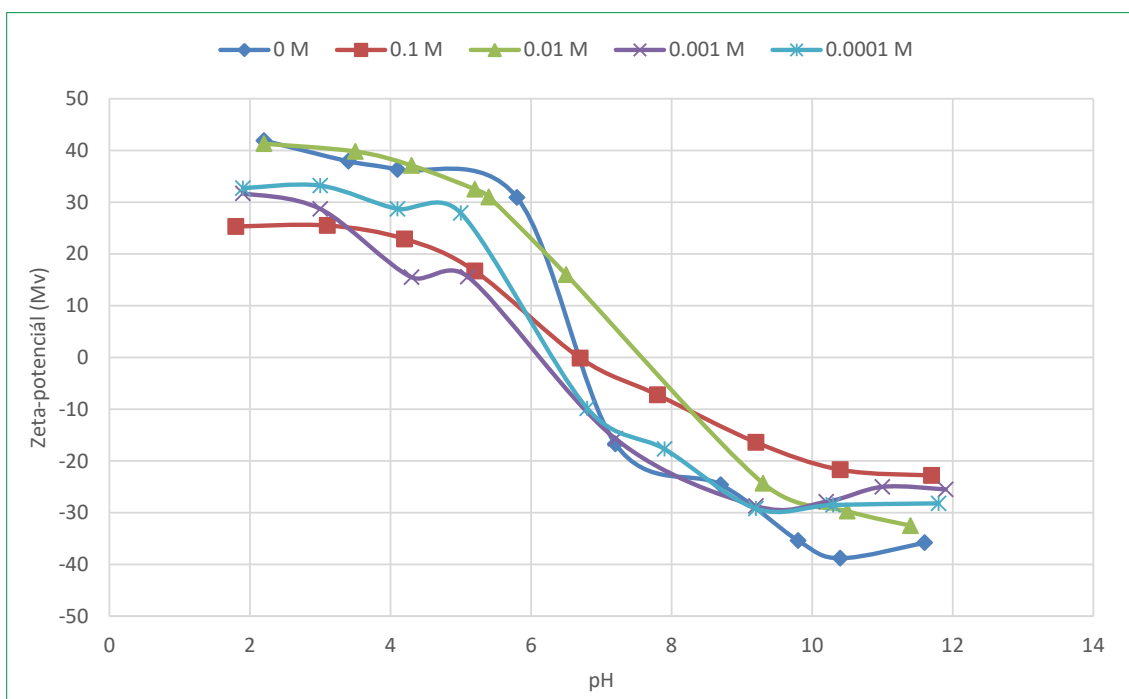
Az 1,0 illetve a 3,0 wt%-os nano-MgO-t tartalmazó folyadékok viszkozitása jóval nagyobb, mint az alapiszap viszkozitása. Azonban a 0,5 wt%-os nano-MgO-t tartalmazó folyadék kevésbé viszkózus, mint az alapiszap. Jól látható, hogy ez a tulajdonság a hőmérséklet növekedésével sem változik. A vasoxid tekintetében megállapítható, hogy az alapiszaphoz adagolt nanoanyagok hatására kismértékű viszkozitás csökkenés történt.

Bentonit szuszpenzió stabilitásának vizsgálatai

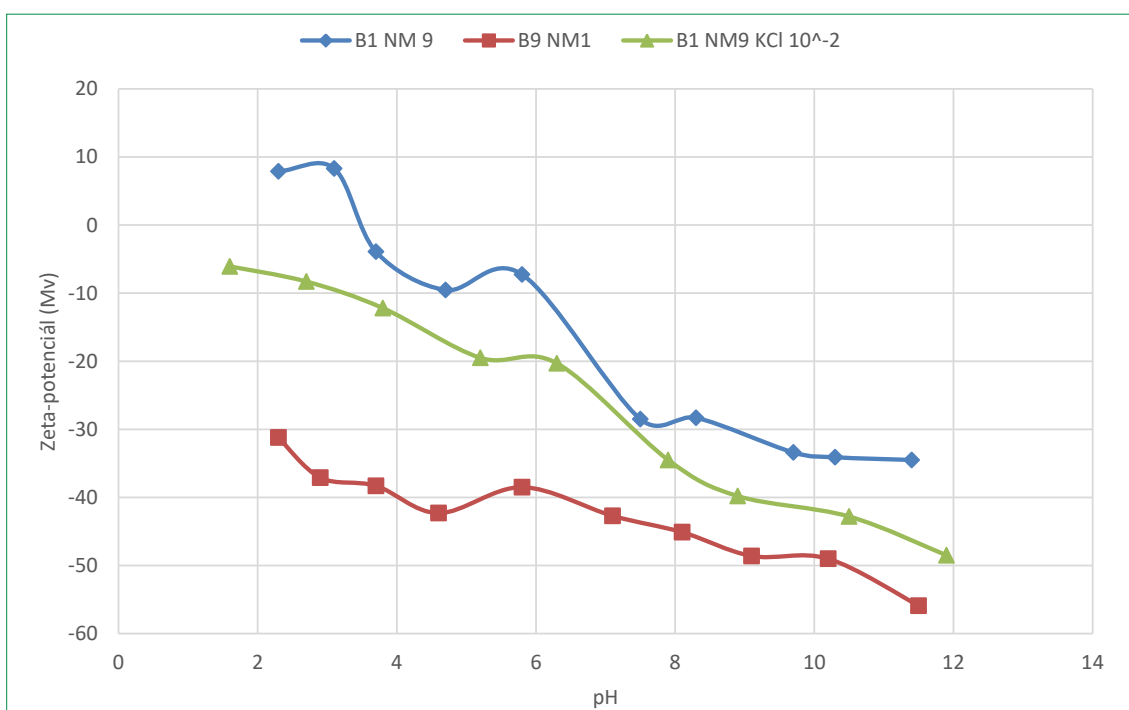
A zéta-potenciál vizsgálatokhoz kapcsolódó első kísérleti sorozatainkban a bentonit szuszpenzió stabilitását vizsgáltuk különböző sótartalom és pH mellett (4. ábra). A bentonit részecskék minden sótartalom és



4. ábra. Bentonit KCl-oldatban, a zeta-potenciál változása a pH függvényében



5. ábra. Magnetit KCl-oldatban, a zeta-potenciál változása a pH függvényében



6. ábra. Bentonit-magnetit szuszpenzióelegyek, a zeta-potenciál változása a pH függvényében

pH mellett, nagyfokú kolloidikai stabilitást, azaz nagy abszolút értékű (negatív) zeta-potenciált mutatnak. 0,1 M, azaz nagyobb KCl-tartalom mellett valamilyen ez az érték csökken, melynek oka a kettősréteg zsugorodása a nagyobb ionerősség miatt. Erősen savas pH mellett a pozitív hidrogénionok okoznak némi stabilitáscsökkenést, de ez nem említhető jelentősnek.

A nanomagnetit részecskék önmagukban pozitívan töltött felületűek. Zeta-potenciáljuk is pozitív

savas és semleges közeli tartományban. Semleges és különösen lúgos pH esetén azonban megfigyelhető az ún. áttöltődés jelensége (5. ábra), azaz a zeta-potenciál negatív értéket vesz fel. Semlegeshez közeli pH-nál a rendszer kolloidikailag nem stabil, míg savas és erősen lúgos tartományban igen. A sótartalom a pH-hoz képest kevésbé befolyásos: a zeta-potenciál-görbe csak 0,1 M koncentrációnál laposodik el az EKR zsugorodásának megfelelően.

Különböző arányú magnetit–bentonit elegyeket vizsgáltunk hozzáadott sótartalom nélkül (6. ábra). Megfigyelhető volt, hogy kis mennyiségű bentonit is képes a magnetitrészecskét stabilizálni, aminek oka, hogy sokkal nagyobb a felületi töltéssűrűsége, mint a magnetitnek. Még a B3–M7 aránynál sem volt megfigyelhető az áttöltődés, csak a tiszta magnetit bizonyult pozitívnak savas tartományban.

Ezt követően érdemes volt megvizsgálni azt az esetet, mikor a rendszerben 9 rész magnetit és 1 rész bentonit található. Ekkor már látszik, hogy van elegendő pozitív töltés a negatív kompenzálásához, valamint kimondható, hogy a rendszer csak erősen lúgos tartományban stabil. 0,01 M KCl adagolása minden esetben csökkentette a zeta-potenciál értékét (erősen savas tartományban sem volt már áttöltés), a lúgos tartományban pedig alacsonyabb pH-nál stabilizálódott a rendszer.

A magnetit–bentonit elegyek zeta-potenciál görbéinek lefutását vizsgálva különböző sótartalom mellett a trendek minden esetben hasonlóan alakultak. A magnetit mindenhol áttölt savas pH-nál, csak lúgos erősen lúgos tartományban stabilizálódik újra. Megállapítható, hogy minél alacsonyabb a sótartalom, a stabilizálódás annál kisebb pH-nál következik be (a sótartalom hatása tehát ismét hozza a fentebb már írt EKR zsugorításra visszavezethető trendet). A többi elegy kolloidkailag minden pH és sótartalom mellett stabilis. Érdekes megfigyelés, hogy minden esetben a 0,01–0,001 M sótartalom valamivel kifejezettebb stabilitást (negatívabb zeta-potenciált) mutatott, mint a 0,0001 M KCl-tartalom. A többi stabilis, 10^{-2} M – 10^{-3} M értékeknél stabilisabbak, mint 10^{-4} M sóoldatban. A legstabilisabb a tisztán bentonitot tartalmazó szuszpenzió volt, az elegyek között kisebb különbség adódott csak.

Összefoglalás

Az elmúlt évtizedekben a növekedő népesség, iparosodás és a fejlődő lakhatási körülmények révén nőtt a kőolaj és a földgáz iránti igény. Sajnos számos termelő olajmező kezd kimerülni, ami a termelés visszaesését eredményezheti. Az új olajmezők feltárása és fejlesztése komplex rezervoárkörnyezetben valósul meg – például magas nyomású és magas hőmérsékletű (HTHP) környezetben – vagy mélyebb offshore régiókban. Ebből adódóan kihívást jelent a fűrészi folyadékok tervezése. Számos fűrészi folyadéktípus használatos a művelet során, például víz- (WBM) vagy olajbázisú (OBM), melyekhez számos adalékanyag adható. Az iszap típus megválasztása alapvetően befolyásolja annak viselkedését a fűrészi művelet alatt. Elsőként olajbázisú iszapot használtak a kedvező kenési tulajdonságok végett. Ez a rendszer lyukfalszabályozást, alacsony ellenállást, kiváló fluidumveszte-

ség-szabályozást és iszaplepeny-minőséget, a lyuktalp tisztításához megfelelő reológiai tulajdonságokat és hőmérsékletstabilitást biztosít [30]. Hátrányként jelentkeznek azonban a magas költség, környezeti korlátozottság, egészségügyi és biztonsági gondok [31], ezért egyre nagyobb igény mutatkozik a vízbázisú folyadékok fejlesztésére. A növekvő lyuktalpi hőmérséklet miatt újszerű anyagok felhasználása válik szükségessé. Így a jelen tanulmányban ilyen újszerű nanoanyagok kerültek felhasználásra.

A mérésekből kiderül, hogy egy adott tárolóhoz fejlesztett folyadékhoz adalékolt nanoanyagok típusa és mennyisége is befolyásolja az adott folyadék viszkozitását, ami közvetlen hatással van a folyadék szivattyúzhatóságára. Ez azt jelenti, hogy például a 3,0 wt%-os Fe_2O_3 fűrészi folyadék jobb fűradékkiszállítási tulajdonsággal rendelkezik, azonban jelentős erő szükséges a folyadék áramoltatásakor. Azt is figyelembe kell venni, hogy ilyen esetekben nő a súrlódási nyomásvesztés, tehát a fűrészyuk mélyítése közben nő a lyuktalpra ható erő is. Ezzel további túlegyensúlyozás történik, fokozva a differenciális megszorulás esélyét.

A felületi funkciós csoportoknak köszönhetően a kőzetek főbb tulajdonságai jelentősen megváltozhatnak amikor a kőzetfelszín folyadékkal érintkezik. Mindennek következtében a bonyolult pórusszerkezetek, a fejlett nanopórusok és a különféle mikroszkopikus erők jelentős hatást gyakorolnak a nedvesíthetőségre, ezáltal a tároló tulajdonságait nagymértékben befolyásolják, mindezt figyelembe véve célszerű tanulmányozni a különböző koncentrációjú sók által kifejtett hatást. Kutatásaink során mind a különböző nanoanyagok jelenléte, mind a rendszerben jelen lévő specifikus anyagok hozzáadásának hatását vizsgáltuk az alábbiak szerint.

Vizsgálataink során kimutattuk, hogy a nagy koncentrációban jelen lévő sók a zeta-potenciál változásra jelentős hatást gyakorolnak, és az általuk kifejtett hatást elsősorban a nagy ionerősség következtében a részecskék felületén fellépő elektromos kettősréteg zsugorodására vezettük vissza. Az általunk vizsgált specifikus anyagok esetében a felületi nedvesedés és a zeta-potenciál között fennálló kapcsolatra vonatkozóan megállapítottuk, hogy szabályszerűség figyelhető meg.

A méréseink során megállapítást nyert továbbá, hogy egy adott tárolóhoz fejlesztett folyadékhoz adalékolt nanoanyagok típusa és mennyisége is befolyásol(hat)ja az adott folyadék viszkozitását, ami közvetlen hatással van a folyadék szivattyúzhatóságára. Ez azt is jelenti, hogy figyelembe kell venni a növekvő súrlódási nyomásvesztéset, tehát a fűrészyuk mélyítése közben nő a lyuktalpra ható erő is. Ezzel további túlegyensúlyozás történik, fokozva akár a differen-

ciális megszorulás esélyét. Vizsgálatainkból az is kiderül, hogy kis mennyiségű nanoanyag használata jelentős változást okoz a kezdeti áteresztőképességben, ami alapvetően befolyásolja egy kút termelő kapacitását is.

Bentonit szuszpenzió stabilitásának vizsgálata során elektrokinetikai méréseket végeztünk, vizsgáltuk a pH hatását, az elektrolitkoncentráció hatását, továbbá a szulfát ko-ionok hatását a szuszpenziók elektromos vezetőképességére. Mindezen túl a bentonitok zéta-potenciál-változásának vizsgálatát elvégeztük sóoldatok jelenlétében, figyelembe véve az elektrolitkoncentráció hatását, valamint a bentonit szuszpenzió elektrokinetikai potenciáljának változását a liotróp sorok adagolásával.

Nanomagnetit-bentonit elegyek vizes közegű diszperz rendszereinek zeta-potenciáljának vizsgálata során az alkálifém sók hatása és az elektrolitkoncentráció hatása került elemzésre.

Különböző típusú liofil és liofób kolloiddiszperziók elektromos felületi tulajdonságai is vizsgálat alá kerültek, ahol a liotróp sorok érvényessége került értékelésre az elektrokinetikai potenciál, illetve az elektromos felületi vezetés függvényében.

Általánosságban elmondható, hogy mind a zeta-potenciál-, mind az elektromos vezetőképesség-adatok korrelálthatók a Hofmeister-sorban meglévő ionsugár-, mobilitás-, ellenion-hidratációs fokban mutató különbségekkel. Ezeket a változásokat azzal magyarázhatjuk, hogy különbségek vannak az alkálifém-ionok az EKR diffúz és sűrű részében való elhelyezkedését illetően.

A liofil és liofób részecskéket tartalmazó szuszpenziók relatív vezetéseinek viselkedése demonstrálja az elektromos kettősréteg polarizációja (felületi vezetőképesség) hatásának csökkenését a Hofmeister-sorban a Li^+ -tól a Cs^+ felé haladva. A részecskék elektromos térben megfigyelt viselkedése, azaz mind az elektrokinetikai potenciál, mind a felületi vezetőképesség változásai a liotróp sorban korrelálnak az alkálifém-ellenionok sugarának, mozgékonyságának változásaival. Ezek a változások jól magyarázhatók az alkálifém-ionok különböző eloszlásával az elektromos kettősréteg diffúz és tömör (Stern-) rétegében.

Zéta-potenciál- és a peremszögértékek vizsgálata során az elsődleges cél a felület nedvesíthetőségével kapcsolatos összefüggések feltárása volt a cél, a vizsgálatok során megállapítást nyert, hogy minél kisebb a peremszög érték, azaz minél jobb a felület nedvesíthetősége, annál nagyobb zeta-potenciál-értékeket kapunk.

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.



IRODALOM

- [1] Zákányiné Mészáros R., Jobbik A. et al. (2018): Electrosurface properties of Na-bentonite particles in electrolytes and surfactants solution, Elsevier Clay Science, Vol. 178. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105127>
- [2] Zejiang J., Zhengfu N., et al. (2021): 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, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108798>
- [3] Khanmohammadi M., Garmarudi A. G., et al. (2012): Characterization of petroleum-based products by infrared spectroscopy and chemometrics, TrAC Trends in Analytical Chemistry, Vol. 35, pp. 135–149. ISSN 0165-9936, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2011.12.006>
- [4] Fan F., Cong Q., et al. (2020): A novel thermal efficiency analysis on the thermo-hydraulic performance of nanofluids in an improved heat exchange system under adjustable magnetic field, Applied Thermal Engineering, Vol. 179, 115688, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115688>
- [5] Younsoo B., Kazunori K. (2009): Intelligent polymeric micelles from functional poly(ethylene glycol)-poly(amino acid) block copolymers, Advanced Drug Delivery Reviews, Vol. 61(10), pp. 768–784, ISSN 0169-409X, <https://doi.org/10.1016/j.addr.2009.04.016>
- [6] Maghzi A., Mohammadi S., et al. (2012): Monitoring wettability alteration by silica nanoparticles during water flooding to heavy oils in five-spot systems: A pore-level investigation, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 40, pp. 168–176, ISSN 0894-1777, <https://doi.org/10.1016/j.expthermfluidsci.2012.03.004>
- [7] Tiraferrri A., Kang Y., et al., (2012): Highly Hydrophilic Thin-Film Composite Forward Osmosis Membranes Functionalized with Surface-Tailored Nanoparticles, ACS Applied Materials & Interfaces 4(9), 5044–5053, DOI: 10.1021/am301532g

- [8] *Alizadeh M., Hosseinzadeh Kh., et al.* (2019): Solidification acceleration in a triplex-tube latent heat thermal energy storage system using V-shaped fin and nano-enhanced phase change material, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 163, 114436, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114436>
- [9] *Schoch, Reto B., et al.* (2008): Transport phenomena in nanofluidics, *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 80(3), pp. 839–883, American Physical Society, DOI: 10.1103/RevModPhys.80.839,
- [10] *Kong, Xiangling , et al.* (2010): Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry – An Overview of the Recent Progress, Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2010, <https://doi.org/10.2118/138241-MS>
- [11] *Hoelscher, Price K., et al.* (2012): Application of Nanotechnology in Drilling Fluids, In: SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, Noordwijk, The Netherlands, June 2012, doi: <https://doi.org/10.2118/157031-MS>
- [12] *Friedheim J., Young, S., et al.* (2012): Nanotechnology for Oilfield Applications – Hype or Reality? In: SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, Noordwijk, The Netherlands, June 2012, DOI: <https://doi.org/10.2118/157032-MS>
- [13] *Peng C., Feng, Wenqian, Y., et al.* (2008): Offshore Benign Water-Based Drilling Fluid can Prevent Hard Brittle Shale Hydration and Maintain Borehole Stability, In: IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, August 2008, <https://doi.org/10.2118/114649-MS>
- [14] *William J. K. M., Ponmani S., et al.* (2014): Effect of CuO and ZnO nanofluids in xanthan gum on thermal, electrical and high pressure rheology of water-based drilling fluids, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 117, pp. 15–27, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.03.005>
- [15] *Lu A.-H., Salabas E., et al.* (2007): Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization, and Application. *Angewandte Chemie International Edition*, 46, 1222–1244. <https://doi.org/10.1002/anie.200602866>
- [16] *Saterlie M., Sahin H., et al.* (2011): Particle size effects in the thermal conductivity enhancement of copper-based nanofluids. *Nanoscale Res Lett* 6, 217. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-217>
- [17] *Zhang X., Li Q., et al.* (2007): Ultrastrong, Stiff, and Lightweight Carbon-Nanotube Fibers. *Adv. Mater.*, 19, 4198–4201. <https://doi.org/10.1002/adma.200700776>
- [18] *Amanullah Md., Ashraf M. Al-Tahini* (2007): Nano-Technology – Its Significance in Smart Fluid Development for Oil and Gas Field Application., Paper presented at the SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium, Al-Khobar, Saudi Arabia, May 2009, <https://doi.org/10.2118/126102-MS>
- [19] *Bedaiwi E., et al.* (2009): Polymer injection for water production control through permeability alteration in fractured reservoir. *Nafta*, 60(4), pp. 221–231.
- [20] *Bédard M. F., et al.* (2009): On the mechanical stability of polymeric microcontainers functionalized with nanoparticles, *Soft Matter*, 5(1), pp. 148–155
- [21] *Mohammad F. Z., Husein M., et al.* (2012): Novel Nanoparticle-Based Drilling Fluid with Improved Characteristics. Paper presented at the SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, Noordwijk, The Netherlands, June 2012, <https://doi.org/10.2118/156992-MS>
- [22] *Li S., Samuel O., et al.* (2016): Development of New Smart Drilling Fluids Using Nano-Materials for Unconventional Reservoirs, In: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2016, <https://doi.org/10.2118/183509-MS>
- [23] *Akhtarmanesh S., Ameri Shahrabi M.J., et al.* (2013): Improvement of wellbore stability in shale using nanoparticles, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 112, pp. 290–295, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.11.017>
- [24] *Riley M., Stamatakis, E., et al.* (2012): Wellbore Stability in Unconventional Shale – The Design of a Nano-particle Fluid. In: SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, Mumbai, India, March 2012, <https://doi.org/10.2118/153729-MS>
- [25] *Sedaghatzadeh M., Khodadadi A., et al.* (2012): An improvement in thermal and rheological properties of water-based drilling fluids using multiwall carbon nanotube (MWCNT), *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 1(1): 55–65.
- [26] *Al-Arfaj A., Mohammad K., et al.* (2011): Preliminary Test Results of Nano-based Drilling Fluids for Oil and Gas Field Application. Paper presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, March 2011, <https://doi.org/10.2118/139534-MS>
- [27] *Quintero L., Brege J. J., et al.* (2012): Reducing Fracture Propagation During the Drilling Process by Altering Wettability. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, October 2012, <https://doi.org/10.2118/134032-MS>
- [28] *Fedele L., Colla L., et al.* (2011): Experimental stability analysis of different water-based nanofluids. *Nanoscale Res. Lett.* 6, 300. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-300>
- [29] *Ponmani S., William J. K. M., et al.* (2014): Formation and characterization of thermal and electrical properties of CuO and ZnO nanofluids in xanthan gum, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 443, pp. 37–43, ISSN 0927-7757, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.10.048>
- [30] *Ozbayoglu M. E., Saasen A., et al.* (2008): Effect of Pipe Rotation on Hole Cleaning for Water-Based Drilling Fluids in Horizontal and Deviated Wells. Paper presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, August 2008, <https://doi.org/10.2118/114965-MS>
- [31] *Foxenberg W. E., Ali S. A., et al.* (2008): Field Experience Shows That New Lubricant Reduces Friction and Improves Formation Compatibility and Environmental Impact. Paper presented at the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, February 2008, <https://doi.org/10.2118/112483-MS>

A hidrogén porózus közegben történő tárolása



DR. LAKATOS ISTVÁN
okl. vegyészmérnök, az MTA rendes tagja

DR. VADÁSZI MARIANNA
okl. gázmérnök, okl. hidrogeológus mérnök, egyetemi docens



DR. SZUNYOG ISTVÁN
okl. olaj- és gázmérnök, egyetemi docens

GALYAS ANNA BELLA
okl. olaj- és gázmérnök, egyetemi tanársegéd
Miskolci Egyetem, Kőolaj és Földgáz Intézet

Bevezetés

Napjaink egyik legsürgetőbb problémája az éghajlatváltozás megfékezése, amelynek egyik jelentős forrása az energiatároláshoz köthető üvegházhatású gázok légkörbe jutása. Európai szinten is erősödik az igény egy olyan, megújuló forrásból származó energiahordozóra, amely a hagyományos fosszilis tüzelőanyagok helyettesítésére részben, vagy teljesen alkalmas lehet. A hidrogén erre a célra alkalmasnak ígérkezik. A megújuló forrásból származó hidrogén egyik legnagyobb előnye a jelenleg alkalmazott fosszilis tüzelőanyagokkal szemben, hogy eltüzelése során csupán vízgőz keletkezik, ezzel jelentősen csökkentve a légkörbe kerülő CO_2 -kibocsátás mértékét.

Az Innovációs- és Technológiai Minisztérium 2020 januárjában megjelent „Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig” című közleménye szerint a meglévő földgázinfrastruktúra „szezonális energiatárolóként” szolgálhat a jövőben [1]. Ez előre vetíti azt a jövőképet, mely szerint a villamos energia- és hőtárolási megoldások egyik alternatívája lehet az energia „molekula formában” történő tárolása, amely ezáltal hosszabb ideig tárolható, és a felmerülő igényekhez igazodva használható fel. A már a piacokon is elérhető power-to-gas (P2G) technológia alkalmazásával fotovoltaiikus úton állítható elő a hidrogén, valamint szén-dioxid segítségével metán, amely így a földgázhálózatba kerülhet közvetlen betáplálásra, kiküszöbölve a napi és akár az éves szezonális kéréseket [2].

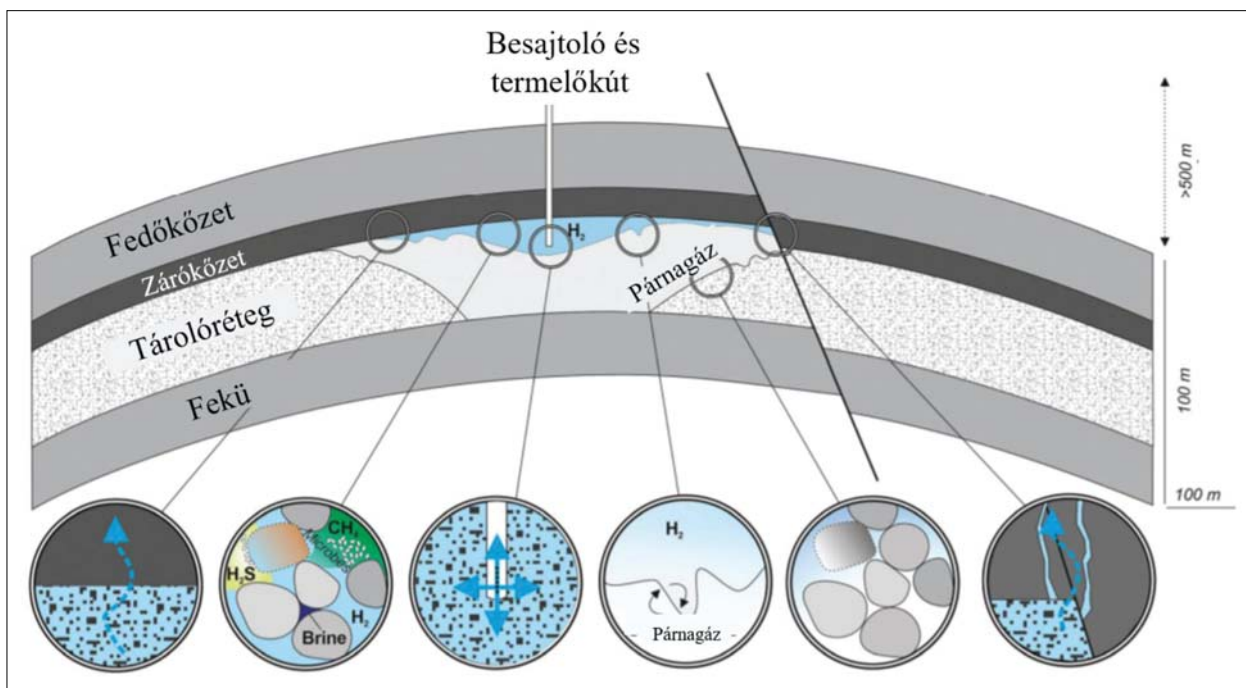
A tárolókban megvalósuló hidrogéntárolás lehet az egyik megoldása a megújuló energiatermelés legfőbb akadályainak leküzdésére, mint pl. az időszakszerűség, valamint szezonális és földrajzi korlátok. A sőkavernák hidrogéntárolásra való alkalmazása nem

újkeletű, már több évtizedes múltat tekint vissza [3]. A porózus tárolóréteg hidrogén tárolásra való alkalmazásának vizsgálata jelenleg is számos projekt középpontjában áll a nagyvilágban. A következőkben a porózus közegben megvalósuló hidrogéntárolás előtt álló kihívások kerülnek bemutatásra, amelyben a szerzők jelentősen támaszkodnak az „Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges” c. publikációra [4].

A hidrogén jellemzői

A hidrogén tömegegységre vonatkoztatott energiasűrűsége nagyobb (~120 MJ/kg), mint a szénhidrogéneké. Kis sűrűsége ($0,084 \text{ kg/m}^3$ 20 °C hőmérsékleten és 0,1 MPa nyomáson) következtében a földgázhoz képest nagyobb térfogati tárolókapacitásra lesz szükség ugyanazon energiamennyiség tárolásához [5]. A hidrogén porózus tárolórétegbe történő injektálása kiszorítja a rezervoár fluidumokat, ez összetett többfázisú áramlási képhez vezet, amelyeket a folyadék és a közeg tulajdonságai (pl. folyadékfázis viszkozitása, sűrűsége, összenyomhatósága, és a porózus közeg permeabilitása, porozitása) és a folyadékkellettség, valamint relatív permeabilitás közötti funkcionális kapcsolatok vezérelnek.

A tiszta hidrogén tulajdonságai jól ismertek, de a porózus közegbeli többfázisú tulajdonságok, amelyek nélkülözhetetlenek a felszín alatti hidrogén tárolásához, még mindig bizonytalanok. Tekintettel a hidrogén kritikus hőmérsékletére és nyomására (-239,97 °C, 1,297 MPa), a hidrogént gázfázisban tárolják. Az ideális gáztörvény alkalmas a hidrogén kisnyomású viselkedésének leírására, viszont nagyobb nyomáson bizonytalanságok merülnek fel, bonyolultabb állapotegyenletek szükségesek az áramlási



1. ábra. Hidrogén tárolása porózus közegben [4]

tulajdonságok pontos jellemzéséhez. A nyomás növekedésével a hidrogén sűrűsége nő, ami a hidrogén tárolási hatékonyságának növekedését eredményezi. A hidrogén sűrűsége a rétegvíz sűrűségéhez képest kisebb, a felhajtóerő közvetlenül a fedőkőzet alatt hidrogénsapka kialakulásához vezethet. A metánhoz és a szén-dioxidhoz képest a hidrogén kis viszkozitása, annak értéke a tároló nyomásán és hőmérsékletén minimálisan változik. A rezervoármérnöki tervezési modellek esetén alkalmazott viszkozitási modellek a legtöbb nem poláros gázra megfelelnek, hidrogén esetén azonban gyakran alternatív egyenletek nyújthatnak megoldást [6].

A hidrogénnek viszonylag magas a hővezető képessége is, amely mind a nyomás, mind a hőmérséklet növelésével nő, így nagy mélységű tárolási körülmények között (pl. kb. 2 km mélységben 65 °C-on és 20 MPa-nál [7]) a hidrogén majdnem háromszor jobban vezeti a hőt, mint a CH₄ és a CO₂. Más gázokhoz hasonlóan a vízben való oldhatóság a nyomás növekedésével nő, a hőmérséklet és a sótartalom növekedésével csökken. A hidrogén nem poláros jellege azonban korlátozza vízben való oldhatóságát, tiszta vízben a hidrogén oldhatósága körülbelül 0,14 mol/l (65 °C-on és 20 MPa-nál) [7], hasonlóan a CH₄ oldhatóságához és egy nagyságrenddel alacsonyabb, mint a szén-dioxidé, így nem okoz jelentős pH-változást. Ez azt jelenti, hogy az oldódás következtében elhanyagolható a hidrogénvesztés.

A rétegvízzel töltött porózus közegben a hidrogén áramlásának bizonytalanságai alacsony viszkozitásából és nagy diffúziós képességéből adódnak.

Alacsony viszkozitása nagy mobilitást eredményez, ami lehetővé teszi a rezervoár gyorsabb feltöltését vagy ürítését, ugyanakkor kevésbé kedvező más folyadékok, különösen a rétegvíz kiszorításához. Ez növeli a viszkozus ujjasodás, ún. „fingering” kockázatát, amely az ellenőrizetlen oldalirányú szétterülés miatt visszanyerhetetlen hidrogén üregeket eredményezhet. A kis molekulatömeg miatt a hidrogén magas diffúziója ellenére a becslések szerint a diffúzió vezérelte hidrogénvesztés a tároló élettartama alatt várhatóan 0,1–1,0% [8, 9].

A hidrogén áramlásának modellezéséhez meg kell érteni, hogy a hidrogén a rezervoárban hogyan befolyásolja a kőzet és a folyadék között fellépő dinamikus kölcsönhatásokat, amelyeket az 1. ábra is szemléltet. Különösen fontos a relatív permeabilitás és a kapillaris nyomás, ezért a víznedves porózus közegben a maradék hidrogén-telítettség, amely közvetlenül kapcsolódik a képződésben jelenlévő fázisok viselkedéséhez [10]. A maradék hidrogéntelítettség meghatározása különös jelentőséggel bír, mivel szabályozza a tárolt gáz vissza nem nyerhető részét, ami befolyásolja a művelet gazdasági megvalósíthatóságát. A maradék csapdázódást szabályozó kapillaris erők a kőzet felszívási és telítődési viselkedéséért felelősek, szabályozva ezáltal a relatív permeabilitást is. Meg kell jegyezni, hogy a relatív permeabilitás az idővel változhat a hidrogén besajtolási és kitermelési ismétlődő ciklusok eredményeként, amint azt a CO₂-áramlási kísérletek is mutatják. A triász homokkőben végzett kísérleti eredmények szerint a relatív permeabilitás és a kapillaris nyomás 5,5–10,0 MPa és 20–45 °C között

alig változik, ami arra utal, hogy a kapilláris nyomás szinte állandó a hidrogén–víz rendszerben ilyen körülmények között [11]. A változó körülmények és a különböző formációk, ideértve a hidrogéngáz-keverékek többfázisú áramlási tulajdonságait is, létfontosságúak az optimális termelési stratégiák meghatározásához.

A hidrogén-rétegvíz-kőzet geokémiai reakciói

A hidrogén porózus rezervoárba történő besajtolása hatással van a rétegvíz, az oldott gázok és a kőzetmátrix kémiai egyensúlyára. A fellépő geokémiai reakciók az alábbiakban felsorolt folyamatokat idézhetik elő:

- nagymértékű hidrogénvesztesség;
- H₂S-képződés esetén, a besajtolt hidrogén szennyeződése;
- a besajtolás nyomásának növekedése, illetve csökkenése ásványképződés és -oldódás következtében;
- egyes ásványok oldhatóságának mértéke újonnan képződött áramlási utakat nyithat meg a kőzetben, befolyásolva a rezervoár és a kőzet mechanikai tulajdonságait.

A geokémiai reakciók jelentősen befolyásolhatják, esetenként veszélyeztethetik a biztonságos és hatékony porózus közegben történő hidrogéntárolást. A rétegvízben oldott hidrogén közvetlenül nincs befolyással a rétegvíz pH-jára, azonban az eredetileg jelen lévő kémiai komponensekkel reagálhat. Az oldott szulfát már elősegítheti az oldódás/kicsapódás folyamatát.

A felszín alatti tárolás valószínűsíthető reakció típusai lehetnek a hidrogén hatására létrejövő redoxi-reakciók vastartalmú ásványi anyagokkal (hematit, goethit) vagy Fe³⁺-tartalmú agyagokkal és csillámokkal (mika) [12]. A hidrogén fogyasztására/fogyására számos biotikus folyamat ismert, ilyen a fent említett vas(III)-redukció, a metanogenezis, acetogenezis és a szulfátredukció.

Oldott kénvegyületekkel vagy kéntartalmú ásványokkal (pirit) hidrogénreakciók mehetnek végbe. A permeabilitás, porozitás, mechanikai tulajdonságok megváltozásán túl hidrogén-szulfid (H₂S) képződik, ami a tárolt hidrogén minőségét rontja. A redoxpotenciál és a rétegvíz pH-módosításával további folyamatokat vált ki a kőzet és a folyadék között, gyúlékony és mérgező jellege a tárolói infrastruktúrát is veszélyeztetheti. A franciaországi beynes-i városi gáztároló esetén figyeltek meg abiotikus piritredukció során fellépő H₂S-képződést [13].

Homokkő mintákon tároló körülmények között ($T = 40\text{--}100\text{ °C}$, $p = 100\text{--}200\text{ bar}$) vizsgálták a karbonát- és szulfátcement oldódását. A mérési eredmények hidrogén besajtolás után porozitás növekedést

mutattak. Hasonló kísérletek zajlottak tárolóréteg és fedőkőzet mintákon, melyek az agyagásványok hatásait kutatták. Mindkét kőzettípus esetén csökkent az átjárhatóság [14]. A kutatások kvarc és földpátokra irányuló kísérletei nem mutatták ki a hidrogén hatását ezen ásványokra.

A közelmúltban az irodalomban beszámoltak a hidrogén agyagásványok általi megkötéséről, ami fontos a porózus közegben történő hidrogéntárolási projekteknél. Ezek szerint az illit, klorit és a kaolinit jelenléte a kőzet ásványos összetételében a hidrogén csapódását okozhatja, bonyolítva a tárolási folyamatot [15].

Az európai jelentősebb felszín alatti hidrogéntároló rendszerek permian és triász homokkőben, illetve karbonátképződményekben találhatóak [16]. Magyarországon hidrogén tárolására alkalmas potenciális rezervoárok pannon körüli homokkő geológiai képződményekhez köthetők. Ezért van kiemelt jelentősége a geokémiai reakciók vizsgálatának, segítve a műszaki és gazdasági kérdések tisztázását.

A tárolóban és a kőzetben lejátszódó reakciók mértéke, a várható folyamatok valószínűsége és nagysága geokémiai adatbázis kifejlesztésével számszerűsíthető. Reális *in situ* körülmények között a potenciális tárolóhelyek közeteinek felhasználásával végzett kiegészítő áramlási kísérleteket kell végezni.

Mikrobiális növekedés a tárolóban

A hidrogéntárolás megvalósíthatósága szempontjából fontos megvizsgálni a szénhidrogén tárolás során felmerülő mikrobák jelenlétét és szaporodását. Számos tanulmány foglalkozott természetes koncentrációk esetén a folyamattal [17], kevésbé ismertek azok a hatások, amelyeket a várhatóan magas hidrogénnyomás gyakorol a felszín alatti mikrobiális rendszerre. Korlátozott számú tanulmány vizsgálta a hidrogénfeleslegnek kitett mikroorganizmusokat. Az eredmények azt mutatják, hogy a nyomás növekedésével nem növekszik a hidrogénáramlás, ami jelzi, hogy a hidrogénfelesleg és a standard körülmények között meghatározott hidrogén áramlási sebesség reprezentatív és alkalmazható a hidrogénfogyási arányok becsléséhez [18]. A hőmérséklet, a rétegvíz oldott anyag tartalma, a pH és a szubsztrátellátás a fontosabb paraméterek, amelyek a mikroorganizmusok potenciális hatását szabályozzák.

A tárolóhelyek biodegradációval történő hidrogénvesztésének meghatározása döntő fontosságú. Komoly bizonytalanságot okoz a felszín alatti mikroorganizmusok felszínen történő tenyésztetlensége a felszínről esetlegesen lejutó allohton organizmusok, a felszín alatti tápanyagellátás, valamint a nyomás hatása a mikrobiális anyagcserére [19]. A mikrobák által kiváltott hatás a tárolóban a hidrogén veszteség a me-

tánná vagy kén-hidrogénné történő átalakulása során. A metanogenezis archaea mikroorganizmusok és CO₂ jelenlétében, optimális körülmények között, 90 bar nyomáson és 30–40 °C hőmérséklet mellett megy végbe a felszín alatt [20].

A hidrogénben gazdag városi gáz tárolási műveletei során a beynes-i tárolóban nem észleltek hidrogénfogyást. A csehországi Lodobicében végzett 7 hónapos megfigyelés alatt 17%-os hidrogéncsökkenést egyidejűleg CO₂-fogyást és valószínűleg a metanogének okozta CH₄-növekedést regisztráltak [21]. A földgáz, hidrogén és szén-dioxid kombinált tárolását vizsgáló projektek (pl. Underground Sun Storage and Sun Conversion projektek Ausztriában; HyChico projekt Argentínában) is tapasztaltak mikrobiális hidrogénfogyasztást, az injektált hidrogén 3%-át alakítják a metanogének metánná [22]. Bár a tárolt gáz fűtőértékében javulást eredményez, ezzel a hidrogénvesztéssel az üvegházhatás romlik, így a hidrogéntárolás kockázata ártrendeződik.

A mikrobiális sűrűség növekedésével a mikrobiálisan képződött biofilmek vagy az ásványképződés a pórusok eltömődéshez, ezáltal a hidrogén besajtolhatóságának csökkenéséhez vezethet. A problémakör jól ismert a geotermikus energiahasznosításban és CO₂-tárolásban [23].

A hidrogénbesajtolás során a kút környezetét érintő pórus átjárhatósági modellezéssel történő megközelítései bizonyítják, hogy az oldalirányú gázáramlás javul, míg a vertikális áramlási sebesség csökken. A Sun Conversion és a HyChico projektek terepi adatai a pórusok elzáródására utaló jeleket nem mutattak.

Összességében a mikrobák miatti póruselzáródást alig vizsgálták részletesen, és további tanulmányokra van szükség a folyamat valószínűségének és súlyosságának felméréséhez a hidrogén tárolásának hosszú távú működése érdekében.

A tárolás integritásának geomechanikai szempontjai

A felszín alatti hidrogéntárolás során a besajtolás és kitermelés ciklikusan történik. Ez a kőzetmátrixban ciklikus nyomásváltozást eredményez és hatással lehet a tárolás integritására. A besajtoló kút környezetében a hideg, nyomás alatt lévő hidrogén kémiai, nyomás- és hőmérséklet-változásokat eredményezhet. Kisebb hőmérséklet-ingadozások tapasztalhatók a tárolótérben, összehasonlítva a CO₂-tárolással, ahol a Joule–Thomson-effektus és a kútkörzet egyidejű hűlése komoly kihívást jelent a tárolás integritása szempontjából [24].

A nyomásnövekedéssel együtt járó feszültségváltozás hatással van a hidrogén és a párnagáz mennyiségére, deformáció a nyomásváltozás területén kívül is bekövetkezhet. A tároló rétegei ciklikus pórus-

nyomás változásokat szenvednek a ki- és betárolás eredményeként, ami a tároló tényleges feszültségállapotában eredményez változást. Ezek az ingadozások és a közeli vetők a tároló kompakcióját okozhatják, ami csökkenti a porozitást, a folyadékáramlást, süllyedést, vetők újbóli aktiválódását eredményezi [25], szeizmikus mikrorengések kíséretében. Egy tárolótér alakváltozásának sebességét a feszültségváltozás sebessége szabályozza. A deformáció mértékét a pórusnyomás ciklikus változása, vagyis a hidrogén besajtolási és kitermelési ciklusának időtartama vezérli.

Erre a ciklikusan ismétlődő igénybevételre a magyarországi gáztároló rendszerek kútjai esetén is kiemelt probléma a kutak homok termelése. A tárolóréteg meggyengülése deformációt eredményezhet, amelyet az injektálás-termelés által kiváltott feszültségváltozások fokozhatnak. További tartós alakváltozást eredményezhetnek a kőzetalkotó szemcsék között lejátszódó kémiai folyamatok. A lejátszódó mechanizmusok lehetnek: a szemcsék közötti cementálás feloldódása, a szemcsehatáron belüli agyagásvány szorpciója/desorpciója, feszültségkorróziós repedés növekedés, az egyensúlyhiány okozta kristályosodás-oldódás vagy a szemcsék közötti sűrűlódás [26]. A folyamatokat a feszültségváltozás sebességén kívül az időtartam is befolyásolja, kúszó deformáció léphet fel még olyan időszakokban is, amikor nem változik a pórusnyomás. Amennyiben a folyamatok a vetőn belül játszódnak le, befolyásolják azok stabilitását és sűrűlódási viselkedését, potenciálisan befolyásolva a hidrogéntároló komplex gazdasági és szabályozhatósági kérdéseit. Bár a fent említett szemcseméret-mechanizmusok jól tanulmányozottak, a hidrogén ezek sebességére gyakorolt hatásáról keveset tudni.

Fontos megemlíteni az agyagtartalommal rendelkező rezervoárok esetén a hidrogén (duzzadó) agyagásványokba történő szorpciója során a kőzetben és a repedésekben a duzzadás által kiváltott feszültségváltozásokat. Bár a tipikus duzzadó agyagok (montmorillonit, laponit) [27] hidrogén-szorpciósi képessége fele, negyede, mint a szén-dioxid esetében, a kapcsolódó stressz-alakváltozás-szorpciósi viselkedés továbbra is problémát jelenthet a tárolókomplexum transzport folyamatára nézve.

A hidrogéntároló komplex élettartama alatt a száraz hidrogén ismételt injektálási ciklusai a rezervoár kiszáradásához vezethetnek, különösen a kimerült szénhidrogén-telepek esetében, amelyek főleg maradvízet tartalmaznak. Ezért az idő múlásával a mechanikai viselkedéshez és integráláshoz hozzájáruló folyamatok is megváltoznak. Egyrészt a potenciálisan kedvezőtlen kémiai reakciók idővel megállhatnak, másrészt az agyagok száradása és zsugorodása meg-

fordíthatja a vetők duzzadás által kiváltott elzáródását, és a szivárgási utak újbóli megnyitását eredményezheti [28].

A besajtolás, kitermelés stratégiájának optimalizálása

A felszín alatti hidrogéntárolás annak céljától függően változó besajtolási és kitermelési kapacitással jellemezhető. A földgázhoz képest a hidrogén áramlási sebességének nagyobbak kell lennie, hogy elkerülhető legyen a porózus közegben való diffúzió, mivel a hidrogén kisebb viszkozitással és nagy mobilitással rendelkezik. A nagyobb méretű fűrőlyuk-kialakítás mérsékelheti ezt a problémát [29]. További kérdést vet fel a hidrogén okozta ridegedés jelensége. Ennek elkerülése érdekében a fűrőlyuk szerelvényeinek kompatibilisnek kell lenniük a hidrogénnel, el kell viselniük a tárolás ciklikus nyomásváltozását is, amely akár a 140 bar értéket is elérheti. A fentiek miatt a korábbi földgázkutak nem javasoltak a hidrogén ki- és betárolására, átalakításuk jelentős többletköltséget jelenthet. Az áramlási sebesség nagy szerepet játszik az injektálás és a termelés során. Az alacsony besajtolási sebesség a gáz részecskékre szakadásához vezethet, ami több időt biztosít a hidrogén diffundálásához, beoldódásához és csapdázódásához. A nagy áramlási sebesség a gáz oldalirányú szétterülését és felfelé áramlását okozhatja a tároló rétegben. Ezért az áramlási sebesség optimalizálása javasolt, amit a talpnyomás, kapillaris belépési nyomás és a repesztési nyomás határoz meg. A probléma kezelésére megoldás lehet a „szelektív technológia” alkalmazása, amely két különálló, egy besajtoló és egy termelőkutat tartalmaz. A hidrogént a rezervoár aljára sajtolják az egyik kúton keresztül, míg a másik kút a réteg felső részéből termeli a gázt [20].

A nyomás csökkentése és ezáltal az injektívitás javítása érdekében a betárolási folyamat során Panfilov (2016) azt javasolta, hogy a tárolás kezdeti szakaszán egy ideig meg kell szakítani a besajtolást, növelve ezzel a tárolás hatékonyságát. Nagy termelési sebesség megválasztása gázkeveredést (gáz-gáz és gáz-víz) eredményezhet, ezáltal megnövekedhet a víztermelés, valamint a párnagáz termelése is megindulhat. Megfigyelhető azonban, hogy a nem kívánt víztermelés mennyisége az egymást követő ciklusokban csökken. A kitérő sebességét javasolt minden ciklusban optimalizálni, a hidrogéntermelés maximalizálása és a víztermelés minimalizálása érdekében. Katarzyna és Radosław (2019) tanulmánya feltárta, hogy a hidrogéntermelés és a hozzá kapcsolódó víztermelés 1–5 kg/s áramlási sebesség esetén nő. Az egymást követő be- és kitérő ciklusokban azonban a visszanyert hidrogén mennyisége nő, míg a termelt víz mennyisége csökken. Optimalizálták az

áramlási sebességet a tárolási művelet javítása érdekében, mely során 0,51 kg/s injektálási és 3 kg/s termelési sebesség értéket határoztak meg.

A biztonságos és hatékony tárolás biztosítása

A tárolás során bekövetkező nem kívánt gázvesztés súlyos gazdasági, biztonsági és környezeti károkat okozhat. Ennek a kockázatnak a minimalizálása érdekében a hidrogén tárolása során gondosan meg kell választani és ki kell értékelni a tárolás integritását, továbbá a ki- és betárolás műveleteit hidrogén monitoring rendszerekkel kell kiegészíteni.

A többi tüzelőanyaggal összevetve elmondható, hogy a hidrogén nem feltétlenül veszélyesebb [30]. Számos projekt vizsgálja a földgázellátó hálózatot, (pl. a H21 Spadeadam és a HyHouse), melyek kimutatták, hogy nem hordoz megnövekedett biztonsági kockázatot a földgázhoz vagy LPG-hez képest, mivel a tiszta hidrogén nem mérgező, nem maró és környezeti szempontból sem ártalmas. Azonban a szivárgáshoz kapcsolódó környezeti kockázatok korlátozottabbak, mint CH₄ és CO₂ esetén.

A monitoring rendszernek a föld alatti tárolási folyamat különböző aspektusait kell lefednie:

- ❑ a biztonságos, ellenőrizhető hidrogén besajtolási-termelési műveletek garantálása;
- ❑ a felszín alatti hidrogén migráció felügyelete;
- ❑ a porusnyomás okozta rétegvíz elmozdulásának ellenőrzése;
- ❑ a lehetséges szivárgási utak azonosítása, és
- ❑ a tárolótér hosszú távú biztonságának érvényesítése.

A hidrogén porózus közegben történő megfigyelését bevált multidiszciplináris koncepciókra építik, amelyeket más felszín alatti tárolási tapasztalatokra, például az UGS-ben és az UCS-ben alkalmaznak. A megfigyelési technológiák geofizikai, geokémiai és mikrobiológiai monitoring technikákat tartalmaznak [31].

Ezek a technikák különböző léptékekben teszik lehetővé a fluidumok közvetlen (a tároló szintjén történő) és közvetett (a felszínről való) feltárását. A közvetlen módszerek közé soroljuk a fűrőlyuk vizsgáló eszközeit, mint pl. a kút naplózása, a szondázás. A közvetett módszerek, pl. a geofizikai módszerek biztosítják a víztartó rétegek azonosítását a tárolóban. A legtöbb közvetett megfigyelési eszköz kihívással néz szembe a hidrogén-gát megfelelő felbontással történő kimutatásával és számszerűsítésével kapcsolatban [32]. Ezért a meglévő ellenőrzési protokollokat hidrogénre tesztelni és ellenőrizni kell, annak nagy mobilitása és kis sűrűsége miatt.

Figyelembe véve a hidrogén szempontjából egyedülálló alapvető folyamatokat, új optimális tárolási

kritériumokat kell meghatározni. A felszín alatti gáztárolás hagyományos módszereitől esetenként eltérő méretű, alakú és mélységű geológiai helyszínek használhatók hidrogén tárolására. Különösen fontos a kedvező csapdaszerkezetek vizsgálata annak érdekében, hogy a nagyon mozgékony hidrogén a besajtolt rétegben maradjon. A rezervoár heterogenitása korlátozhatja a hidrogén áramlását, elősegítheti a már korábban említett „ujjasodás” jelenségét, fokozhatja az *in situ* gázzal vagy párnagázzal történő keveredését, előidézve a hidrogén lehetséges veszteségét. A hidrogén oldalirányú áramlását minimalizálni kell, az alacsonyabb injektálási sebesség megválasztásával stabilabb *in situ* rétegvíz elmozdulás várható [33].

Az üzemeltetési kihívásokat, a folyadék határfelületének nem kívánt növekedését, mely végül víztermeléshez és a gáz nyomásának csökkenéséhez vezet, befolyásolni lehet a hidrogén termelési sebességének csökkentésével. A hidrogénbesajtolás és -kitermelés ciklusai alatt nem végeztek vizsgálatokat a termelési ráta csökkentésén túlmutató optimalizálási stratégiákról.

A mobilgázhoz szükséges párnagáz mennyisége hidrogéntárolás esetén ismeretlen, feltehetően hely- és projektspecifikus. Alapszabályként a felszín alatti gáztárolás értékeit adják meg, ez 40–70% között helyezkedik el [34]. A mobilgáz és a párnagáz általában hasonló összetételű. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának (CO_2) csökkentésére és a tárolási költségek mérséklésére (CH_4 , N_2) számos gáztárolási művelet során vizsgáltak alternatív párnagázt [35]. Az eredmények pozitívuma, hogy valamennyi alternatív párnagáz segítheti a hidrogén és a rétegvíz határán kialakuló sűrűségkülönbség csökkentését.

Ezért a többletköltség és a hidrogénszennyezés közötti kompromisszum értékelése érdekében a jövőbeni tanulmányok a mobilgáz és párnagáz arányának csökkentésére, valamint alternatív párnagázok alkalmazására összpontosíthatnak.

A föld alatti hidrogéntárolás gazdaságossága

A nagymennyiségű hidrogén felszín alatti tárolásának egyik fő előnye, annak alacsony tárolási költsége a többi tárolási lehetőséggel összehasonlítva, a hidrogén tisztaságától függetlenül [36]. A teljes projekt gazdaságosságát befolyásolja a hidrogén előállításának költsége, a szállítás, tárolás, kitarolás és monitoring költségeitől. A következőkben a tőke- és működési költségek vizsgálatára fókuszálunk. A besajtolhatóság, a nyomásváltozás, a karbantartás, a ciklikus működési költségek és az éves teljesítmény szintén elszámolható a nettó tárolási költséggel együtt. A tárolási költség alapvetően a tárolótér geológiai jellemzőitől függ, és attól, hogy szükség van-e a lehetséges szivárgási utak lezárásá-

ra. Taylor és munkatársai (1986) a különféle tárolási módok, alapján kategorizálták a tőke- és működési költségeket [36]. A kapcsolódó főbb tőkeköltségek: a kompresszorozás költsége (az üzemi egységek és a szükséges teljesítmény alapján), az alapozási és szerelési költségek, a transzformátor és a primer megszakító telepítési költsége, az építési, hűtési, fűtési, szellőztetési, világítási, riasztórendszeri és gázköltség. monitorozás, a gáztartó költsége (kapacitás alapján), a kompresszorhoz csatlakozó csőhálózat költsége, új kutak létesítésének költsége a kútfejberendezésekkel együtt. A fent említett tőkeköltségek közül a legnagyobb költség a gázkompresszor technológiájához tartozik. Hidrogéntárolás esetén a felszíni és felszín alatti berendezésekkel, valamint a fűrőlyuk- és csővezetékekkel kapcsolatos tőkeköltségek általában magasabbak a földgáztárolás folyamatához/eljárásához képest, a speciális anyagok igénye miatt, hogy a hidrogén okozta ridegedés miatti mechanikai vagy fizikokémiai meghibásodást elkerüljék [37]. A fő működési költségek: a hidrogén-előállítás (elektrolízissel), az áram, a hűtővíz, a közművek, a munkaerő (üzemeltetés és karbantartás) költségei, a felügyelet és a béren kívüli juttatások, az adminisztráció (a munka és a felügyelet néhány százaléka), a karbantartáshoz szükséges anyagok és a munkaerő költsége (a tőkeköltség néhány százaléka) és egyéb (a tőkeköltség néhány százaléka).

A szükséges mennyiségű párnagáz plusz költség, ami egyfajta rejtett költség, és a felhasználó számára elérhetetlen, ezért szükséges a tároló minimális méretének meghatározása. Azonban az utolsó kitarolási ciklus végén megmaradt párnagáz térfogata rétegvíz-kiszorítással visszanyerhető. A különböző UHS-eljárások költségelemzése és gazdaságossága tág tématerület, amely a különböző szakirodalomban részletesen megtalálható [38, 39].

Taylor és társai (1986) arról számoltak be, hogy a gazdaságilag életképes tárolási folyamat-hoz nagy kiegyenlítő előnyökkel kell rendelkezni, mivel a tárolási költség legalább 30–300%-kal növelheti a hidrogéntechnológia költségeit. Jelentős kölcsönhatás van a rendszer teljesítménye vagy kihasználtsága és a tőkeköltségek nagysága között [36]. Tarkowski és társai (2019) arról számoltak be, hogy az aquiferben történő hidrogéntárolás építési és üzemeltetési költségei magasabbak, mint sókavernás tárolás esetén, és kimerült szénhidrogéntárolókban. A kimerült olajtárolók költségesebbek, mint a földgáztárolók. A különféle föld alatti tárolótér lehetőségei közül a letermelt földgázrezervoárok szolgáltatják legolcsóbb alternatívát, ezt követik a sókavernák és a szilárd közettestben kialakított tárolótérek. Lord és társai (2011 és 2014) a különböző felszín alatti hidrogéntárolási lehetőségek beruházási

költségeit elemezték. Becslések szerint a gazdaságilag legvonzóbb lehetőség a kimerült tárolók (1,23 USD/kg tárolt hidrogén), ezt követik a víztestben történő tárolás (1,29 USD/kg), a sókavernák (1,61 USD/kg) és a szilárd közettest tárolótérfogatok (2,77 USD/kg) költségei [40]. A föld alatti hidrogéntárolás (mind a tiszta hidrogén, mind a gázelegy formájában) lehetőségeinek, életciklusának részleteiről és teljes költségéről azonban még nem számoltak be, és még mindig bizonytalanok.

Összefoglalás

A több évtizedes szénhidrogén-termelés tapasztalataiból ismert, hogy a tárolóter kismértékű tömörödése is jelentős felszíni süllyedéseket eredményezhet. Ezért elengedhetetlen annak vizsgálata és számszerűsítése, hogy a hidrogén milyen hatással van az ilyen szemcseméretű deformációs mechanizmusok sebességére, melyből következtetni lehet a tároló hosszú távú viselkedésére. A biztonságos tárolás egyik elengedhetetlen feltétele a fedőközet minősége, azaz összetétele és megfelelő permeabilitása. Analitikai eljárások kidolgozásával kell jellemezni és értékelni a kőzetek hidrogén megtartására való alkalmasságát. A hidrogén–ásványi reakciók hidrogén reaktivitására és reakciókinetikájára vonatkozó adatbázisokat kell alkalmazni a felszín alatti kőzetek szűrésére, kiemelve, hogy mely képződmények tartalmaznak olyan reaktív ásványi anyagokat, amelyek veszélyeztethetik a biztonságos szezonális porózus közegben történő hidrogéntárolási műveletet a teljes élettartam alatt.

Köszönetnyilvánítás

A tématerületi kutatás egyfelől a Miskolci Egyetem „Felszín alatti erőforrások hatékonyabb kiaknázása és hasznosítása” című, az Innovációs és Technológia Minisztérium támogatásával zajló Tématerületi Kiválósági Program keretében támogatott projektjének részeként (Támogatói Okirat ikt. száma: NKFIH-846-8/2019), másfelől a Miskolci Egyetem „Társadalmi hasznosság növelő fejlesztések a hazai felszín alatti természeti erőforrások hatékonyabb kiaknázása és hasznosítása területén” című, az Innovációs és Technológia Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kibocsátott támogatói okirat (Támogatói Okirat ikt. száma: TKP-17-1/PALY-2020) alapján zajló projektje részeként valósult meg”.

IRODALOM

[1] Innovációs és Technológiai Minisztérium: „Nemzeti Energiatérkép 2030, kitekintéssel 2040-ig”; 2020. január

- [2] Szunyog I., Galyas A. B. (2020): A földgáz hidrogénnel történő helyettesítésének potenciálja Magyarországon, *Műszaki Földtudományi Közlemények*, 89(1), 227–233. Miskolci Egyetemi Kiadó. HU ISSN 2063-5508 (o.)
- [3] European Commission: The role of gas storage in internal market and in ensuring security of supply, 2015.
- [4] Heinemann N. et al. (2021): Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges, *Energy & Environmental Science*. DOI: 10.1039/D0EE03536J
- [5] Lanz A., Heffel J., Messer C. (2001): Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies.
- [6] Stiel L. I., Thodos G. (1961): The viscosity of non-polar gases at normal pressures, *AIChE Journal*, 7(4), 611–615. <https://doi.org/10.1002/aic.690070416>
- [7] Hassanpouryouzband A., Joonaki E., Edlmann K., Heinemann N., Yang J. (2020): Thermodynamic and transport properties of hydrogen containing streams, *Scientific Data*, 7, 222, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0568-6>
- [8] Carden P. O., Paterson L. (1979): Physical, chemical and energy aspects of underground hydrogen storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, 4(6), 559–569. ISSN 0360-3199, [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(79\)90083-1](https://doi.org/10.1016/0360-3199(79)90083-1)
- [9] Feldmann F., Hagemann B., Ganzer L., et al. (2016): Numerical simulation of hydrodynamic and gas mixing processes in underground hydrogen storages. *Environ Earth Sci*, 75, 1165. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5948-z>
- [10] Blunt M. J. (2017): *Multiphase Flow in Permeable Media*, Cambridge University Press.
- [11] Yekta Alireza E., Pichavant Michel, Audigane Pascal (2018): Evaluation of geochemical reactivity of hydrogen in sandstone: Application to geological storage. *Applied Geochemistry*, 95, 182–194. ISSN 0883-2927, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.05.021>
- [12] Kampman N., Busch A., Bertier P., et al. (2016): Observational evidence confirms modelling of the long-term integrity of CO₂-reservoir caprocks. *Nat Commun*, 7, 12268. <https://doi.org/10.1038/ncomms12268>
- [13] Bourgeois J. P., Aupaix N., Bloise R., Millet J. L. (1979): Proposed Explanation of Hydrogen-Sulfide Formation in Underground Natural-Gas Storage Structures by Reduction of Mineral Sulfides in the Reservoir Rock. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP* 34(3), 371–386, <https://doi.org/10.2516/ogst:1979013>
- [14] Shi Zhuofan, Jessen Kristian, Tsotsis Theodore T. (2020): Impacts of the subsurface storage of natural gas and hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8757–8773, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.044>
- [15] Truche L., et al. (2018): Clay minerals trap hydrogen in the Earth’s crust: evidence from the Cigar Lake uranium deposit, Athabasca. [in English]. *Earth and Planetary Science Letters*, 493, 186e97.
- [16] Heinemann N., Booth M. G., Haszeldine R. S., Wilkinson M., Scafidi J., Edlmann K. (2018): Hydrogen storage in porous geological formations – onshore play opportunities in the midland valley (Scotland,

- UK). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(45), 20861–20874. ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.149>
- [17] *Conrad R., Phelps T. J., Zeikus J. G.* (1985): Gas Metabolism Evidence in Support of the Juxtaposition of Hydrogen-Producing and Methanogenic Bacteria in Sewage Sludge and Lake Sediments, *ASM Journals, Applied and Environmental Microbiology*, 50(3), 595–601. <https://doi.org/10.1128/aem.50.3.595-601.1985>
- [18] *Berta Marton, Dethlefsen Frank, Eber Markus, Schäfer Dirk, Dahmke Andreas* (2018): Geochemical Effects of Millimolar Hydrogen Concentrations in Groundwater: An Experimental Study in the Context of Subsurface Hydrogen Storage. *Environ. Sci. Technol.*, 52(8), 4937–4949. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b05467>
- [19] *Miller Jay F., Shah Nilesh N., Nelson Chad M., Ludlow Jan M., Clark Douglas S.* (1988): Pressure and Temperature Effects on Growth and Methane Production of the Extreme Thermophile *Methanococcus jannaschii*. *ASM Journals Applied and Environmental Microbiology*, 54(12). <https://doi.org/10.1128/aem.54.12.3039-3042.1988>
- [20] *Panfilov M.* (2016): Underground and pipeline hydrogen storage. In: Gupta RB, Basile A, Veziroglu TN, (editors). *Compendium of hydrogen energy*. Woodhead Publishing, p. 91e115.
- [21] *Amigáñ P., Greksák M., Kozánková J., Buzek F., Onderka V., Wolf I.* (1990): Methanogenic bacteria as a key factor involved in changes of town gas stored in an underground reservoir, *FEMS Microbiology Ecology*, 6(3), 221–224. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1990.tb03944.x>
- [22] *Pérez A., Dupraz S., Bolcich J.* (2016): 21st World Hydrogen Energy Conference 2016, Zaragoza, Spain.
- [23] *Zettlitzer M., Moeller F., Morozova D., Lokay P., Würdemann H.* (2010): Re-establishment of the proper injectivity of the CO₂-injection well Ktzi 201 in Ketzin, Germany, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(6), 952–959. ISSN 1750-5836, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.05.006>
- [24] *Klell M.* (2010): *Handbook of Hydrogen Storage*, pp. 1–37.
- [25] *Segall P.* (1989): Earthquakes triggered by fluid extraction. *Geology*, 17(10), 942–946. doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<0942:ETBFE>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<0942:ETBFE>2.3.CO;2)
- [26] *Spiers C., Hangx S., Niemeijer, A.* (2017): New approaches in experimental research on rock and fault behaviour in the Groningen gas field. *Netherlands Journal of Geosciences*, 96(5), S55–S69. doi:10.1017/njg.2017.32
- [27] *Didier M., Leone L., Greneche J.-M., Giffaut E., Charlet L.* (2012): Adsorption of Hydrogen Gas and Redox Processes in Clays. *Environ. Sci. Technol.*, 46, 3574–3579. <https://doi.org/10.1021/es204583h>
- [28] *Hangx S., Bakker E., Bertier P., Nover G., Busch A. S.* (2015): Chemical–mechanical coupling observed for depleted oil reservoirs subjected to long-term CO₂-exposure – A case study of the Werkendam natural CO₂ analogue field. *Earth and Planetary Science Letters*, 428, 230–242. ISSN 0012-821X, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.07.044>
- [29] *Foh S., Novil M., Rockar E., Randolph P.* (1979): Underground hydrogen storage final report. In: *Inst of Gas Tech. Upton, NY: DOE, Brookhaven Natl Lab.*
- [30] *Rosen M. A., Koochi-Fayegh S* (2016): The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Ecol. Environ.* 1, 10–29. <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0005-z>
- [31] *Martens S., Conze R., De Lucia M., Henninges J., Kempka T., Liebscher A., Lüth S., Möller F., Norden B., Prevedel B., Schmidt-Hattenberger C., Szizybal-ski A., Vieth-Hillebrand A., Würdemann H., Zemke K., Zimmer M.* (2015): Geological Storage of CO₂ – Long-Term Security Aspects: Geotechnologien Science Report No. 22, A. Liebscher and U. Münch, Springer International Publishing, Cham, pp. 1–32.
- [32] *Pfeiffer W. T., al Hagrey S. A., Köhn D., et al.* (2016): Porous media hydrogen storage at a synthetic, heterogeneous field site: numerical simulation of storage operation and geophysical monitoring. *Environ Earth Sci* 75, 1177.. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5958-x>
- [33] *Hagemann B., Rasoulzadeh M., Panfilov M. et al.* (2015): Mathematical modeling of unstable transport in underground hydrogen storage. *Environ Earth Sci* 73, 6891–6898. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4414-7>
- [34] *Misra B. R., Foh S. E., Shikari Y. A., Berry R. M., Labaune F.* (1988): *Proceedings of SPE Gas Technology Symposium*, Society of Petroleum Engineers.
- [35] *Dussaud M.* (1989): *Underground Storage of Natural Gas*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 371–383.
- [36] *Alderson J. E. A., Kalyanam K. M., Lyle A. B., Phillips L.A.* (1986): Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11(1), 5–22.
- [37] *Kruck O, Crotogino F, Prelicz R, Rudolph T.* (2013): Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe. *KBB Underground Technologies GmbH*.
- [38] *Le Duigou A., Bader A.-G., Lanoix J.-C., Nadau L.* (2017): Relevance and costs of large scale underground hydrogen storage in France. 2017/09/07. *Int J Hydrogen Energy* 42(36), 22987e3003.
- [39] *Venter R. D., Pucher G.* (1997): Modelling of stationary bulk hydrogen storage systems. 1997/08/01/ *Int J Hydrogen Energy*, 22(8), 791e8.
- [40] *Lord A. S., Kobos P. H., Borns D. J.* (2014): Geologic storage of hydrogen: scaling up to meet city transportation demands. *Int J Hydrogen Energy*, 39(28), 15570e82.

Egysugaras és multisugaras szonárral végzett mederfelmérések összehasonlítása

Comparative mining lakebed surveys carried out with single-beam and multibeam sonar instruments

EKE ZOLTÁN

tudományos segédmunkatárs

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.,

Rendszertervezés Osztály

DR. HAVASI ISTVÁN

intézetigazgató egyetemi docens

Miskolci Egyetem, Geofizikai és Térinformatikai Intézet (GTI),

Geodéziai és Bányaméréstani Intézeti Tanszék



A tanulmány először röviden foglalkozik a víz alatti mélységmérésekhez a gyakorlatban használt szonár eszközök mérési elvével. Ezt követően ismerteti mind az egysugaras, mind a többsugaras ultrahangos mérést valamint az azok alkalmazásához kapcsolódó hátrányokat és előnyöket. Ezután a szerzők egy bányató mederfelmérése kapcsán a kettő felmérési módszer összehasonlító vizsgálatára vállalkoznak, megadva és szemléltetve ezek eredményeit, és értékelve a kutatási feladatból leszűrt tapasztalatokat.

Bevezetés

A tanulmány először röviden foglalkozik a víz alatti mélységmérésekhez a gyakorlatban használt szonár eszközök mérési elvével. Ezt követően ismerteti mind az egysugaras, mind a többsugaras ultrahangos mérést valamint az azok alkalmazásához kapcsolódó hátrányokat és előnyöket. Ezután a szerzők egy bányató mederfelmérése kapcsán a kettő felmérési módszer összehasonlító vizsgálatára vállalkoznak, megadva és szemléltetve ezek eredményeit, és értékelve a kutatási feladatból leszűrt tapasztalatokat.

A szonár mérési elve

A víz alatti távolságmérésekhez hanghullámokat használunk, mivel a hangok a vízi közegben igen jól terjednek, viszonylag kis energiával relatíve nagy távolságokat tesznek meg. A hang nyomáshullámként halad a vízben. Ezek a nyomáshullámok/frontok a vízben meghatározott sebességgel mozognak, ez a helyi hangsebesség. A helyi hangsebesség a víz körülményeitől függően változhat a sótartalom, a nyomás és a hőmérséklet függvényében, ugyanakkor a hanghullám egyéb sajátosságai változatlanok maradnak. Vízi környezetben a hangsebesség általában 1400–1500 m/s.

Az aktív szonárok olyan eszközök, amelyek meghatározott, szabályozott frekvenciájú hanghullámokat állítanak elő, és érzékelik azok visszhangjait, amelyek

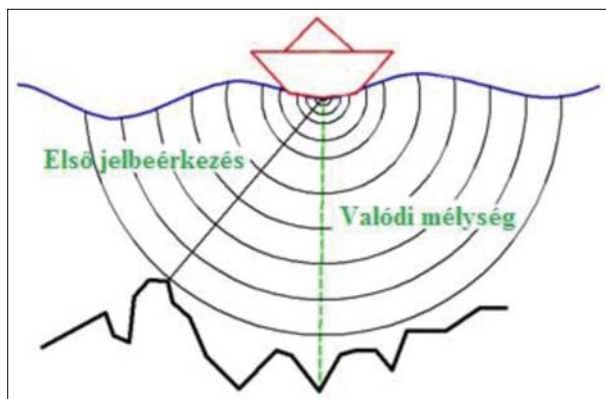
a távoli tárgyakról (mederfenékről) érkezők vissza. Az impulzus kibocsátása és a visszatérés közötti idő az, amíg a hang eljut a mederfenékre és vissza.

A hanghullám előállítását egy úgynevezett projektorral történik. A batimetrikus szonárokhoz olyan projektorokra van szükség, amelyek képesek a jelek ismételt kibocsátására úgy, hogy azok pontosan meghatározott (az adott méréshez beállított) fizikai jellemzői változatlanok maradjanak. Ezek a leggyakoribb esetekben piezoelektromos eszközök, amelyek ugyanazon tulajdonságukból eredően adóként és vevőként is képesek funkcionálni. Az elektromos jel hatására bekövetkező alakváltozás generálja a kibocsátott jelet, észleléskor a fizikai nyomásváltozás indukálja a visszaérkező jelet. A vízben keletkező hangimpulzus a forrásától gömb alakban távolul ki – energiája pedig minden irányban (kvázi gömbfelületet alkotva) egyenlő mértékben halad. Ahogy az impulzusfront mozog, a felülete növekszik, energiája egyre nagyobb felületen oszlik szét (a távoluló front felülete), ami egységnyi területre eső energiacsökkenést okoz. Ezt az energia-veszteséget szórásveszteségnek nevezzük. Az impulzus a vízi közegben némi csillapítást szenved, ez az abszorpciós veszteség. A szórásveszteséget és az abszorpciós veszteséget együttesen átviteli veszteségnek nevezzük. A hanghullámot befolyásoló átviteli veszteség teljes mennyisége a távolságtól függ. Amikor egy hanghullám eléri a medret, az elnyeli az energia egy részét (a homok és az iszap nagyobb mennyiséget,

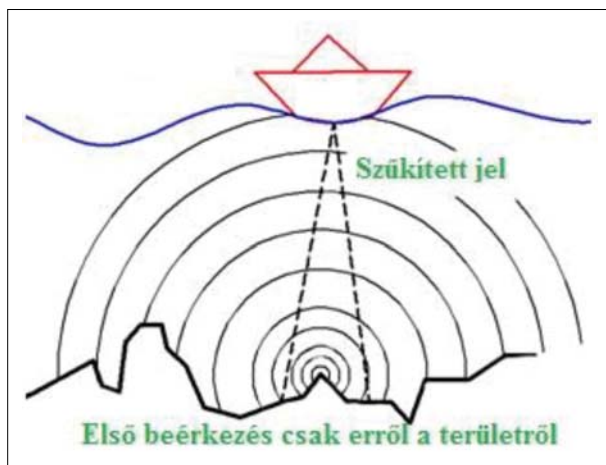
a sziklás meder kevesebbet). Az energia nagy része, amelyet a meder anyaga, nem tud elnyelni, visszaverődik, vagy visszaszóródik a vízbe. A visszatérő hangimpulzus nagyobb átviteli veszteséget szenved, míg végül eléri az érzékelő hidrofont, amely a fizikai rezgéseket visszaalakítja elektromos impulzussá. A hasonló funkciók miatt, a projektorok és a hidrofonok egy szonárrendszerben gyakran ugyanazok a hardverelemek.

Az egysugaras szonár

Az egysugaras mélységmérők a legkorábbi, legalapvetőbb és még mindig a legszélesebb körben használt szonár eszközök [1]. Ezeknek a műszereknek az a célja, hogy a mederpontok mélységét különböző helyeken egyenként mérik. Az egynyalábú mélységmérő rendszer négy alapvető összetevőből áll: az adó, a jelátalakító, a vevő, valamint a vezérlő és bizonyos esetekben a kijelző rendszer, amely a vízen úszó hajó, vagy csónak oldalához kerül rögzítésre, így azzal együtt mozog, vagy a szonárt és GPS antennát tartó rudat a kezelő tartja a kezében. Az adó oszcilláló elektromos jelet generál, amelynek frekvenciajellemzői meghatározottak. A projektor az elektromos



1. ábra. Téves mélységmérés az első jel alapján



2. ábra. A kibocsátott jel fókuszálása

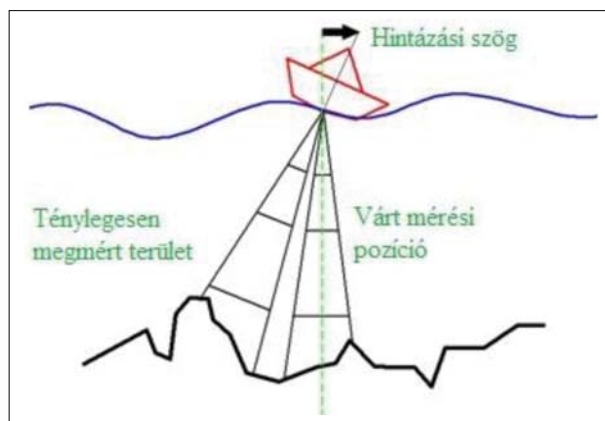
energiát hanghullámokká alakítja. Az oszcilláló elektromos jelek mechanikai rezgésekké változnak, amelyek oszcilláló nyomás vagy hanghullám formájában kerülnek a vízbe. Visszhangként a mederfenékről visszatérve, a hangimpulzust a hidrofonként működő jelátalakító fogadja, és újra elektromos jellé alakítja át. A jeladó továbbadja a vett elektromos jelet a vevőrendszerbe, amely rögzíti a kibocsátástól eltelt időt. Ebből az adatból kerül kiszámításra a mélység, és ekkor ad ki a vezérlő rendszer újabb jelet. Ezt a folyamatot nevezzük „ping intervallumnak”, vagy ciklusnak. Az egysugaras vevő tehát egy „ping ciklusban” egy darab mélységadatot rögzít. Bár egyszerű, olcsó felépítésű, és könnyen használható, az egysugaras eszköz számos kritikus korláttal rendelkezik, amelyek miatt az elvégzett mérések megbízhatósága jelentősen csökkenhet.

A pontos mederfenék felméréshez a mérőeszköz szemben támasztott követelmények a pontosság és a hatékonyság.

A pontosság kérdése az ún. „ping ciklusnál” kezdődik, ahol a kibocsátást követően az első visszajelző jel idejéből kerül számításra a megtett út, és ebből a mélység. A kibocsátott jel terjedése az előbbieken alapján azonban közel gömbfelületen történik, így, mint ahogy azt az 1. ábra mutatja, nem biztos, hogy az első beérkezés pontosan függőleges irányból történik [2].

A probléma kiküszöbölésére ezek a mérőeszközök a kibocsátott jel, szűkítését, fókuszálását végzik [2]. A kibocsátott jel így a mederfenéken kis területet érint, ezáltal az első jel a kívánt pozícióból nagyobb valószínűséggel érkezik vissza. A mélységgel arányosan nő a terület nagysága, és az első beérkezés az érintett területen belül lévő legközelebbi pontról fog megtörténni, amely továbbra sem biztos, hogy a függőleges irányt jelöli ki. A 2. ábra ezt szemlélteti.

A keskeny sugár azonban két okból sem oldja meg teljesen a problémát [2]. Az első az, hogy a szonár a hajó/csónaktesthez van rögzítve, vagy pedig azt a kezelő tartja a kezében, de a rendszer együttmozog.



3. ábra. Téves mérés a mérőeszköz mozgása miatt

A mozgás három tengely körül is bekövetkezhet/bekövetkezik. Mozgás közben pedig rendkívül nehéz biztosítani az eszköz helyzetét olyan módon, hogy az a megfelelő mérést el tudja végezni. Ez látható a 3. ábrán.

A második ok a projektor kialakítása, ami abban nyilvánul meg, hogy a kisebb szögű jel kibocsátásához nagyobb, drágább méretű eszköz szükséges, és a mélységgel növekszik a jel által érintett mederterület nagysága, ami meghatározza a mérés felbontását. Mindez egyetlen jel esetén nem hatékony, ezért ilyen típusú eszközökkel nagy felbontású mederfelmérés nem valósítható meg.

A multisugaras szonár

A multisugaras szonárak esetében több vizsgáló jellel működő eszközökről beszélünk, amelyeknél a jelek száma 256, 512, de akár 1024 is lehet. Ezek ma a piacon bárki számára megvásárolhatók. A mérési sávot a 4. ábra szemlélteti [2].

A multisugaras szonár jelkibocsátó egységét projektor tömbnek nevezzük, amelyben a jel kibocsátást

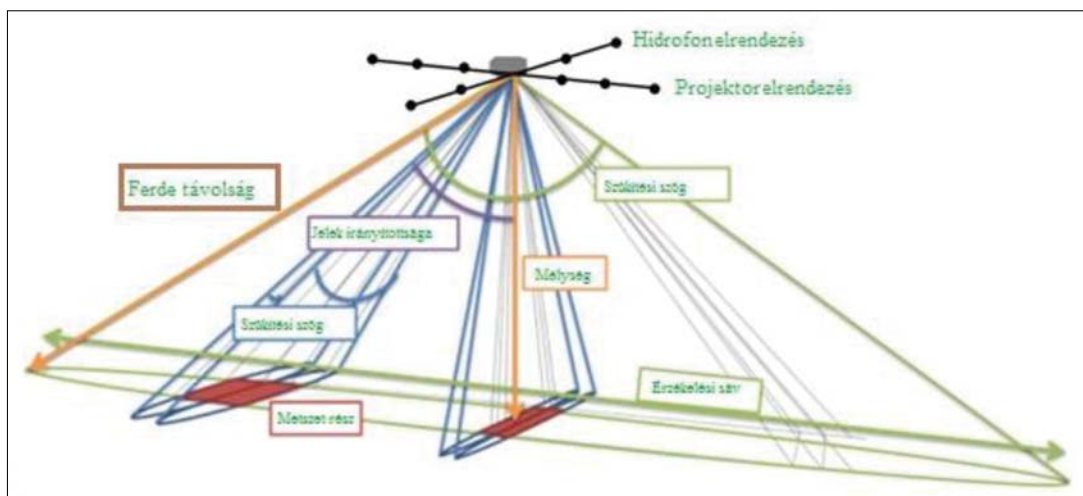


4. ábra. Multisugaras szonár mérési sávja

és a visszaverődések érzékelését egymáshoz képest speciális elrendezésben rögzítve megfelelő számú hardver végzi. Ez a speciális, merőleges elrendezés biztosítja azt, hogy a mérés felbontása parameterezhető legyen azzal együtt, hogy a kibocsátó hardver elemek elrendezése és a kibocsátott jel szűkítése is állítható adott szögtartományon belül. A jelek elrendezésének szögtartománya akár 150° is lehet, így a mérési sáv a mélység függvényében jelentős szélességű, természetesen a felbontástól függően, ezáltal pedig a mérési hatékonyság magas [3]. A projektor és érzékelő elrendezést, továbbá a mérés felbontását pedig az 5. ábra mutatja.

Ebben az esetben a szélső jelek útja jelentősen nagyobb, így a „ping ciklus” is hosszabb, azonban az egységnyi idő alatt mért pontok száma így is sokszorosra az egysugaras szonárral megmértnek.

Természetesen a hajó vagy a csónak mozgásából származó bizonytalanság ebben az esetben is jelentkezik, aminek kiküszöbölésére a szonár vezérlőbe integráltan egy inerciális egység található, amely az adott eszközhöz előre definiált mértékig meghatározva képes a három tengely körüli elmozdulás kompenzálására. A pozíció meghatározás kettő darab RTK GPS antenna segítségével történik, amelyek szintén a vezérlőbe csatlakoznak [3]. Fontos még megemlíteni a hangsebesség meghatározás problémáját, amely abból fakad, hogy az a teljes vízoszlopra nézve nem egyenletes. Ez különösen állóvizek esetében kritikus, ahol a mélységgel arányosan csökken a hőmérséklet és a hangsebesség is. Ez az eltérés több tíz m/s is lehet, amelyet a pontos méréshez figyelembe kell venni. A multisugaras rendszerek tartozéka egy külső hangsebesség érzékelő is, amely a teljes vízoszlopra elkészíti a hangsebesség profilját olyan formátumban, hogy a mérést feldolgozó szoftver a végleges mérési eredmény kialakítása során figyelembe tudja azt venni.

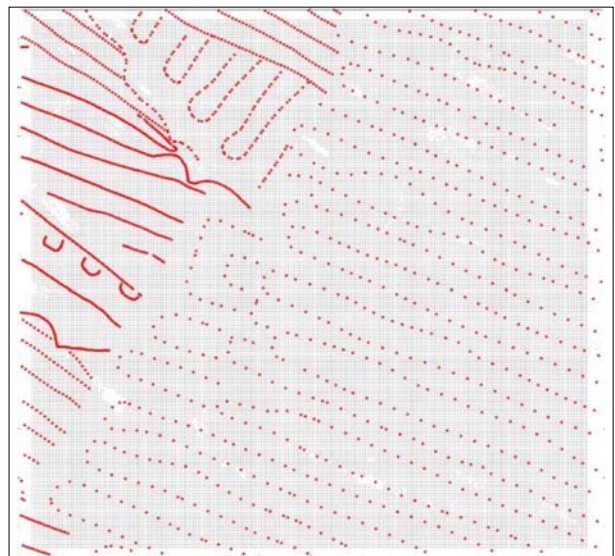


5. ábra. Mérési felbontás a multisugaras szonárnál (<https://www.hydro-international.com>)

Az összehasonlító mérés és a kapott eredmények ismertetése

A következőkben ugyanarra a mintaterületre egysugaras és multisugaras eszközzel egy összehasonlító mérést mutatunk be [4]. A multisugaras szonár mérést mi végeztük egy olyan területen, ahol az egysugaras mérés eredményeit előzetesen megkaptuk. A mérés körülményeit azonban pontosan nem ismertük, így a vizsgálatunk során igyekszünk csak azokra a jellemzőkre rávilágítani, amelyek a fent felsorolt technológiai különbségek okán jelentkeznek. A mintaterület egy kavicsbányató négyhektáros mederrésze.

Az egysugaras eszköz mérési eredményei alapján látható volt, hogy többféle mérési módszert is alkalmaztak, egyrészt a hagyományos mérést, amely gombnyomásra egyenként méri a koordinátát olyan módon, hogy a szonárfej egy RTK GPS eszköz prizmarúdjához van rögzítve. A szonár meghatározza a mélységet a szonárfejtől, az RTK GPS pedig EOVS koordinátarendszerben a szonárfej pozícióját. Ezekből pedig számítható a mederpont EOVS koordinátája. A másik módszer az előzőtől annyiban különbözik, hogy a mérés végrehajtása automatikusan magasabb frekvencián nagyobb sűrűséggel zajlik, amelynek maximuma természetesen a „ping ciklusnál” csak kisebb lehet, de a mérési útvonalon így is jelentős számú mért adatot eredményez.

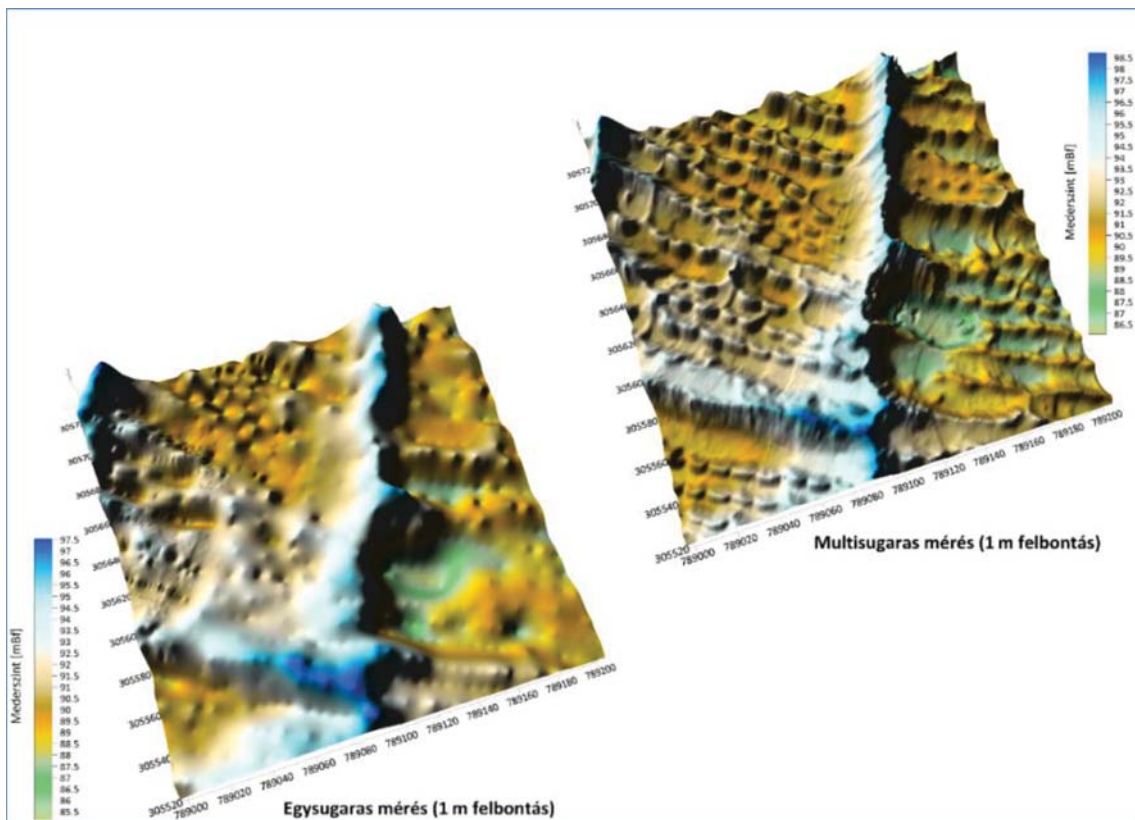


6. ábra. Mérési eredmények

A 6. ábrán mind az egysugaras, mind pedig a multisugaras szonárral mért eredményeket szemléltetjük, pirossal az egysugaras, szürkével a multisugaras mérőeszközök adatai láthatók.

A pontsűrűségek a következők szerint jellemezhetők:

- egysugaras szonár piros pontok,
 - manuálisan mért területen 9 m vonaltávolság, 3 m ponttávolság,



7. ábra. A mérésekből szerkesztett felületek 1 m-es felbontással

- automatán mért terület 9 m vonaltávolság, 80 cm pont távolság,
- multisugaras szonár szürke pontok (25 cm felbontás, egyenletesen).

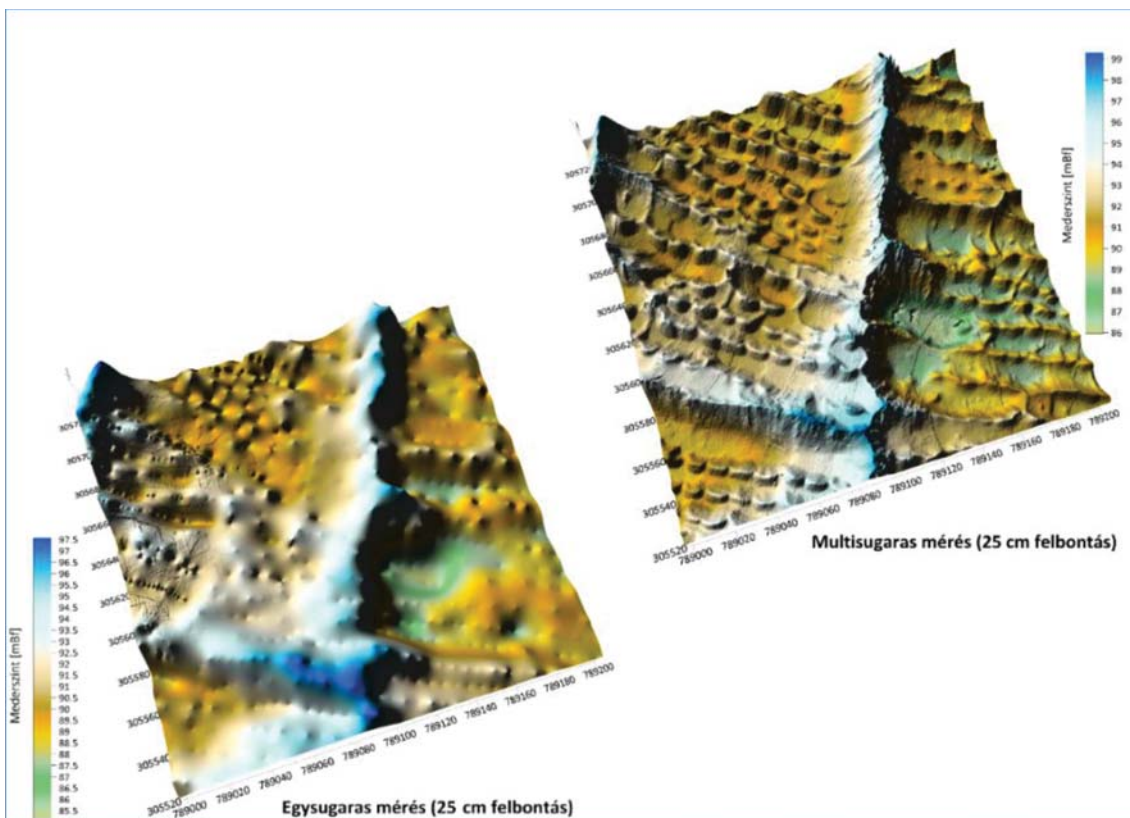
A 6. ábrán szembevető kisebb hiányokat (fehér foltok) a vízben lévő „akadályok”, mint vízínövény, halak, esetlegesen a csónakmotor által keltett, vagy a jelentősebb hullámzás hatására keletkező buborékok okozták. Ebben az esetben a nyers mérési állomány a mérés feldolgozása során kerül tisztításra. Ennek során nem csak a tisztítás történik meg, hanem a koordinátatranszformáció, az inerciális rendszer és a külső hangsebességmérő-szenzor eredményeinek figyelembevétele is.

A mérési adatokból később felületeket készítünk, amelyek az egysugaras szonár esetében a teljes mintaterületre 25 cm és 1 m felbontású interpolálást jelentettek, a multisugaras eszköz esetében pedig a foltok interpolálása történt meg ilyen sűrűséggel. Mindezekből az alábbi megállapítások fogalmazhatók meg:

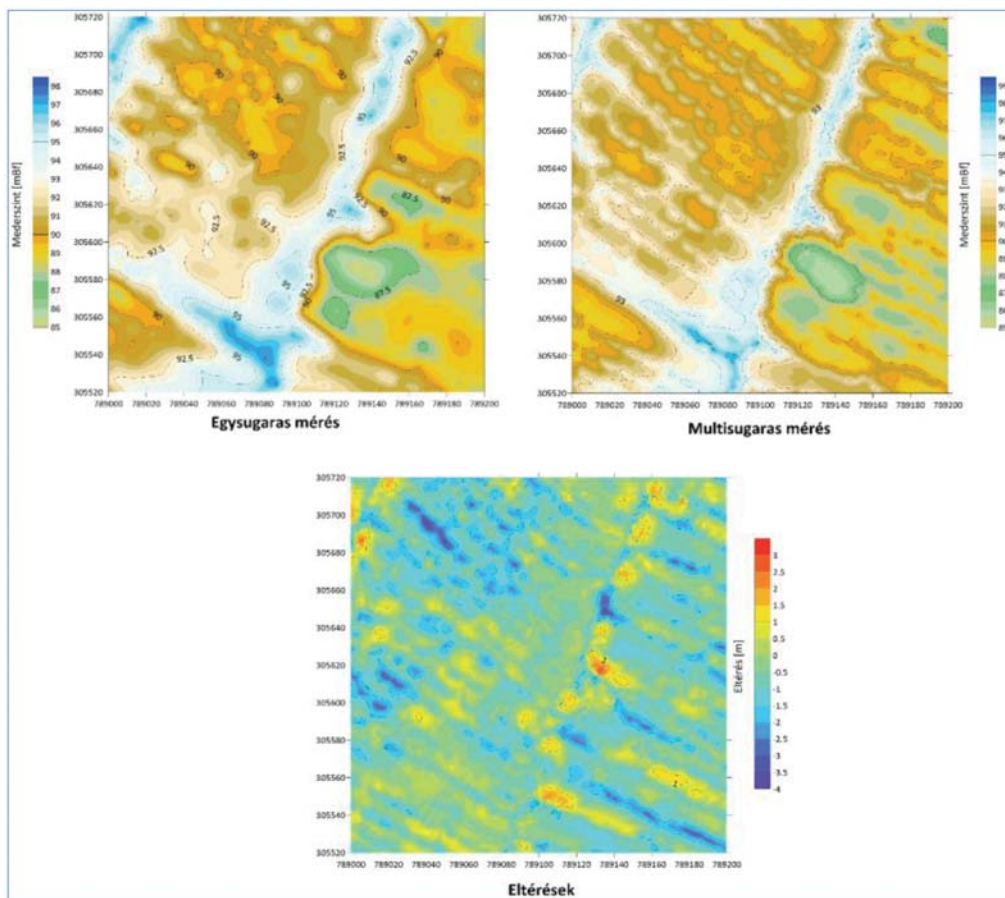
- Az egysugaras felületek között gyakorlatilag nem látható eltérés, mivel az eredeti adatsűrűség alacsonyabb, mint az 1 m felbontás, tehát az interpolálás sűrűségének növelésével a mederről nem kapunk plusz információt.
- A multisugaras felületeken viszont látható a különbség, a mikrodomborzatot tekintve

ugyanis az 1 m felbontás jelentős információvesztést eredményez. A 25 cm felbontás, amely az eszköz képességeit nézve közepesnek mondható, ugyanakkor már részletesen mutatja a meder felületének kisebb változásait is. A 7. és a 8. ábrán szemléltetjük az egyes eszközök adataiból szerkesztett felületeket a különböző felbontások mellett.

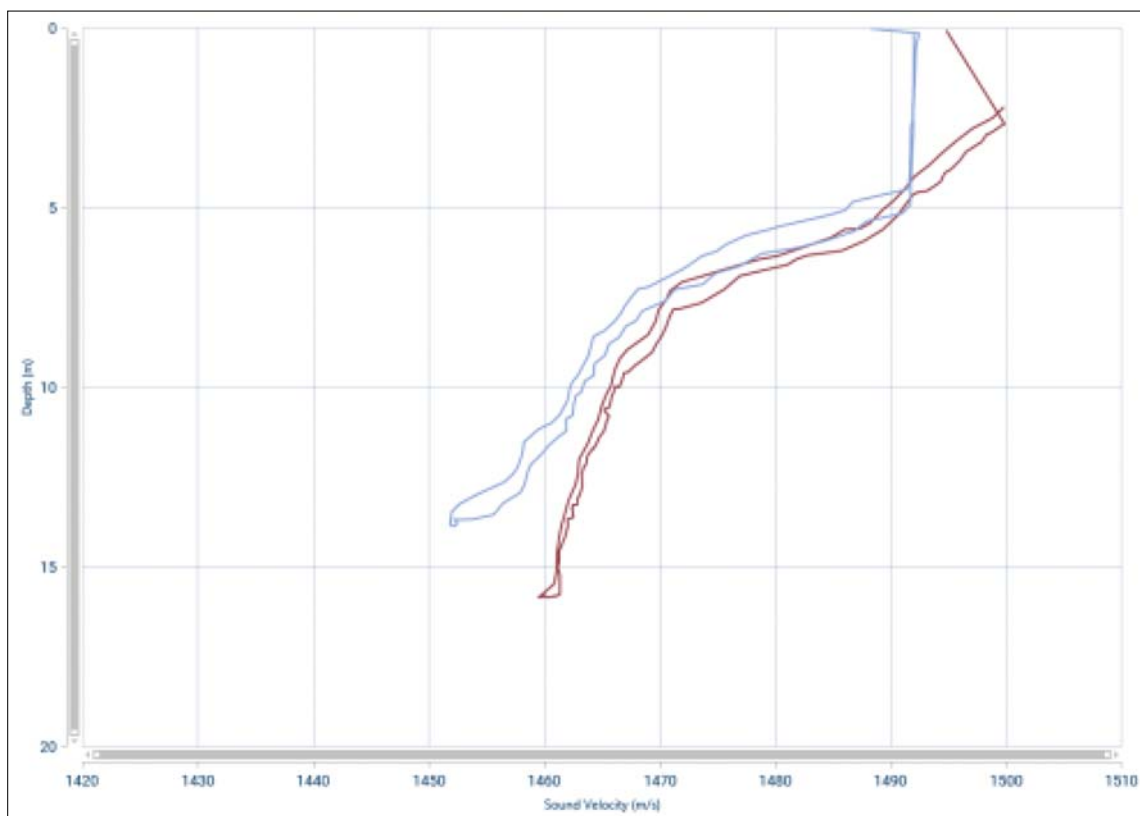
Elkészítettük még a 25 cm felbontású felületek különbségét is, amelyet a felületek szintvonalas térképeivel együtt szintén szintvonalasan a 9. ábra mutat be. Látható, hogy az egysugaras mérésből szerkesztett felület jellemzően a felületváltozások jellegét adja vissza, a nagyobb méretű alakzatok jelennek meg a multisugaras felvételhez képest. A különbség értékeknél azonban jelentős eltéréseket tapasztalhatunk, amelyek bizonyos pozíciókban a több métert is eléri, amely jelentős eltérésnek tekinthető. A mérésünk során a tó vízszintje 106 m Bf szinten volt, amiből látható, hogy a legnagyobb mélység a vízszint alatt 20 m körül volt. Fontos megállapítani, hogy a legnagyobb különbségek, illetve a jelentősebbek nem a mért pozíciókban tapasztalhatók, mérhetőek, hanem egyrészt azokon a helyeken, ahol az egysugaras mérés mérési vonalai között nagyobb távolság van. Ennek kapcsán pedig természetesen az interpoláció (krigelés) módszeréből eredően számított pozíciókban, amelyek a mért pontoktól távol esnek.



8. ábra. A mérésekből szerkesztett felületek 25 cm-es felbontással



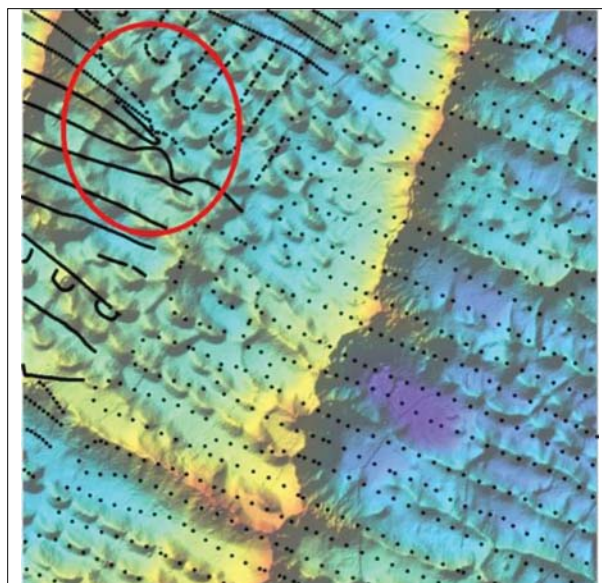
9. ábra. A 25 cm felbontású felületek szintvonalai és az ezekből képzett különbség



10. ábra. A különböző időpontokban mért hangsebességprofilok

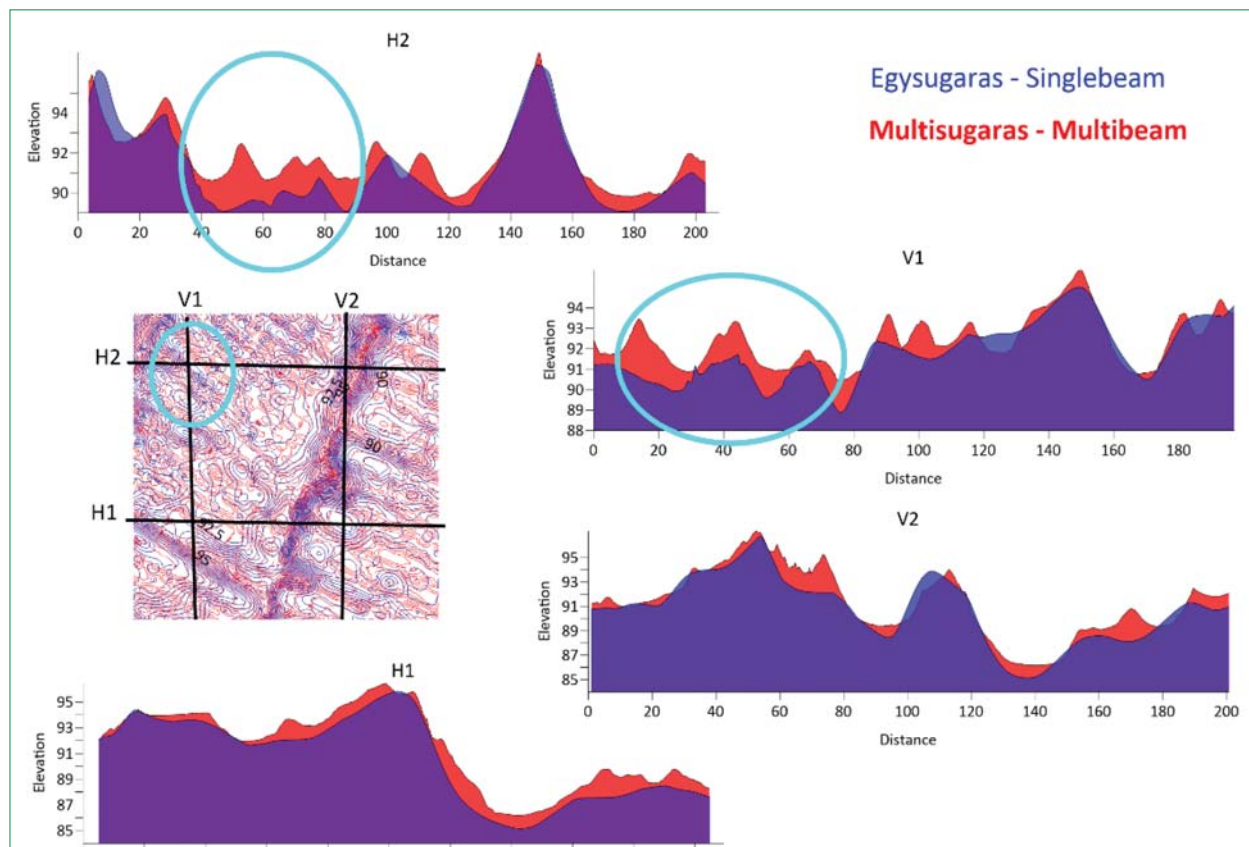
A különbségtérkép alapján elmondhatjuk még azt is, hogy egy erősen tagolt meder felméréséhez – mint amilyen a kitermeléssel érintett bányató medre is – nagy pontsűrűség szükséges.

A felületek közötti különbség $22\,864\text{ m}^3$, $40\,000\text{ m}^2$ vizsgált területen (a multisugaras felület fölött fut, és $3\,824\text{ m}^3$ térfogatrészen pedig alatta) ami a teljes területen átlagosan 57 cm szintkülönbséget jelent. Az eltérés egyik oka az előbbieken említett pontsűrűség és az interpoláció, a másik a technológiából adódó összetevő, amely a vízi jármű bizonytalanságából (hintázás/pitch előre-hátra; hintázás oldalra/roll; függőleges tengely körüli elfordulás, hullámokra felúszás/heave) és az ebből következő mérési hibából adódik. A harmadik pedig a hangsebesség-változásból eredő hiba. A hangsebesség mérési eredményeit a 10. ábra mutatja, amelyek a vizsgált területen különböző időpontokban készültek. Az ábrán jól látható a mélységgel arányos sebesség csökkenés, valamint az, hogy a különböző időpontokban a sebességprofil milyen eltérést mutat. A felsorolt tényezők a multisugaras eszköz esetében kompenzálásra kerülnek.



11. ábra. A multisugaras felületen az egysugaras eszközzel mért pontok helye

pontokat, nyilvánvalóvá válik az alapvető probléma a víz alatti medermérések esetében, ha a mérést pontszerűen végezzük (11. ábra). A pontos felület



12. ábra. A két felületet metsző keresztmetszvények

A multisugaras eszközzel mért, tagolt mederfelszínen feltüntetve az egysugaras eszközzel mért

meghatározáshoz az alakjellemzőket kell megmérni, mint törésvonalak (lábvonal, élek stb.), a homogén felületrészen pedig valamilyen célszerűen megvá-

lasztott homogén pontsűrűséget kell figyelembe venni. A meder esetében ez azonban nem megvalósítható mivel jellegéből adódóan azt nem látjuk. A 11. ábra szemlélteti azt, hogy az alakjellemzőket nem igazán sikerült pontszerű módon megmérni, sőt a gerincvonalat és a völgyvonalat sem. Ebből következően egy „simább felületet” kaptunk eredményként, ahol a két alakjellemző meghatározásának pontatlansága ellentétes előjellel jelentkezett. Ebből következik, hogy a pontszerűen jelentkező nagyobb eltérések (több méter) ellenére az átlagos szintkülönbség 50 cm körül adódott.

A 12. ábrán pedig a felületekből keresztmetszvényeket szerkesztettünk, és ellipszisekkel egy felületrész a 11. és a 12. ábrán is megjelöltünk. Ezen a részen azt láthatjuk, hogy a pontszerű mérés iránya eltér a meder alakjellemző változásának irányától. Ebben az esetben az alakjellemzőket csak kevésbé sikerült megmérni, a nagyobb szintkülönbség pedig ennek eredményeként jelenik meg. Meg kell jegyezni azt is, hogy az egysugaras szonárral mért adatok a kitermelés technológiájának tudtában kerültek megmérésre, ami a meder felszínváltozásában is megmutatkozott, tehát a meder tagoltságára így volt információ. A mérés irányát ez határozta meg. Az adatok bemutatásánál kiemeltük, hogy az egysugaras mérési eredmények rögzítése kétféle módon történt, manuálisan (ritkább mért pontok a mérési vonalon) és automata módon (nagyobb pontsűrűség a mérési vonalon). A mérési vonalon adódó nagyobb pontsűrűség akkor ad jelentősen több érdemi információt, ha hozzá a mérési vonalak sűrűségét is növeljük, azaz csökkentjük a vonalak közötti távolságot, amely a mérés időigényét jelentősen megnöveli. További kérdéseket vet fel a pontszerű medermérések esetében a mérés ismételhetsége, tekintettel arra, hogy a vízben bejárt útvonal mennyire pontosan járható be újra, és adott esetben a kettő egymást követő mérés eredménye mennyiben tér el, mivel kicsi a valószínűsége, hogy ugyanazokat a pontokat (pontatlanságokat) sikerül újra megmérni.

A multisugaras mérés esetében a nagyságrendekkel homogénebb megmért pontfelhő jelentősen pontosabb mederfelmérést biztosít abban az általános esetben is, amikor a mederről nincs, vagy csak nagyon kevés ismeretünk van. Az ismételt mérés eredménye pedig megegyezik a korábbival abban az esetben is, ha azt egy másik bejárású útvonalon végeztük el.

Összefoglalás

Tanulmányunk megírását az motiválta, hogy egy bányamérési feladat kapcsán bemutassuk a multisugaras szonár alkalmazásának összehasonlító vizsgálatát. Önmagában nem egy új technológiáról van szó, de olyan formában, hogy az egy egyszerű csónakból megvalósítva, sekélyvízi (100 m-nél kisebb, akár 2-3 m) mérésekhez felhasználható legyen, a piacon csak 1-2 éve elérhető. Rámutattunk azokra a hiányosságokra, amelyek a korábban kizárólag elérhető, ma általánosan használt egysugaras eszközök esetében jelentkeznek, rávilágítva arra, hogy azokból milyen hibák terhelhetik a mérési eredményeket.

Az adott medermérés célja alapvetően meghatározza, hogy milyen eszköz szükséges a felmérés megbízható végrehajtásához. Azt reméljük, hogy sikerült segítséget nyújthatunk a végrehajtáshoz célszerű eszköz, vagy szolgáltatás kiválasztásában. Meg kell azt is jegyezzük, hogy a mutisugaras szonárok ára jelentősen magasabb, többszöröse az egysugaras eszközökének, ugyanakkor a velük végzett mérések, szolgáltatás szinten is, Magyarországon is elérhetők.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők e szakmai anyag elkészülése érdekében nyújtott támogatásért köszönetüket fejezik ki a *Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.* illetékes vezetőinek.

IRODALOM

- [1] Multibeam Sonar Theory of Operation. L-3 Communications of SeaBeam Instruments. <https://www3.mbari.org/data/sonarfunction>
- [2] Galli Csaba (2017): Vízmélység térképezése modern eszközökkel. Szakdolgozat, ELTE TTK, Budapest.
- [3] Zoltan Eke, István Havasi (2022): Development underwater surface measurement – multibeam sonar. Geosciences And Engineering: A Publication of the University of Miskolc, 9(14) pp. 81–95. <https://doi.org/10.33030/geosciences.2021.14.081>
- [4] Khomsin D., Pratomo G., Saputro I. (2021): Comparative analysis of singlebeam and multibeam echosounder bathymetric data. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1052, 012015, IOP Publishing DOI: 10.1088/1757-899X/1052/1/012015, <https://www.hydro-international.com>

A surányi vízbázis vizsgálatának hidrogeológiai feladatai a Tiszta Ivóvíz Projekt keretében

DR. NYIRI GÁBOR

okl. hidrogeológus mérnök, PhD, tudományos segédmunkatárs

KOLENCSEKÉ DR. TÓTH ANDREA

okl. környezetmérnök, PhD, egyetemi docens

FEKETE ZSOMBOR

okl. hidrogeológus mérnök, tudományos segédmunkatárs

DR. MADARÁSZ TAMÁS

okl. geológusmérnök, PhD, intézetigazgató egyetemi docens

DR. ZÁKÁNYI BALÁZS

okl. környezetmérnök, PhD, egyetemi docens

DR. SZÜCS PÉTER

okl. bányamérnök, PhD, DSc, az MTA levelező tagja, egyetemi tanár

Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar,

Környezetgazdálkodási Intézet

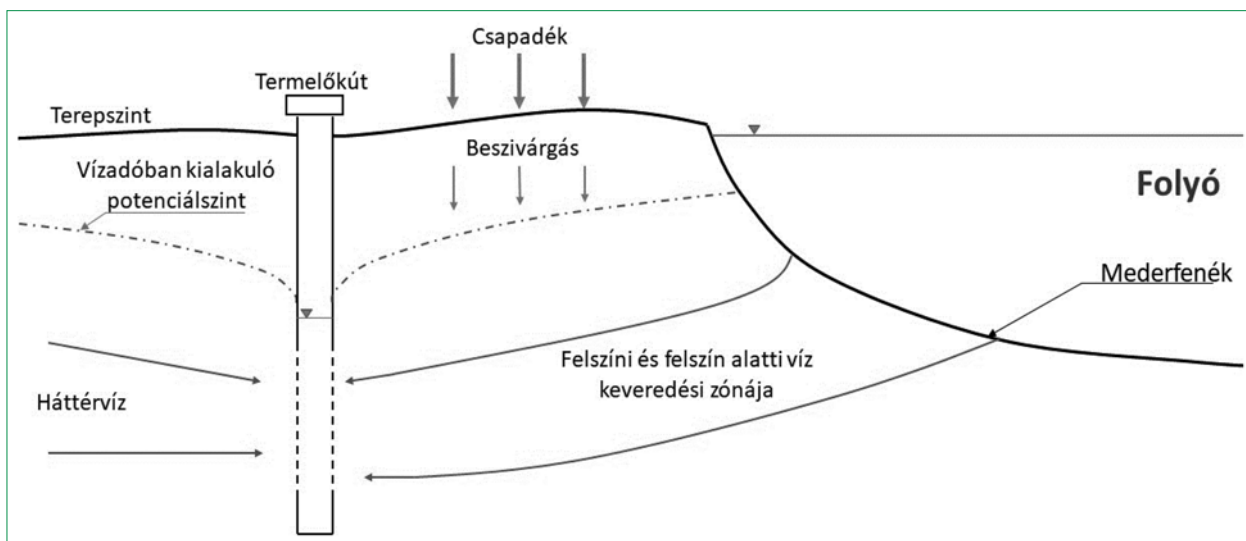
Hazánk ivóvízellátásának 35–40%-a parti szűrésű vízbázisokra épül. Emellett Budapest vízellátása is nagymértékben támaszkodik a Duna mentén történő parti szűrésű víztermelésre. A „Tiszta Ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” című projekt kutatási célja két kiválasztott vízbázis, valamint az ehhez kapcsolódó víztermelő műtárgyak és vízelosztó hálózat komplex vizsgálata a Dunától a fogyasztóig. A projekt egyik részfeladata a parti szűrésű rendszerek hidrogeológiai viszonyainak vizsgálata, amit a Miskolci Egyetem Környezetgazdálkodási Intézetének munkatársai végeznek el. Jelen tanulmányunkban a két kiválasztott projekt mintaterület közül a surányi vízbázishoz kapcsolódó terepi mérési kampány során kapott eredményeket mutatjuk be, amelyek a későbbi hidrodinamikai modellezés folyamatában játszanak fontos szerepet. A terepi mérések segítségével képet alkothatunk a felszín alatti áramlási viszonyokról segítve a hidrodinamikai modellépítést és e természeti rendszer működésének megértését.

Kulcsszavak: parti szűrés, ivóvíz, csápos kút, terepi mérés, Tiszta Ivóvíz projekt

Bevezetés

A folyók és környezetük kölcsönhatása olyan kedvező hidrogeológiai körülményeket alakíthat ki, amely a vízkivételt és az ivóvízellátást nagymértékben segítheti. Az úgynevezett parti szűrésű rendszereknél a folyó közvetlen környezetében történő víztermelés során olyan biológiai, kémiai és fizikai folyamatok játszódnak le, amelyek hatására a termelt víz akár ivóvíz minőségűre is tisztulhat. A parti szűrés jelenségét a folyóparton telepített vízkivételi műtárgy segítségével történő víztermelés indukálja. A víztermelés során kialakuló hidraulikus gradiens változással szivárgás indul meg a folyó és a háttér felől (1. ábra). Megfelelő mederkapcsolat esetén a folyó felől nagyobb

arányban (több mint 50%-ban) történik az utánpótlódás, ekkor beszélhetünk parti szűrésről [1]. A parti szűrés során kialakuló természetes tisztítási folyamat tényezői a hidrodinamikai (hígulás), a mechanikai (szűrés), a biológiai (mikroorganizmusok tevékenysége), valamint a fizikai-kémiai (csapadékképződés, adszorpció, koaguláció stb.) tisztítási folyamat [2]. Mindezen folyamatok együttese adja azt a természetes ivóvízbeszerzési rendszert, amelyet a világ számos országában, így hazánkban is kiaknáznak. Magyarország Vízgyűjtő-gazdálkodási Tervének adatbázisa 94 db parti szűrésű vízbázist tart nyilván, amelyből 37 távlati vízbázis. Védett vízkészleteink 29,5%-át az üzemelő, míg 25,5%-át a távlati parti szűrésű vízbázisok adják [3].



1. ábra. A parti szűrés folyamata

Hazai viszonylatban tehát kiemelt jelentőségűnek tekinthetők a parti szűrészű vízbázisok egyrészt azért, mert a jelenleg termelt felszín alatti ivóvízbázisoknak 35–40%-a parti szűrészű, másrészt pedig a távlati ivóvízbázisaink 70–75%-a folyóparti környezetben helyezkedik el [4]. Magyarországon főként a Duna mentén, a Sajó és a Hernád mentén, valamint a Mura és a Rába mentén találkozhatunk ilyen vízadó típusokkal. A parti szűrészű ivóvízbázisok jelentőségét az is mutatja, hogy Budapest vízellátása nagymértékben a Szentendrei-sziget, valamint a Csepel-sziget ilyen típusú vízbázisaira támaszkodik. A parti szűrészű vízbázisok esetén alkalmazott vízkivételi műtárgyak a hagyományos csőkút, aknakút, galéria, valamint a csápos kút. Ezek közül is előszeretettel alkalmazott kúttípus a csápos kút, amely három nagyobb szerkezeti egységből áll: a felépítmény, a nagy átmérőjű kútakna, valamint az ebből vízszintesen, és radiálisan kihajtott szűrőcsövek, az úgynevezett csápok [5]. Előnyük, hogy a parti szűrészű rendszerekre jellemző vékony vízadó rétegek esetén a vízszintes csápelrendezéssel megnövekszik a hasznos szűrőfelület a függőleges csőkutak szűrőfelületéhez képest. Ezáltal nagyobb mennyiségű vizet tudunk kitermelni egy kút telepítésével [6]. Munkánkban ezen vízbázisok, valamint kúttípusok vizsgálatára fókuszáltunk. Tanulmányunkban a „Nemzeti Kiválósági Program, Tiszta Ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” című projekt által kijelölt hidrogeológiai vizsgálatokat, valamint azok eredményeit ismertetjük.

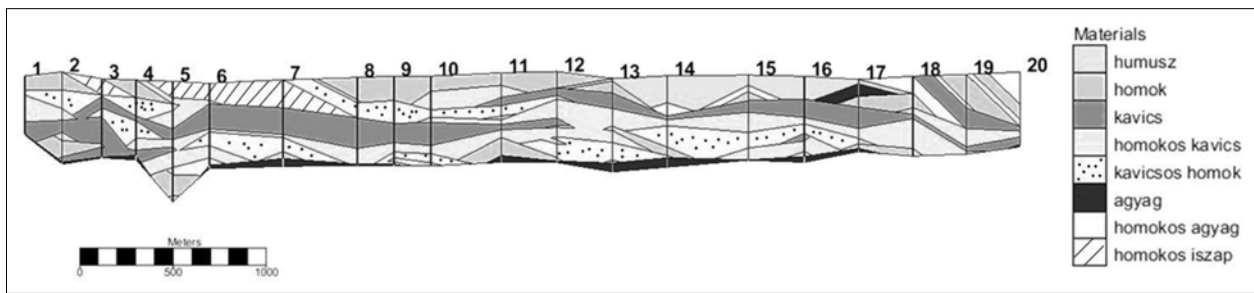
A Tiszta Ivóvíz Projektéről

A „Tiszta ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” című projekt célja a budapesti ivóvízellátás biztonságát ve-

szélyeztető hatások feltárása a vízkivételtől a fogyasztóig. A projektben 5 konzorciumi partner vesz részt:

- Ökológiai Kutatóközpont (konzorcium vezető),
- Budapesti Műszaki, és Gazdaságtudományi Egyetem,
- Fővárosi Vízművek ZRt.,
- Nemzeti Népegészségügyi Központ,
- Miskolci Egyetem.

A projekt keretében két olyan parti szűrészű vízbázis került kiválasztásra, amelyek nagy jelentőséggel bírnak Budapest vízellátását illetően. Az egyik a Szentendrei-szigeten elhelyezkedő surányi kútsor, a másik pedig a Csepel-szigeten elhelyezkedő ráckevei kútsor. A vizsgálati területek kiválasztásának szempontjai között szerepelt a vízbázisok nagy jelentősége a főváros vízellátásában, a folyamatos üzem és a jó megközelíthetőség. A két területen egy olyan részletes, komplex hidrológiai, hidrogeológiai, vízkémiai, mikrobiológiai, ökológiai, egészségügyi vizsgálatra és értékelésre került sor, amelynek segítségével meghatározásra kerülnek a vízellátást veszélyeztető esetleges kockázati pontok és beavatkozási lehetőségek. Az összetett kutatómunkának egy szeletét képezik azok a hidrogeológiai vizsgálatok, amellyel a teljes parti szűrészű ivóvízellátáson belül a víztermelő műtárgyak felszín alatti környezetére fókuszálunk. A hidrogeológiai vizsgálatok részét képezik a termelőkutakból, illetve a területen található megfigyelőkutakból kéthetente, illetve havonta történő mintavételek, amelyek során a termelt nyers víz, valamint a talajvíz stabil izotóp összetételét vizsgáltuk. A mintavétel mellett több mint egy éven át folyamatos vízszint-, hőmérséklet-, és vezetőképesség mérést végeztünk egy-egy kiválasztott termelőkút környezetében. Az üzemi vízszint adatokat különböző matematikai-statisztikai módszerekkel feldolgozva vizs-

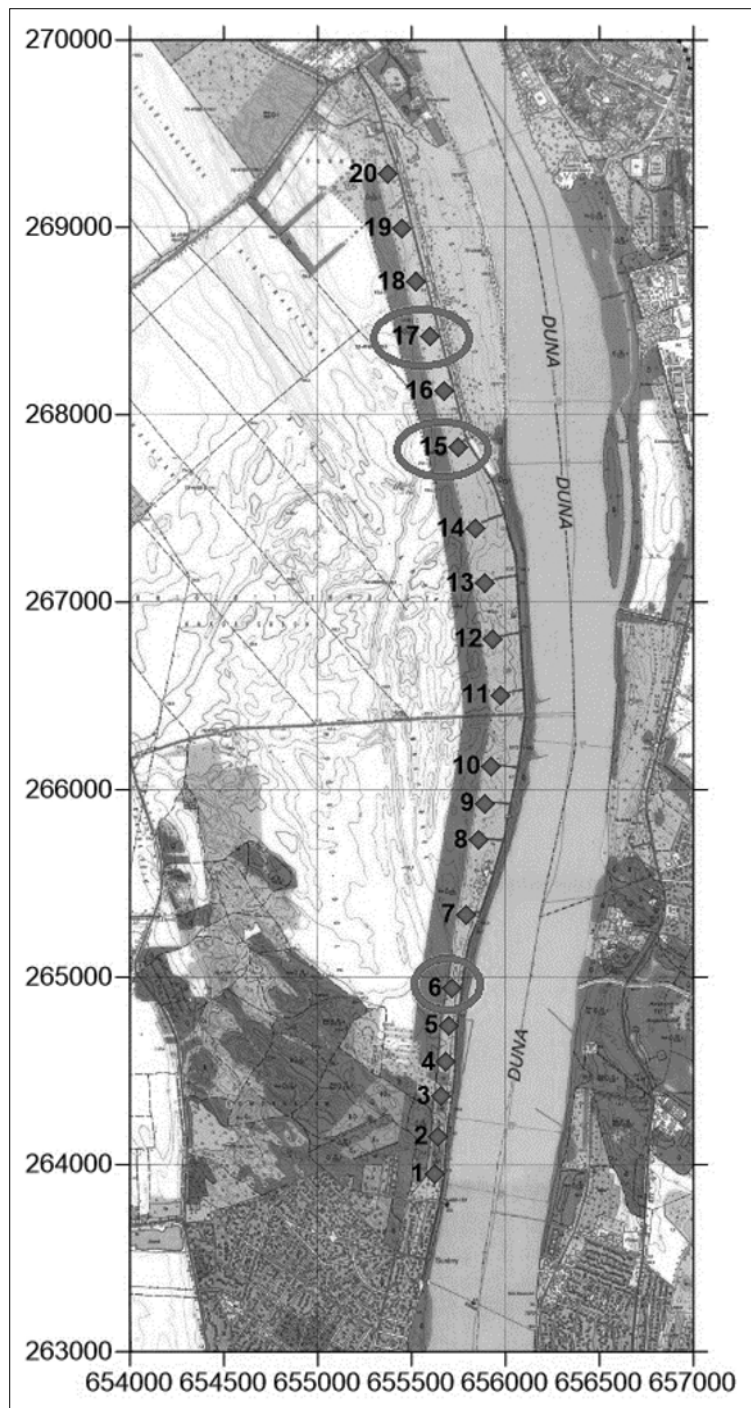


2. ábra. A termelőkutak fűrészi adatainak segítségével szerkesztett hossz szelvény

gáltuk a folyó vízállás, leszívás és termelt hozam közötti összefüggéseket. A projekt célja, hogy térben és időben különböző felbontású numerikus áramlási modellt is felépítsünk. A projekt céljai között szerepel a különböző tudományterületek kutatási eredmények összekapcsolása, ami jelenlegi kutatási feladatunk tárgyát képezi. Jelen tanulmányban a surányi vízbázishoz kapcsolódó terepi méréseket és azok eredményeit mutatjuk be.

A surányi vízbázis bemutatása

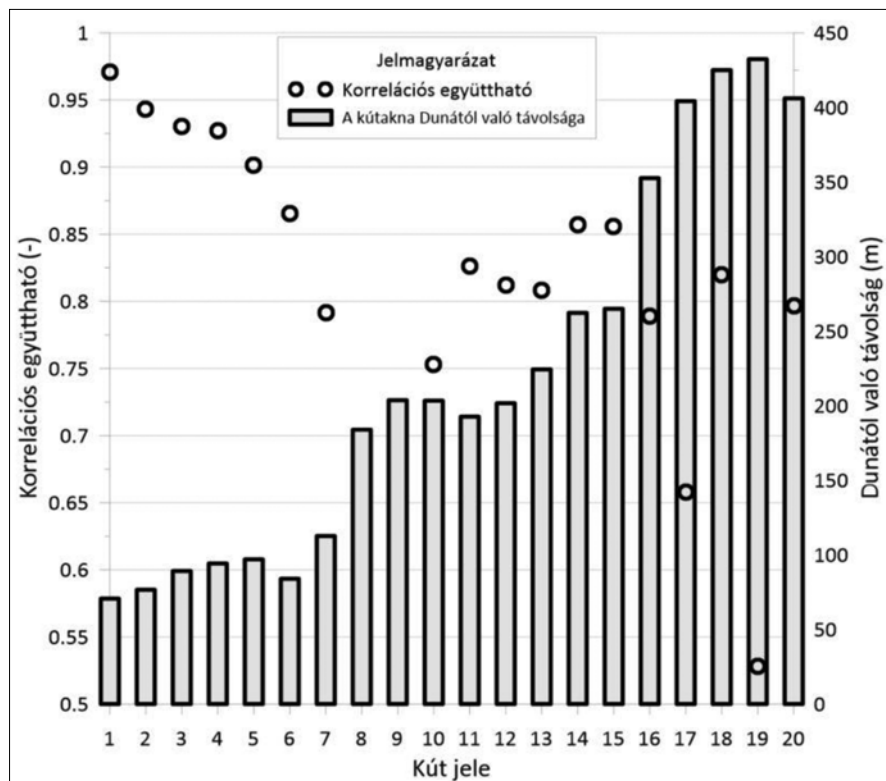
A surányi parti szűrészű kútsor, a Budapesttől északra elhelyezkedő Szentendrei-szigeten található. A Váci Duna-ág jobb partján elhelyezkedő húsz kútból álló csápos kút sor víztermelése igen nagy szerepet játszik Budapest vízellátásában. A Szentendrei-sziget vonatkozásában több olyan szerkezetföldtani, rétegtani témájú publikáció született, amelyek elősegítik a terület földtani és vízföldtani megismerését [7–9]. A Szentendrei-sziget a Duna Kismarosnál kiszélesedő völgyében kezdődik. ÉNy-DK irányban folytatódik Vácig, ahol Déli irányt véve Csillaghegy magasságában elkeskenyedve ér véget [10]. A Szentendrei-sziget geomorfológiaiilag három fő részre tagolható: az alacsony, illetve a magas ártér, valamint az ármentes szint [11]. Földtanára jellemző, hogy alapvetően folyóvízi üledékek alkotják. A sziget északi végétől Alsógöd magasságáig oligocén agyagra települtek ezen folyóvízi üledékek, míg ettől délre homokos agyagos képződmények alkotják a folyóvízi üledékek fekvését [10]. Ezen folyóvízi üledékek egymásra települve mutatkoznak a Szentendrei-sziget figyelőkútjainak, valamint termelőkútjainak adataiban. A 2. ábra látható a termelőkutak fűrészi adataiból szerkesztett hossz szelvény.



3. ábra. A surányi csáposkút sor termelő kútjainak elhelyezkedése a mintázásra kiválasztott három kúttal

A vízbázison történő víztermelést húsz darab, úgynevezett törpe csáposkút valósítja meg. A termelőkutak egymástól átlagosan 300 m távolságban, egyenletesen helyezkednek el a Duna partja mentén. A partéltől való távolságukra jellemző, hogy északról dél felé haladva a kutak és a partél közötti távolság csökken. A legdélebbre elhelyezkedő 1-es számú kút Dunától való távolsága vízállástól függően nagyjából 65–70 m, míg a legészakibb 20-as számú kút partéltől való távolsága vízállástól függően 410–430 m. A kutak kialakítása a csápok kihajtásának irányát és mélységét leszámítva egységesnek mondható. A felszínen látható felépítmény egy kútaknában folytatódik. Az acél anyagú kútakna 2200 mm palást átmérővel rendelkezik és az aknafenek az agyagréteget elérve nyeri el végleges mélységét, átlagosan 15–17 m mélységben [12]. A csápok a 2. számú kutat kivéve két szinten helyezkednek el, két csápsíkot kialakítva. A csápok eltérő hosszúságot mutatnak, a kialakítás során történt elakadások miatt.

A Tiszta Ivóvíz projekt keretében mindkét mintaterületen három termelőkút került kiválasztásra, amelyek további vízkémiai vizsgálatok tárgyai voltak. A kutak kiválasztásánál az Szentendrei-szigeten fontos szempont volt, hogy a Dunától különböző távolságokra lévő kutakat jelöljünk ki. Így esett a választás a 6., 15. és a 17. számú kútra, amelyek elhelyezkedését a 3. ábra mutatja.



4. ábra. A surányi kútsor termelőkútjainak Dunától való távolsága, valamint az üzemi vízszintek és a Duna vízszintje közötti korreláció

A termelőkutak hidraulikai vizsgálatánál fontos összevetnünk az üzemi vízszintet, és a Duna vízszintet, amelynek során hidraulikai kapcsolat mértékét számszerűsítettük. A Fővárosi Vízművek által kapott vízszint-idősor adatok felhasználásával a termelőkutakra meghatároztuk a Duna vízszint, és az üzemi vízszint közötti korrelációs együttható értékeit, amelyeket a partéltől való távolsággal együtt a 4. ábra mutat. A kapott eredmények alapján az alábbi következtésre jutottunk: A 4. ábra esetében jól látható, hogy a Dunától való távolság növekedésével a korrelációs együttható értéke csökken. A korreláció mértékének csökkenése mutatja a kútsor Dunával való hidraulikai kapcsolatának inhomogenitását. Elmondható, hogy a termelőkútban kialakuló üzemi vízszint Dunától való hidraulikai függősége délről északra csökkenő tendenciát mutat.

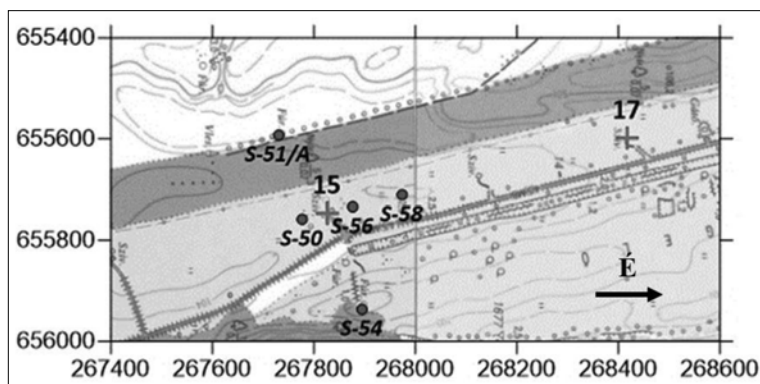
Terepi mérések bemutatása

A surányi kútsor termelőkútjainak vonalában, valamint a Szentendrei-szigeten több figyelőkút is található, amelyekben méréseket tudunk elvégezni. A Duna felé és a Szentendrei-sziget belseje felé is figyelőkutakkal jól ellátott területről beszélhetünk. A figyelőkutak a vízáadó rétegre lettek szűrőzve, így segítségükkel jól követhető a potenciálszintek változása, valamint jól kivitelezhetőek a mintavételek is. A terepi mérések a mérési gyakoriság szempontjából három csoportra oszthatóak:

- óránkénti mérések,
- havi rendszerességű mérések,
- kéthavi rendszerességű mérések.

Az óránkénti méréseket és a mérések eredményeinek regisztrálását folyamatos vízszintregisztráló műszerek segítségével valósítottuk meg. Öt kútban történt folyamatos mérés és adatregisztrálás ezen műszerek segítségével. Az öt figyelőkút a 15. számú termelőkút környezetében helyezkedik el, amelyet az 5. ábra mutat.

A rendelkezésre álló vízszintregisztráló műszereket igyekeztünk úgy elhelyezni, hogy a Deák és társai [13], Völgyesi [14], valamint a Közlekedési, Hírközlési és Vízügyi Minisztérium [15]



5. ábra. Vízzintregisztráló műszerekkel ellátott figyelőkutak a surányi kútsor 15. számú termelőkútjának környezetében

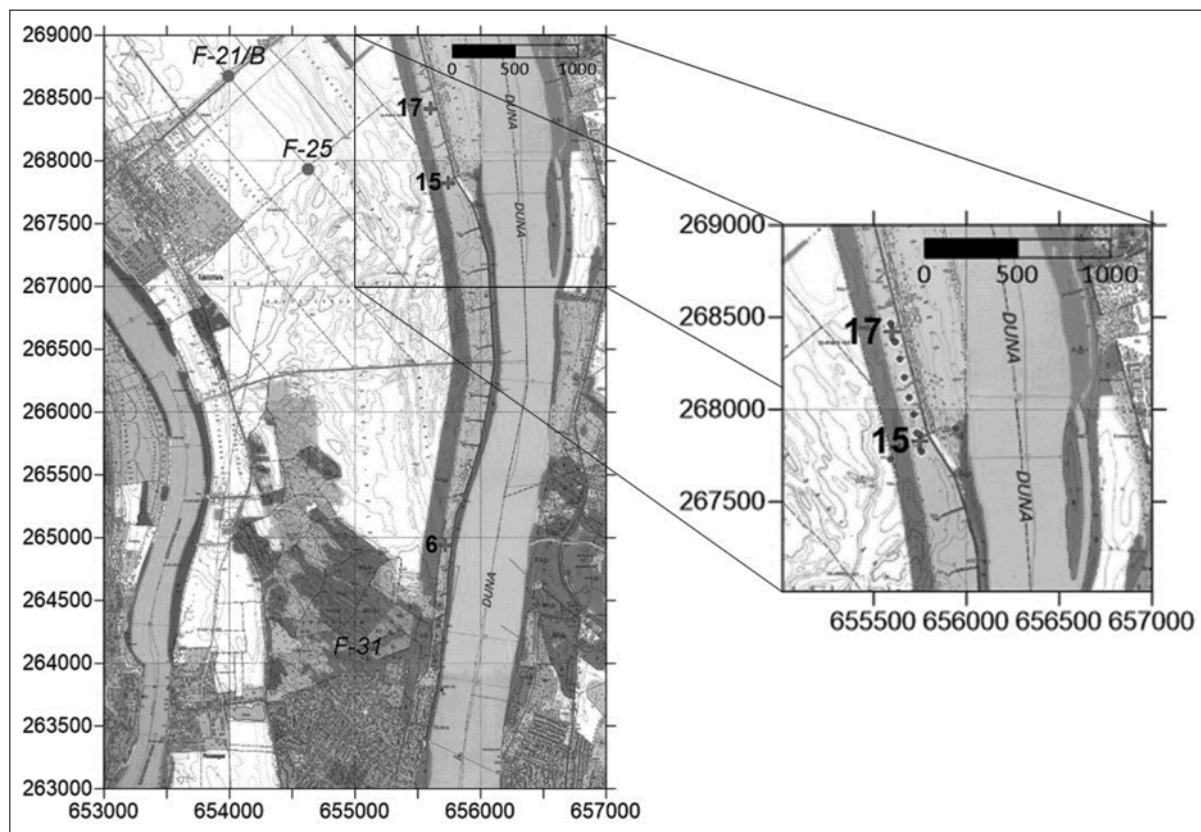
javaslatainak megfelelően, vagyis a Duna partvonalára merőlegesen és a Duna partvonalával párhuzamosan is legyenek vízzintregisztráló műszerek. A műszerek az alábbi paramétereket mérték: vízzint, hőmérséklet, elektromos vezetőképesség.

A havi rendszerességű mérések a háttér vizsgálatára és a következő paraméterek mérésére irányultak: vízzint, oldott oxigén koncentráció, elektromos vezetőképesség, pH. A havi rendszerességű mérésekre szolgáló figyelőkutak termelőkutakhoz képest való elhelyezkedését a 6. ábra mutatja.

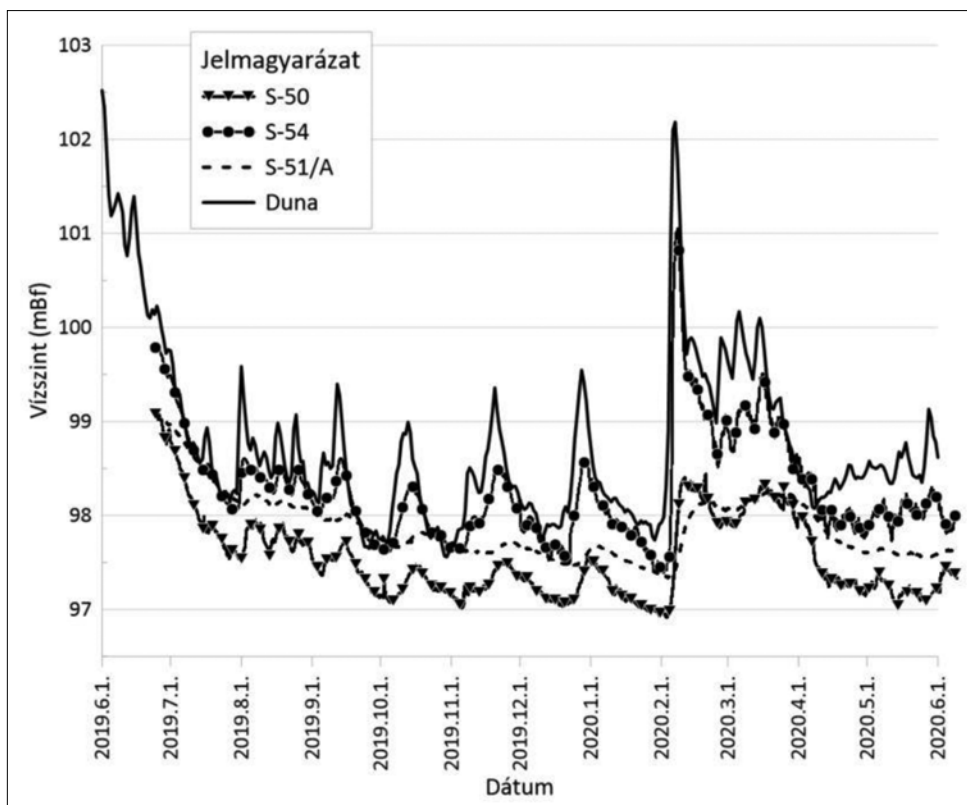
A kéthavi rendszerességű mérések a termelőkutak közötti figyelőkút-soron, valamint a 15. termelőkút környékén valósultak meg. A mérések a vízzint, az oldott oxigén, a hőmérséklet, valamint az elektromos vezetőképesség vizsgálatára terjedtek ki.

A terepi mérések eredményei

A figyelőkutakban mért vízzint alakulásáról elmondható, hogy a parti szűrésű rendszerekre jellemző három zóna (parti zóna, termelőkutak körüli zóna, termelőkutak háttérében lévő zóna) vízzintjének vi-



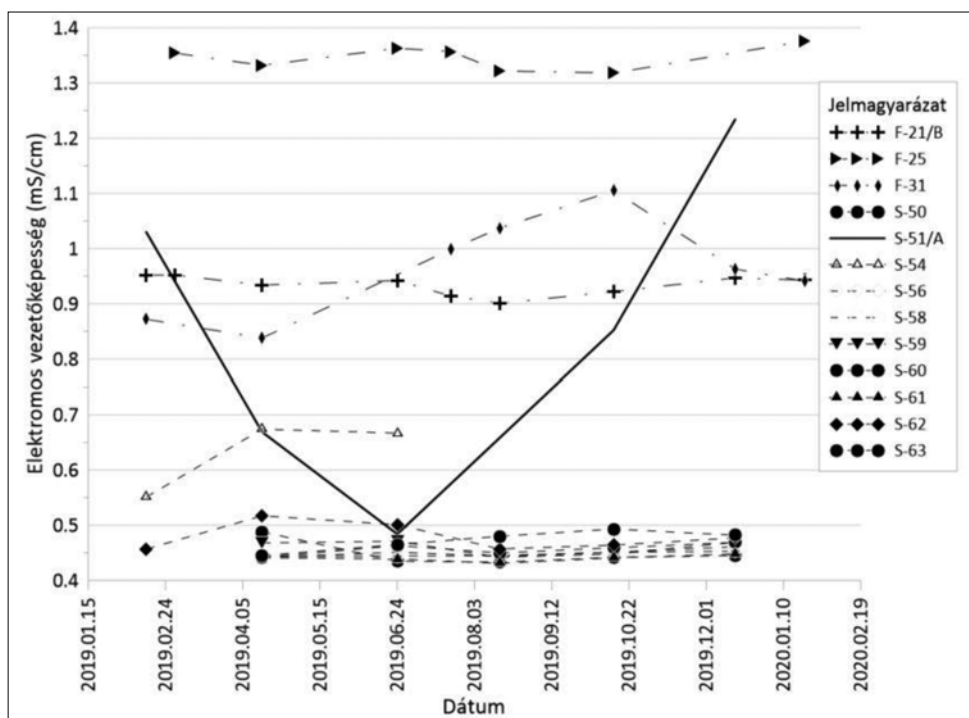
6. ábra. A havi rendszerességgel mintázott figyelőkutak (pont), a vizsgált termelőkutak (kereszt), és a kéthavi rendszerességgel vizsgált figyelőkutak (pont a kinagyított ábrán) elhelyezkedése a Szentendrei-szigeten



7. ábra. A surányi kútsor 15. számú termelőkútjának környezetében mért vízszint

selkedése jól lekövethető. A vízszintváltozások alakulását a 7. ábra szemlélteti. A Duna vízszintje alatti pontokkal jelölt görbe a Dunához legközelebb eső fi-

gyelőkút vízszintjének változását mutatja. A görbéből látható, hogy az S-54-es figyelőkút vízszintje nagyon jól leköveti a Duna vízszintjének változását, termé-



8. ábra. A Szentendrei-szigeten terepi kézi mérőeszközökkel végzett elektromos vezetőképességi mérés eredményei

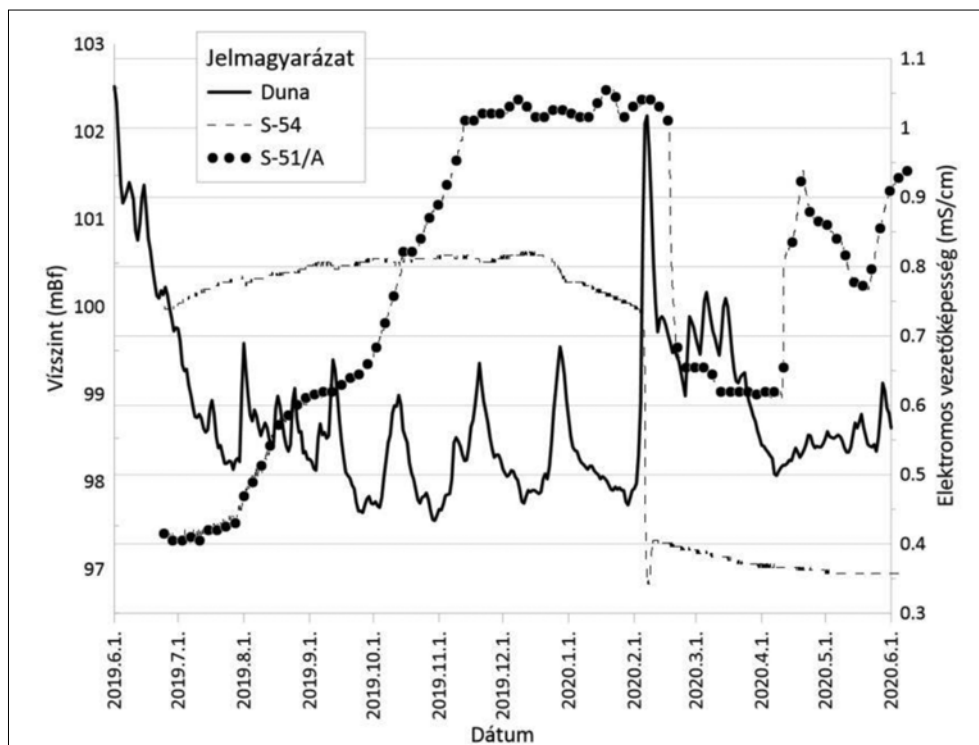
szetesen alacsonyabb vízszinttel. A termelőkutak háttérét jellemző S-51/A jelű kút esetében a mért vízszint a Duna vízszintváltozását már csak tompítva mutatja. Néhol ebben a megfigyelőkútban mért vízszint meg is haladja a Duna vízszintjét, ami arra enged következtetni, hogy ha rövid ideig is, de előáll az a helyzet, hogy a Duna megcsapolja a vízadó réteg vizét. Mind ezen görbék alatt figyelhető meg a termelőkutak vonalában kialakított figyelőkutak vízszintjének változása, amelyet az S-50 jelű figyelőkút adatai szemléltetnek. A háromszöggel jelzett görbe helyzete mutatja azt a depressziós sávot, amelyet a termelőkutak víztermelése okoz, azonban itt is megfigyelhető a Duna vízszintváltozásának hatása.

Az elektromos vezetőképesség adatokat a terepi kézi mérésekből, valamint a vízszintregisztráló műszerek által rögzített adatokból nyertük. Elsőként a terepi mérőeszközökkel megvalósított méréseket mutatjuk be. Elmondható, hogy az elektromos vezetőképesség értékek összhangban vannak a figyelőkutak elhelyezkedésével. A 8. ábra alsó részén szaggatott vonallal láthatóak azok az értékek, amelyeket a Dunával párhuzamosan telepített figyelőkút sorban mérünk. Az elektromos vezetőképesség értékek 0,4–0,5 mS/cm értékek között változnak, ezekből egyértelmű tendenciát nem lehet meghatározni, gyakorlatilag állandónak tekinthetők. Ettől kismértékben térnek el az S-54 jelű figyelőkút adatai, azonban nem számottevő módon. Ezen értékektől markánsan elkülönül a háttérét jellemző figyelőkutak elektromos vezetőképesség értékei, amelyeket pontvonallal mutat a 8. ábra.

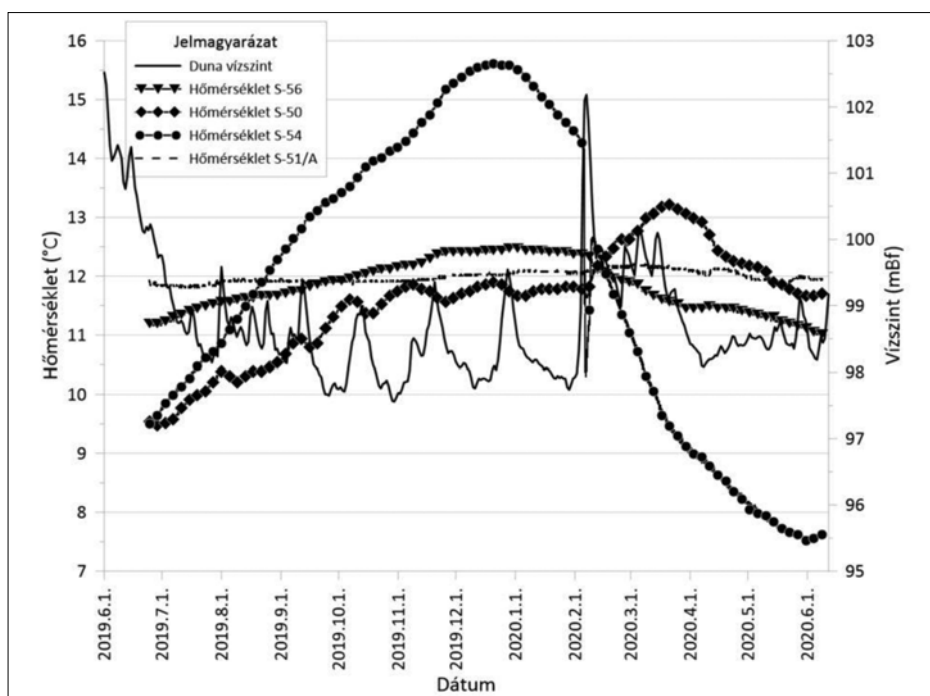
Az F-21/B jelű figyelőkút 0,9 és 1 mS/cm érték közötti értékeket, míg az F-25 jelű kút esetében 1,3–1,4 mS/cm értékeket láthatunk, amelyek nem mutatnak nagy ingadozásokat. Az F-31 jelű figyelőkút esetében láthatunk egy emelkedést 2019. áprilistól októberig, ennek okának meghatározása azonban további vizsgálatokat igényel. Ezen háttérben lévő kutak esetében elmondható, hogy elektromos vezetőképesség értékeik markánsan elkülönülnek a termelőkutak közötti figyelőkutak értékeitől. Mivel a háttérben lévő figyelőkutak szántó föld, illetve üdülővezet mellett találhatóak, az értékek különbségét okozhatja az eltérő területhasználat is. Az S-51/A jelű figyelőkút az elektromos vezetőképesség szempontjából „kakukktojásnak” mondható, mivel itt egy markáns csökkenés, majd június végétől egy markáns növekedés tapasztalható.

A mérési és mintavételi kampány során lehetőségünk nyílt olyan regisztráló műszerek telepítésére, amelyek az elektromos vezetőképesség mérésére és regisztrálására is alkalmas. A Dunához legközelebb eső S-54 jelű, és a háttérben lévő S-51/A jelű figyelőkutakba kerültek ezek a műszerek.

Megfigyelhető, hogy az S-54 jelű, a Dunához legközelebb eső figyelőkúthoz tartozó értékek a mérés kezdetétől január végéig nem mutatnak markáns változást. Az elektromos vezetőképesség értékek 0,7 és 0,8 mS/cm között mozognak ebben az időszakban. Január végén egy markáns leesés figyelhető meg az elektromos vezetőképesség változásában, amelyet egy újabb, viszonylag egyenes időszak követ. Ez-



9. ábra. Az elektromos vezetőképesség alakulása a Dataqua műszer által mért értékek alapján



10. ábra. A mért és regisztrált hőmérsékleti adatok változása

zel a leeséssel egyidőben megfigyelhető a Duna vízszintjének hirtelen megugrása, amely okozója lehet az elektromos vezetőképesség hirtelen nagymértékű változásának. A háttérben lévő S-51/A jelű figyelőkútról elmondható, hogy a mérés kezdetétől egészen november elejéig folyamatos növekedés tapasztalható, majd egy viszonylag kiegyenlített időszak után itt is megjelenik az a lezökkenés, amelyet az S-54 jelű kútnál már bemutattunk. A hirtelen csökkenés időben eltolva jelentkezik, azonban hasonlóképpen a Duna árhullámának tulajdonítható. Ezt követően markáns ingadozás jellemzi az elektromos vezetőképességet, aminek okát további vizsgálatok magyarázhatják meg.

A már előzőekben említett vízszintmérő és regisztráló műszerek a figyelőkutakban mérték, és regisztrálták a hőmérséklet változását is. A mérési eredményeit a 10. ábra szemlélteti. A 10. ábra vonalai közül legszembevetőbb lehet az S-54 jelű figyelőkút hőmérséklet adatai. Itt látható, hogy a hőmérséklet a mérési időtartam alatt egy hullámszerű, nagymértékű növekedést, majd egy nagymértékű csökkenést mutat. Ezt a tendenciát töri meg a február eleji hirtelen hőmérséklet-csökkenés és -növekedés, ami az ez időben lezajló Dunai árhullámnak tulajdonítható. Ez azért is meglepő, mert az S-54 jelű figyelőkút a Dunához legközelebb eső figyelőkút. Az S-51/A jelű kút esetében a hőmérséklet viszonylag egyenletesnek mondható, 12 °C körül mozog. A négyzetekkel S-50 jelű kút hőmérsékletgörbéjének hullámzó tendenciáját indukálhatja a Duna vízszintjének változása. Érdekes megfigyelni, hogy az S-50 és az S-56 jelű figyelőkút

ugyanolyan távolságra van a termelőkúttól és a Dunától is, mégis a hőmérséklet változásában különböző tendenciát mutatnak.

A terepi mérések célja volt, hogy a Tiszta Ivóvíz projekt céljait megvalósítva képet kapjunk a Szentendrei-szigeten elhelyezkedő surányi kútsor hidraulikai viselkedéséről. A mérési eredmények bemutatása során is megfigyelhetőek olyan jelenségek, amelyek további vizsgálatra érdemesek. Két olyan jelenséget szeretnénk megemlíteni, ami ugyanarra a körülményre utalhat.

Az egyik a 4. ábra korrelációs együttható értékeinél figyelhető meg. Látható az ábrán, hogy a Duna vízszintje és az üzemi vízszint közötti korrelációs együttható értéke csökkenő tendenciát mutat a Dunától való távolság növekedésével, azonban vannak közöttük kiugró értékek. Ilyen kiugró értéket mutat a 18. számú csáposkút, ahol a nagy Dunától való távolság ellenére viszonylag nagy 0,82 körüli korrelációs együttható érték jelentkezik.

A másik ilyen jelenség a hőmérséklet-idősornál figyelhető meg. A 10. ábra S-50 jelű kúthoz tartozó zöld görbéjén felfedezhetőek olyan ingadozások, amelyek a Duna vízszintjének változásával hozhatók összefüggésbe. Az S-56 jelű figyelőkút esetében ilyen változások nem tapasztalhatóak, holott ugyanolyan távolságra van a termelőkúttól, valamint a Dunától is.

E két jelenség felveti annak a lehetőségét, hogy habár a vízadó réteg regionális léptékben homogénnek tekinthető, ennek ellenére lokálisan valószínűsíthetőek kitüntetett áramlási pályák, amelyek mentén a Duna és a termelőkút erősebb hidraulikai kapcsolat

ban van. Ennek a feltételezésnek bizonyítása és a ki-tüntetett áramlási pályák helyzetének meghatározása további vizsgálatokat igényel.

Összefoglalás

Munkánkban a „Tiszta ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztó-ig” című projekthez kapcsolódó hidrogeológiai feladatokat mutattuk be a surányi vízbázis segítségével. A mérési és mintavételi kampány egy éven keresztül zajlott különböző gyakorisággal. A vízszint mellett mértük a hőmérséklet, valamint a fajlagos elektromos vezetőképesség értékeket is. A figyelőkutak egy részénél vízszintmérő és regisztráló műszereket alkalmaztunk, amelyek a fent említett paraméterek tekintetében óránkénti mérést és regisztrálást végeztek. A mérések célja az volt, hogy megismerjük a surányi kútsor környezetében kialakuló potenciál-, hőmérséklet-, és elektromos vezetőképességi viszonyokat annak érdekében, hogy a későbbiekben az itt kapott ismereteket felhasználjuk a hidrodinamikai modell felépítésében. A méréseink kiértékelése során megállapítható, hogy a Dunának döntő szerepe van a termelőkutak, valamint a figyelőkutak vízszintjének alakulásában. Alapvetően az uralkodó vízáramlás a Duna felől a termelőkutak irányába történik, azonban a Duna alacsony vízállása esetén ez az áramlási irány megfordulhat. A hőmérséklet és elektromos vezetőképesség adatok változásának vizsgálatakor arra a következtetésre jutottunk, hogy az alapvetően jó vízvezető képességgel rendelkező vízáradó rétegben valószínűsíthetőek olyan kitüntetett áramlási pályák, amelyek mentén erősebb hidraulikai kapcsolat alakulhat ki a termelőkút és a Duna között.

A kapott eredmények a további kutatási feladatokat is kijelölik. További vizsgálatokat igényel a hőmérsékletváltozás-anómália tisztázása az S-54-es figyelőkútban, valamint az elektromos vezetőképesség szokatlan változása az S-51/A jelű figyelőkútban. Mindezen információk segítségével megvalósíthatjuk a hidrodinamikai modell felépítését és kalibrációját, amely lehetőséget ad különböző scenáriók, valamint az elérési idő vizsgálatára.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a 2018-1.2.1-NKP-2018-00011 sz. projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2018-1.2.1-NKP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

IRODALOM

- [1] Ray C., Grischek T., Schubert J., Wang J., Speth T. F. (2002): A perspective of riverbank filtration. *J. Am. Water Works Assoc.*, 94(4), 149–160.
- [2] Hiscock K. M., Grischek T. (2002): Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. *J. Hydrol.*, 266, 139–144.
- [3] Országos Vízügyi Főigazgatóság (2021): Magyarország Vízyűjtő-gazdálkodási Terve (VGT3), II. Vitaanyag.
- [4] Kármán K. (2013): A parti szűrésű vízbázisok és jelentőségük, *Magyar Tudomány*, 174(3), 1300–1307.
- [5] Székely F., Nyiri G., Szűcs P., Zákányi B. (2021): Analytically supported numerical modeling of horizontal and radial collector wells, *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(12).
- [6] Nyiri G., Székely F., Zákányi B., Szűcs P. (2019): Horizontális és csápos kutak hidraulikai modellezése különböző számítási eljárások segítségével, *Hidrologiai Közöny*, 99(4), 35–41.
- [7] Oláh P., Fodor L., Tóth T., Deák A., Guy D., Horváth F. (2014): A Szentendrei-sziget környéki folyóvízi szeizmikus szelvényezések földtani eredményei, *Földtani Közöny*, 144(4), 359–380.
- [8] Karátson D., Márton E., Harangi Sz., Józsa S., Balogh K., Pécskay Z., Kovácsvölgyi S., Szakmány Gy., Dulai A. (2000): Volcanic evolution and stratigraphy of the Miocene Börzsöny Mts., Hungary. An integrated study. *Geologica Carpathica*, 51, 325–343.
- [9] Bence G., Császár G., Darida-Tichy M., Dudko A., Gálos M., Gangl G., Kertész P., Korpás L., Zier C. (1991): Geologische und ingenieurgeologische Beschreibung der Donaustufe bei Nagymaros. In: Lobitzer, H., Császár, G. (eds): *Jubiläumsschrift 20 Jahre geologische Zusammenarbeit Österreich–Ungarn*, Geologisches Bundesanstalt, Wien, 385–400.
- [10] Góczán L. (1955): A Szentendrei sziget geomorfológiai fejlődéstörténete. *Földrajzi Értesítő*, 4, 301–316.
- [11] Mari L. (2002): A Szentendrei-sziget kialakulása és felszínének változása a holocénban, *Földtani Közöny*, 132(különszám), 185–192.
- [12] Tolnai B. (szerk.) (2008): *Vízellátás, Mátyus Sándor nyomán, A Fővárosi Vízművek ZRt. üzemeltetői ismeretanyaga*, Budapest
- [13] Deák J., Hertelendi E., Süveges M., Barkóczy Zs. (1992): Partiszűrésű kutak vizének eredete trícium koncentrációjuk és oxigén izotóparányaik felhasználásával. *Hidrologiai Közöny*, 72(4), 204–210.
- [14] Völgyesi I. (1993): Mederkapcsolati hatások: a parti szűrésű víztermelés fontos paramétere. *Hidrologiai Közöny*, 73(5), 261–264.
- [15] KHVM, Közlekedési, Hírközlési és Vízügyi Minisztérium (1999): *A sérülékeny földtani környezetben lévő távlati ivóvízbázisok biztonságba helyezésének módszertana és tervtartalmi követelményei*, Kézirat, Közlekedési, Hírközlési és Vízügyi Minisztérium, Budapest, 20 p.

A módosított plungerlift gázkutak talpi folyadékfelhalmozódásának megszüntetésére

DR. TURZÓ ZOLTÁN
olajmérnök, PhD, egyetemi docens
Miskolci Egyetem



A cikkben egy hagyományos plungerliftes berendezés célszerűen módosított változatát mutatja be, amely segítségével a jelenleg a talpi folyadékfelhalmozódás megszüntetésére az iparban használt módszerek hátrányos tulajdonságai kiküszöbölhetők. Az új berendezéssel a korábbi módszereknél alacsonyabb áramlási talpnyomás tartható fent a gázkutakban, nem igényel segédenergiát, és a már létező szerelvények segítségével kiépíthető. A cikkben bemutatásra kerül a berendezés felépítése, a működése és az üzemeltetéséhez nélkülözhetetlen paraméterek meghatározására kidolgozott egyenletek.

Bevezetés

A földgázmezők életkorának növekedésével jelentkeznek az öregedő gázmezőkre jellemző problémák: csökkenő rétegnyomás, növekvő folyadéktermelés, csökkenő gázhozamok.

Általában a gázkutak nem ún. száraz gázt termelnek, hanem a gáztermelés szinte minden esetben valamennyi folyadéktermeléssel párosul. A termelt folyadék víz és/vagy szénhidrogén kondenzátum. A termelés kezdetén, amikor a rétegnyomás nagy, a kútba még kis talpi depresszió esetén is nagymennyiségű gáz áramlik. A nagymennyiségű gáz áramlási sebessége is nagy, így mozgásenergiája elegendő ahhoz, hogy a rétegből a kútba lépő folyadékot a felszínre emelje.

A rétegnyomás csökkenés hatására a kút gázhozama fokozatosan csökken, így az áramló gáz sebessége és mozgásenergiája is csökken. Ha a gáz mozgásenergiája már nem elegendő a folyadék felszínre emeléséhez, a rétegből a kútba lépő folyadék fokozatosan felhalmozódik a talpon. A talpon felhalmozódó folyadék hidrosztatikus nyomása a talpra hatva növeli az áramlási talpnyomást. Növekvő áramlási talpnyomás hatására a rétegből a kútba még kevesebb gáz lép be, ami tovább növeli a felhalmozódó folyadék mennyiségét, mivel még kevesebb folyadék felszínre szállítására képes. Ez a folyamat egy öngerjesztő folyamat, ami egyre gyorsul és előbb-utóbb a kút teljes leállítását is okozhatja.

Mivel a rétegnyomás szinte minden esetben csökken a termelés során, és a tároló kőzetekben is található folyadék (tapadó víz vagy kondenzátum), nem az a kérdés, hogy a kút életében elő fordulhat-e folyadék felhalmozódás, hanem az, hogy mikor fog ez bekövetkezni.

Az ipari gyakorlatban jelenleg használt módszereket három csoportba sorolhatjuk a felhasznált energia szempontjából: a felszálló termelés fenntartása (se-

gédenergia nélkül), rásegítés a felszálló termelésre, mélyszivattyúzás. Ez a csoportokba sorolás követi a kutak életciklusát is.

A jelenleg alkalmazott folyadékeltávolítási módszerek közös hibája, hogy nem tartható fenn egy folyamatosan alacsony áramlási talpnyomás. Az ideális az lenne, ha a talpon fokozatosan felhalmozódó és a gázáramban lebegő folyadékot folyamatosan el lehetne távolítani, hogy ne korlátozza a beáramlást.

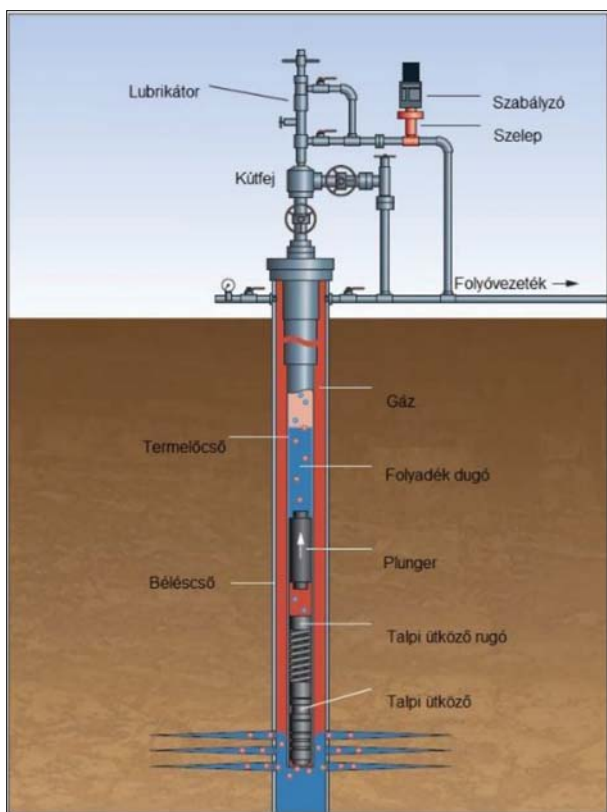
Természetesen egy ideális folyadék eltávolítási módszer azon kívül, hogy rendelkezik az említett tulajdonsággal, alacsony bekerülési költségű, olcsó, és megbízhatóan üzemeltethető.

Sajnos a felsorolt módszerek egyike sem rendelkezik mindegyik elvárt tulajdonsággal, ezért kidolgoztam egy olyan módszert, amely legjobban megfelel az elvárásoknak. Az új módszer alapjául, kedvező tulajdonságai miatt, a plungerliftes termelő berendezést választottam és fejlesztettem tovább.

Plungerlift

A plungerliftet leginkább az időszakos folyadéktermelés során használják, ennek egy speciális fajtája. Sajátossága, hogy a folyadéktermelési periódus alatt felemelkedő folyadék dugó és gáz oszlop között a folyadék visszacsorgást jelentősen csökkentő dugattyú (plunger) mozog. A plungerliftek alapvetően két csoportba sorolhatók: a valódi és a kombinált plungerliftek csoportjába. A kombinált plungerliftek esetén a folyadék kiemeléshez segédgázra is szükség van, a valódi plungerlift esetén nem kell segédenergia.

Az 1. ábra egy valódi plungerlift sematikus ábráját mutatja. A valódi plungerliftetnél pakkert nem alkalmaznak, a kút termelt gázának nyomásenergiája hasznosítható. A plungerlifttel ezért néha segédenergia nélkül is termelnek olyan kutak, amelyek folyamatosan felszállva termelni már nem tudnak. Ezt a



1. ábra. Valódi plungerlift sematikus ábrája (slb.com/resource-library)

tulajdonságát lehet kihasználni a gázutak talpi folyadékfelhalmozódásának eltávolítására.

A plungerliftes gázutak működése a következő:

1. A kút a termelőcsövön keresztül termeli a gázt a folyóvezetékbe, a dugattyú a lubrikátorban helyezkedik el, a szabályzó a folyóvezetéken található szelepet nyitva tartja, közben a talpon, a gyűrűstérben és a termelőcsőben fokozatosan gyűlik a visszacsorgó folyadék. A visszacsorgó folyadék hidrosztatikus nyomása fokozatosan csökkenti a rétegből a gáz beáramlását, a kútfejen a nyomás fokozatosan csökken.
2. Amikor a gázhozam és/vagy a nyomás a kútfejen egy meghatározott értékre csökken, a szabályzó a folyóvezeték szelepet lezárja. A lezárt kútban a rétegből történő beáramlás hatására el kezd a nyomás növekedni. A megnövekedett nyomású gáz a csőközből és a termelőcsőben halmozódik fel. Amikor a gáz elérte a kívánt nyomás értéket, a dugattyút a lubrikátorból a kúttalpra ejtik, az ütkezés energiáját a termelőcső alján lévő ütkező tompítja. Miután a dugattyú a talpra érkezett, a szabályzó kinyitja a folyóvezeték szelepet, és a csőközből felhalmozódott gáz nyomásának segítségével a dugattyú a felette lévő folyadékot a folyóvezetékbe továbbítja. A dugattyú a lubrikátorban rögzül, a következő ciklusbeli szerepéig.

3. A kút a lecsökkent talpnyomás miatt újra a korábbi gázhozamot termeli, és elkezdődik a folyadék újbóli talpi felhalmozódása.

Módosított plungerlift

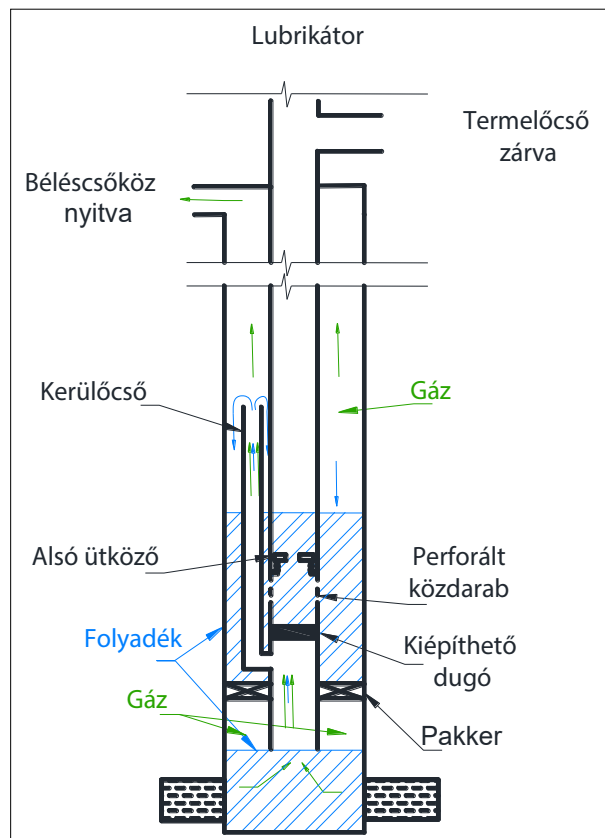
A valódi plungerlift kis termelési talpnyomások megvalósítására nem alkalmas, mivel a felhalmozódó folyadék és a csőközből lévő gáz nyomása a kúttalprahat.

Ezt a hátrányát a módszernek viszonylag egyszerűen ki lehet küszöbölni, amennyiben a visszacsorgó folyadékot a gyűrűstérben gyűjtjük össze, és onnan időszakonként eltávolítjuk. Egy ilyen módosított plungerliftes berendezés sematikus ábráját és működését szemléltetik a 2. és 3. ábra.

Az ábrákon csak a mélybeni szerelvényeket tüntettem fel, a felszíni szerelvények megegyeznek a valódi plunger lift felszíni szerelvényeivel.

A mélybeni szerelvényeken a következő módosításokat hajtottam végre:

- A termelőcső és béléscső csőközét egyutas pakker zárja el, a pakker alá a termelőcső a lehető legmélyebbre nyúlik be. A lejjebb nyúló termelőcső tovább csökkenti a talpra nehezedő folyadékoszlop magasságát, mivel a pakker alatti térben gáz halmozódik fel, kiszorítva onnan a folyadékot a termelőcső végéig.



2 ábra. Módosított plungerlift (gáztermelési periódus)

- ❑ A kerülőcső csatlakoztatása a pakker feletti gyűrűstér aljához közel, egy Y-blokk segítségével történik.
- ❑ Az Y blokk felett egy kiépíthető dugó zárja el a termelőcsövet, a kerülőcsőbe terelve a kútáramot.
- ❑ A termelőcsőben, a kiépíthető dugó felett és az alsó dugattyú-ütköző alatt egy perforált közdarab helyezkedik el, a csőköz és a termelőcső dugó feletti részének megfelelő kommunikációja érdekében. A perforációk össz keresztmetszete megegyezik a termelőcső belső keresztmetszetével.

A berendezés működése két szakaszra bontható: 1. gáztermelés 2. folyadékkiemelés.

Gáztermelési szakasz

A 2. ábra a gáztermelési szakaszt szemlélteti. Mint az az ábrán látható a termelőcső zárva van, a termelőcső a csőköz felé nyitott a perforált közdarabon keresztül. A dugattyú a lubrikátorban van a felszínen. A gáztermelés a csőközön keresztül történik. A lyuktalpon belépő folyadék és gáz a termelőcső alsó szakaszán majd az Y blokkon át a kerülőcsőbe és azon keresztül a gyűrűstér pakker feletti szakaszába áramlik, s ott a megnövekedett keresztmetszet hatására lelassul. A lassú áramlási sebességnek köszönhetően a folyadékcsseppek a csőköz aljára hullanak és a perforált közdarabon keresztül a termelőcső dugó feletti szakaszába is beáramlik. A folyadék szint a csőközben és a termelőcsőben közel azonos lesz, bár némi szinteltérést okozhat, hogy a csőköz és a termelőcső tetején nem azonosak a nyomások. A termelőcsőbe lévő gáz kompressziója, az egyre magasabb folyadékoszlop miatt és a csőközben áramló gáz súrlódási nyomásvesztése csökkenti a szintkülönbséget. A szintek vizsgálata viszonylag egyszerű számítással ellenőrizhető. A kerülőcső átmérőjét úgy kell megválasztani, hogy ne okozzon túl nagy nyomásvesztést, de az átáramlási sebesség elég nagy legyen a folyadékcsseppek elszállításához (Turner-féle kritikus sebesség).

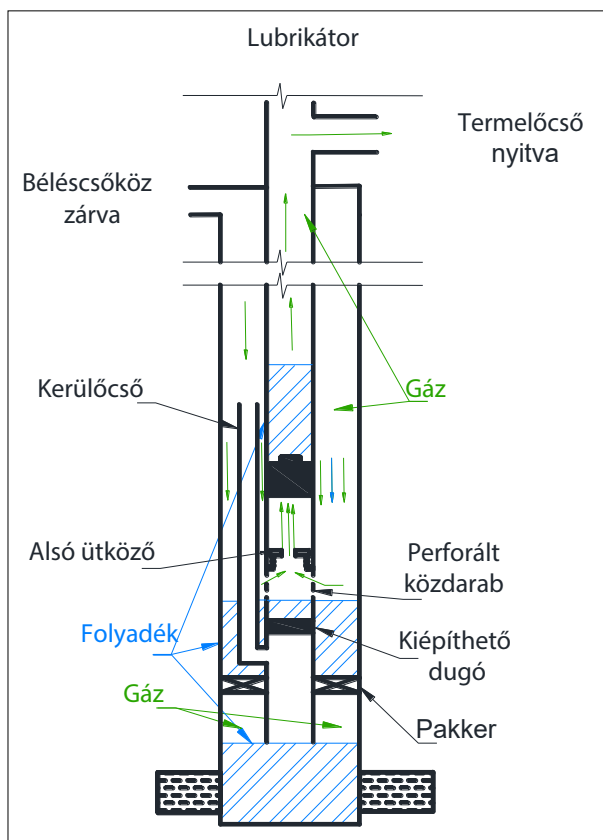
A nagyobb áramlási keresztmetszet (termelőcső helyett a csőköz), a lebegő folyadékcsseppek kiülepedése és az, hogy a kiülepedett folyadék nem terheli a lyuktalpat egyaránt a kisebb áramlási talpnyomást (nagyobb hozamokat) eredményeznek, s így növelve a kút termelékenységét. A kisebb talpnyomás végeredményben a kút felhagyási nyomását is csökkenti, növelve ezzel a réteg kihozatali tényezőjét.

A gáztermelési szakaszban a pakker feletti gyűrűstérben és a termelőcsőben összegyűlt folyadék magassága növekszik. A termelőcső tetején a nyomás fokozatosan emelkedik. A termelőcső felszíni nyomásából meghatározható, hogy mikor kell az összegyűlt

folyadékot a felszínre emelni. (A folyadékoszlop maximális hosszát a rétegnyomás és a csőköz térfogata határozza meg.)

Folyadékkiemelési szakasz

A gáztermelés szakasz addig tart, amíg a termelőcső felszíni nyomása el nem éri a meghatározott értéket (azt a nyomásértéket, amelyhez tartozó termelőcsővön mérhető kútfejnyomás esetén a termelőcsőben lévő folyadék oszlop hossza, valamint a csőközben lévő folyadék térfogat termelőcsőbe kerülés után elfoglalt együttes hossza elérte a kiemelendő nagyságot). Ezután a folyadék kiemelési szakasz következik. Ekkor a csőközt lezárjuk, a termelőcső is zárva marad. A rétegből belépő gáz a csőközben gyűlik össze, közben a nyomása fokozatosan nő, a csőközben lévő folyadékot fokozatosan a termelőcsőbe nyomja, természetesen közben a termelőcső nyomása is növekedni fog. Ebben a szakaszban a beáramló folyadék mennyisége már nem számottevő, mivel a gáz térfogatárama fokozatosan csökken. Amikor a csőközben lévő gáz nyomása elérte a kiemelendő folyadékoszlop kiemeléséhez szükséges értéket, a lubrikátorból a dugattyút a talpra ejtjük (a dugattyú talpra érkezéséhez szükséges idő kiszámítható). A dugattyú talpra érkezése után a termelőcsövet kinyitjuk, és a csőközben felhalmozódott megnövekedett nyomású gáz a perforált köz-



3. ábra. Módosított plungerlift (folyadékkiemelési periódus)

darabon keresztül még a csőközben lévő folyadékot a termelőcsőbe nyomja, majd a gáz is a dugattyú alá áramlik és a dugattyút és a felette lévő folyadékoszlopot a felszínre szállítja. (A termelőcső nyitása után a dugattyú alá kerülőfolyadék megemeli a dugattyút, és a kiemelés során jelentős része visszacsoroghat a termelőcső aljára. Ezért a tervezésnél a kiemelendő folyadékoszlop hosszát úgy kell megválasztani, hogy a nyomásemelkedés végére, lehetőleg minimális folyadékmennyiség legyen a csőközben.) A dugattyúnak köszönhetően a dugattyú feletti folyadékoszlopból visszacsorgó folyadék mennyisége nem jelentős. A dugattyút a felszínre érkezésekor a lubrikátorban rögzítjük. A folyadékkiemelési szakasz kezdetét szemlélteti a 3. ábra.

A folyadék felszínre szállítása után a termelőcsövet lezárjuk és a csőközt újra nyitjuk, így újra indítva a gáztermelési szakaszt.

A bemutatott módosított plungerliftes kútkiképzés előnyei a következők:

- ❑ Segítségével az alacsony nyomású, talpi folyadékfelhalmozódási problémával küszködő gázkutakból a folyadék anélkül eltávolítható, hogy a felhalmozódó folyadék visszafogná a kút termelését.
- ❑ A bemutatott kútkiképzés nem igényli új eszközök, szerelvények kifejlesztését, már kifejlesztett eszközök segítségével kivitelezhető.
- ❑ Nem igényel segédenergiát.
- ❑ A berendezés beruházási költségei alacsonyak (az egyéb, mélyszivattyús folyadékkiemelési módszerekhez viszonyítva).
- ❑ A berendezés üzemeltetése olcsó, nincs energia költség sem.
- ❑ Alacsony rétegnyomásig használható, a megfelelő folyadék oszlop hosszok megválasztásával. (természetesen ekkor a ciklusszámok optimalizációját el kell végezni).

Alkalmazhatósági kritériumok

Egy kiemelési módszer kiválasztásánál nagyon fontos annak az eldöntése, hogy alkalmazható-e egyáltalán az adott kút esetén a kiválasztott módszer. Ezért ebben az alfejezetben bemutatom a módosított bűvárdugattyús termelési mód alkalmazhatósági kritériumait.

A szakirodalmi eset tanulmányokban a hagyományos bűvárdugattyús folyadék kiemelési mód segítségével a felhagyási rétegnyomást akár igen alacsony 7 baros szintre le lehet csökkenteni egy 1800 m mély gázkút esetén. Ebből is látszik, hogy a rétegnyomással szembeni kritérium elég alacsony, vagyis széles körű alkalmazhatóságot prognosztizál. Természetesen a rétegnyomáson túl más szempontokat is figyelembe kell venni, ezeket mutatom be ebben az alfejezetben. Ezek olyan hüvelykujj szabályok, amelyek segítségével,

minimális számítási igénnyel eldönthető, hogy alkalmazható-e a módosított bűvárdugattyús folyadékkiemelés az adott gázkút esetén.

Minimális gáz–folyadék viszony

A termelt gáz- és folyadékmennyiséget a mélységgel kombinálja ez a kritérium, mely 1 Nm³/nap folyadék 1000 m mélységből való kitermeléséhez szükséges gázmennyiséget adja meg alkalmazhatósági kritériumként:

$$GFV_{\min} > 235(L_p/1000), \quad (1)$$

ahol

GFV_{\min} – a minimális gáz–folyadék viszony, Nm³/Nm³,

L_p – a kútmélység (perforáció közepe), m.

Például, egy 2000 m mély, 500 Nm³/Nm³ gáz–folyadék viszonytal (GFV) rendelkező gázkút esetén a bűvárdugattyús folyadékkiemelés megvalósítható, mivel az összefüggés szerint minimálisan szükséges $GFV = 470$ Nm³/Nm³.

Minimális bélésűcsőfejnyomás

A második, a módszer alkalmazását ellenőrző kritérium a kút zárását követően, elfogadható időn belül a bélésűcsőfejen kialakuló nyomás:

$$P_{\min} > 1,5P_{\text{vez}}, \quad (2)$$

ahol

P_{\min} – a minimálisan szükséges bélésűcsőfejnyomás, bar,

P_{vez} – a folyóvezeték nyomása a kútfejen, bar.

Amennyiben a gázkút GFV -a és a bélésűcsőfejnyomása eléri az (1) és (2) egyenletek által előírt értéket, a folyadékfelhalmozódás eltávolítható a módosított plungerliftes módszer segítségével.

A tervezéshez szükséges adatok

A termelőberendezés megtervezéséhez az 1. táblázatban foglalt adatok ismeretére van szükség (az egyes mélység adatok értelmezéséhez ad segítséget a 4. ábra):

A berendezés tervezése

A továbbiakban bemutatom a berendezés üzemeltetéséhez szükséges paraméterek meghatározásához kidolgozott egyenleteket.

$$A \text{ bélésűcsőfej maximális nyomásának } (P_{\text{chmax}}) \text{ meghatározása}$$

A bélésűcsőfejen kialakuló maximális nyomás elméleti nagyságának meghatározása során abból a fel-

1. táblázat. A módosított plungerliftes termelőberendezés tervezéséhez szükséges adatok

Jele	Paraméter megnevezése	Mértékegység
γ_g	Termelt gáz relatív sűrűsége	–
γ_{con}	Termelt kondenzátum relatív sűrűsége	–
γ_w	Termelt víz relatív sűrűsége	–
P_r	Átlagos rétegnyomás	Pa
L_{res}	Réteg közepének mélysége	M
T_r	Réteg hőmérséklet	°C
R_{con}	Gáz–gáz kondenzátumviszony	–
R_w	Gáz–víz viszony	–
R_l	Gáz–folyadék viszony	–
P_{sep}	Szeperatornyomás	Pa
L_{vez}	Folyóvezeték hossza	m
H_{vez}	Szintkülönbség a szeperator és a termelőcső kifolyó között	m
d_{ivez}	Folyóvezeték belső átmérője	m
d_{hvez}	Termelőcső kifolyó és a bélésűcső-kifolyó távolsága	m
L_{kcs}	Kerülőcső tetejének a mélysége a csőközkifolyótól	m
H_{kcs}	Kerülőcső hossza	m
d_{hkcs}	Kerülőcső aljának távolsága a réteg közepétől	m
d_{ikcs}	Kerülőcső belső átmérője	m
d_{okcs}	Kerülőcső külső átmérője	m
d_{ibcs}	Bélésűcső belső átmérője	m
d_{itcs}	Termelőcső belső átmérője	m
d_{otcs}	Termelőcső külső átmérője	m
L_{pac}	Pakker tetejének mélysége	m
L_{pk}	Perforált közdarab mélysége	m
$L_{üt}$	Dugattyú alsó ütőközjének mélysége	m

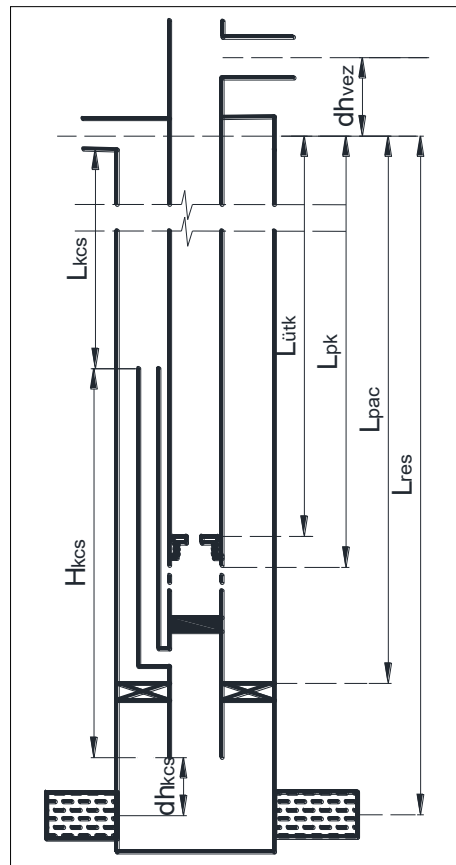
tételezésből indulunk ki, hogy a csőközben statikus gázoszlop helyezkedik el, valamint a csőközben lévő folyadékoszlop nyomása nem hat a kúttalpra a csőközt lezáró pakker miatt. A pakker alatti bélésűcsőben a kerülőcső aljáig folyadék, felette pedig a pakker aljáig gáz található. Ezt figyelembe véve a csőköz tetején a statikus gázoszlop nyomása:

$$P_{chmax} = (P_r - \rho_f g dh_{kcs}) \times \exp\{-[0,0018(L_{res} - dh_{kcs})M/\bar{T}\bar{z}]\}, \quad (3)$$

ahol

P_{chmax} – a csőköz tetején a statikus gázoszlop maximális nyomása, Pa,

ρ_f – a csőköz aljában lévő folyadék aktuális sűrűsége, kg/m³,



4. ábra. Geometriai adatok értelmezése

M – a termelt gáz móltömege, kg/kmol,

\bar{T} – a csőköz átlagos hőmérséklete, °K,

\bar{z} – a csőközben lévő gáz eltérési tényezője a csőköz átlag nyomásán és átlag hőmérsékletén, –.

A (3) egyenlet egy iterációs számítási folyamatot igényel, mivel a \bar{z} kiszámításához ismerni kellene a P_{cmax} értékét is.

A gáztermelési szakasz elején a termelőcsőben lévő gáz mennyisége (V_{gnt0})

A termelőcsőben lévő gáz mennyisége a gáztermelési szakasz elején fontos paraméter a berendezés működtetése szempontjából, hisz ez adja az alapot a kiemelendő folyadékoszlop hosszához tartozó termelőcsőfej nyomásának a meghatározásához. A számításához azt feltételezzük, hogy ekkor a termelőcső kifolyón P_{vez} nyomás uralkodik, és a termelőcsőből kiáramló gáz térfogatárama olyan kicsi, hogy statikus gázoszlopnak is tekinthetjük a nyomáseloszlás szempontjából. Továbbá feltételezzük, hogy a termelőcsőben a perforált közdarab felett nincs folyadék. Ezzel nem követünk el nagy hibát, mivel a dugattyú mellett a visszacsorgás nem túl jelentős [1]. A termelőcsőben a gáztermelési szakaszt kezdetén lévő gáz térfogatát normál állapotban a következő egyenlettel

lehet meghatározni:

$$V_{gnt0} = \bar{z}_{i0} \frac{d_{\text{ics}}^2 \pi}{4} (L_{pk} + dh_{\text{vez}}) \frac{\bar{P}_{i0}}{\bar{T}_{i0}} \frac{T_n}{P_n z_n}, \quad (4)$$

ahol

V_{gnt0} – a gáztermelési szakasz elején a termelőcsőben lévő gáz mennyisége, Nm³,

\bar{z}_{i0} – a gáztermelési szakasz kezdetén a termelőcsőben lévő gáz eltérési tényezője a termelőcső \bar{P}_{i0} átlagnyomásán és \bar{T}_{i0} átlaghőmérsékletén, –,

\bar{P}_{i0} – a termelőcső átlagnyomása a vezeték kifolyó és a perforált közdarab közötti szakaszra vonatkozóan, Pa,

\bar{T}_{i0} – a termelőcső átlag hőmérséklete a vezeték kifolyó és a perforált közdarab közötti szakaszra vonatkozóan, °K,

T_n – normál hőmérséklet, 288,15 °K,

P_n – normál nyomás, 101325 Pa.

$$\bar{P}_{i0} = \frac{P_{\text{vez}} + P_{pk0}}{2}, \quad (5)$$

ahol

P_{pk0} – a gáztermelési szakasz kezdetén, a perforált közdarab mélységében uralkodó nyomás, Pa,

$$P_{pk0} = P_{\text{vez}} \exp \left\{ \frac{0,0018 (L_{pk} + dh_{\text{vez}}) M}{\bar{T}_{i0} \bar{z}_{i0}} \right\}, \quad (6)$$

$$\bar{T}_{i0} = \frac{T_{ih0} + T_{pk0}}{2}, \quad (7)$$

ahol

T_{ih0} – a gáztermelési szakasz kezdetén, a termelőcsőfejen uralkodó hőmérséklet, °K,

T_{pk0} – a gáztermelési szakasz kezdetén, a perforált közdarab mélységében uralkodó hőmérséklet, °K.

A termelőcsőfej nyomásának változása a folyadék felhalmozódása során $P_{th}(h_{fd})$

A gáztermelési szakaszban a csöközben áramló gázból kiváló folyadék a csőköz aljára hullik, a perforált közdarabon keresztül a termelőcsőbe is bejut, és egyre magasabb lesz a folyadékoszlop. A csöközben és a termelőcsőben lévő folyadékoszlop magassága kezdetben megegyezik, majd a későbbiek során, ahogy a termelőcsőben lévő gáz nyomása növekszik, a termelőcsőben kicsivel alacsonyabb lesz a folyadék szintje, mint a csöközben. A magasságkülönbség meghatározható, de jelen esetben a termelőcsőben lévő folyadékoszlop/folyadékugó magasságának h_{fd} függvényében írjuk le a termelőcsőfej P_{th} nyomásának változását. Ehhez először meghatározzuk a folyadékugó feletti tér átlagnyomását:

$$\bar{P}_{yfdf}(h_{fd}) = \frac{V_{gnt0}}{\frac{d_{\text{ics}}^2 \pi}{4} (L_{pk} + dh_{\text{vez}} - h_{fd})} \frac{P_n z_n \bar{T}_{yfdf}}{T_n \bar{z}_{yfdf}}, \quad (8)$$

ahol

$\bar{P}_{yfdf}(h_{fd})$ – a folyadékugó feletti termelőcső átlagnyomása, Pa,

h_{fd} – a folyadékugó hossza, m,

\bar{z}_{yfdf} – a termelőcsőben lévő gáz eltérési tényezője a folyadékugó feletti tér átlagos nyomásán \bar{P}_{yfdf} és átlagos hőmérsékletén \bar{T}_{yfdf} , –,

\bar{T}_{yfdf} – a folyadékugó feletti termelőcső átlaghőmérséklete, °K.

$$\bar{T}_{yfdf} = \frac{T_{th0} + T_{yfdt}}{2}, \quad (9)$$

ahol

T_{yfdt} – a termelőcsőben a folyadékugó tetején uralkodó hőmérséklet, °K.

A \bar{P}_{yfdf} meghatározása iteratív folyamat, mivel a (8) egyenletben szereplő \bar{z}_{yfdf} eltérési tényező maga is a keresett átlagnyomás függvénye.

A \bar{P}_{yfdf} átlagnyomás ismeretében a termelőcsőfejen uralkodó nyomást a következő egyenlet segítségével lehet meghatározni:

$$P_{th}(h_{fd}) = \frac{2\bar{P}_{yfdf}(h_{fd})}{1 + \exp \left\{ \frac{0,0018 (L_{pk} + dh_{\text{vez}} - h_{fd}) M}{\bar{T}_{yfdf} \bar{z}_{yfdf}} \right\}}. \quad (10)$$

A folyadékugó feletti termelőcsőtér átlagnyomásának a definíciója:

$$\bar{P}_{yfdf}(h_{fd}) = \frac{P_{th}(h_{fd}) + P_{yfdt}(h_{fd})}{2}. \quad (11)$$

Ebből a folyadékugó tetején uralkodó termelőcsőnyomás:

$$P_{yfdt}(h_{fd}) = 2\bar{P}_{yfdf}(h_{fd}) - P_{th}(h_{fd}), \quad (12)$$

ahol

$P_{yfdt}(h_{fd})$ – a folyadékugó tetején uralkodó nyomás, Pa.

Folyadékterhelési tényező [2]

A folyadékterhelési tényező annak a meghatározására szolgál, hogy a dugattyú a felszínre tud-e emelkedni a folyadékkiemelési ciklus folyamán:

$$FTT = \frac{P_{ch \max} - P_{th \max}}{P_{ch \max} - P_{\text{vez}}} < 0,5, \quad (13)$$

ahol

FTT – folyadékterhelési tényező, –,

$P_{ch\max}$ – a csőfejen a zárásperiódus végén kialakuló nyomás, bar,

$P_{th\max}$ – a termelőfejen a zárásperiódus végén kialakuló nyomás, bar,

P_{vez} – a folyóvezeték nyomása a kútfejen, bar.

Ahhoz, hogy a folyadékdugó biztonsággal a felszínre érkezzon, a (13) egyenlet szerinti folyadékterhelési tényező (FTT) értéke kisebb kell legyen, mint 0,5. A termelés beállítása során az üzemeltető az FTT

$$P_{th\max} = \frac{2 \left(\frac{V_{gnt0} P_n z_n \bar{T}_{ydf}}{(d_{ics}^2 \pi / 4) (L_{pk} + dh_{vez} - h_{fd\max}) T_n \bar{z}_{ydf}} \right)}{1 + \exp \left\{ \frac{0,0018 (L_{pk} + dh_{vez} - h_{fd\max}) M}{\bar{T}_{ydf} \bar{z}_{ydf}} \right\}}. \quad (15)$$

Az egyenletet kissé átrendezve kapjuk:

$$h_{fd\max} = (L_{pk} + dh_{vez}) - \frac{8 \left(\frac{V_{gnt0} P_n z_n \bar{T}_{ydf}}{P_{th\max} T_n \bar{z}_{ydf}} \right)}{d_{ics}^2 \pi \left[1 + \exp \left\{ \frac{0,0018 (L_{pk} + dh_{vez} - h_{fd\max}) M}{\bar{T}_{ydf} \bar{z}_{ydf}} \right\} \right]}. \quad (16)$$

A (16) egyenletből a $h_{fd\max}$ -ot nem lehet explicit kifejezni, ezért az egyenlet megoldása csak iteratív úton lehetséges.

A zárási periódus kezdetéhez tartozó termelőcsőfejnyomás P_{thzar}

A (16) egyenlettel meghatározott folyadékoszlop hossza a maximálisan kiemelhető hosszt határozza meg. Az összegyűlő folyadék azonban a csöközben és a termelőcsőben található. A fűvóka felett összegyűlő folyadék maradéktalan kiemelése érdekében, a termelőcsőben lévő folyadék és a kiemelés során a csöközéből a termelőcsőbe kerülő folyadék együttes hossza nem lehet nagyobb, mint a maximálisan kiemelhető $h_{fd\max}$ folyadékdugó hossza. Ennek a kritériumnak megfelelő, a termelőcsőben a zárás kezdetéig felhalmozódó folyadékdugó hossza az alábbi egyenlettel határozható meg:

$$h_{fdz} = h_{fd\max} \frac{d_{ics}^2}{d_{ics}^2 - d_{otcs}^2 + d_{ics}^2 - d_{okcs}^2}. \quad (17)$$

A h_{fdz} -hez tartozó P_{thzar} termelőcsőnyomást a (10) egyenlet segítségével lehet meghatározni a h_{fdz} folyadékdugóhossz behelyettesítésével.

A dugattyú talpra jutásához szükséges idő t_{dte}

A dugattyú termelőcső alsó részén lévő ütközőre jutását alapvetően a dugattyú esési sebessége és az ütköző távolsága határozza meg. Mivel a termelőcső tetején

értékének változtatásával optimalizálhatja a folyadékkiemelést.

A kiemelhető folyadékdugó hossz $h_{fd\max}$

A (13) egyenletet az alábbi formába rendezhetjük át:

$$P_{th\max} = (1/2)[P_{ch\max} - P_{vez}]. \quad (14)$$

Mivel $P_{th\max}$ a termelőcsőfejen a maximálisan kiemelhető folyadékdugó hosszához tartozó nyomás, ezt felírhatjuk a (8) és (10) egyenletek kombinálásával:

gáz, alatta pedig folyadék található, ez csak kétféle esési sebességgel jellemezhető. v_{dgg} a dugattyú esési sebessége a gázban, és v_{dgl} a dugattyú esési sebessége a folyadékban. A dugattyú ütközőre jutásának időszükséglete a gázoszlopban és a folyadékoszlopban történő esés összege, melyet egy korrekciós tényezővel még meg szoktak szorozni:

$$t_{dte} = KT \left(\frac{L_{üt} + dh_{vez} - h_{fd\max} + h_{fd\max}}{v_{dgg}} + \frac{h_{fd\max}}{v_{dgl}} \right), \quad (18)$$

ahol

t_{dte} – a dugattyú ütközőre jutásához szükséges idő, s,
 v_{dgg} – a esési sebessége a gázban, m/s,
 v_{dgl} – a dugattyú esési sebessége a folyadékban, m/s,
 KT – korrekciós tényező, szokásos értéke 1,05–1,1, –.

A szakirodalomban a dugattyú esési sebességével számos szerző foglalkozott, Foss és Gaul [3] például mezőbéli kísérleti eredmények alapján gázban 2000 ft/perc (~610 m/perc), míg folyadékban pedig 172 ft/perc (52 m/perc) értéket javasoltak.

A dugattyú esési sebességét nagyon sok paraméter befolyásolhatja, ezért nehéz minden lehetőséget figyelembe vevő egyenlet meghatározása.

Rowlan et al. [4] akusztikus méréseket javasolnak az esési sebességek meghatározására. Később egy méréssel kalibrálható általános dugattyúesési modellt dolgoztak ki melyben a közeg (amelyben a dugattyú esik) sűrűségét találták a legfontosabb jellemzőnek és kimutatták, hogy a közeg sűrűségének változása az

esés folyamán is módosítja az esési sebességet [5]. A modelljük a következő:

$$v_{dg} = \frac{C}{\sqrt{\rho}}, \quad (19)$$

ahol

v_{dg} – a dugattyú esési sebessége a fluidumban, m/s.
 C – akusztikus mérésrel meghatározható, az adott kútra jellemző állandó, $[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)]^{1/2}$,
 ρ – a közeg sűrűsége, amelyben a dugattyú esik, kg/m^3 .

Acosta et al. [6] mérésekkel kimutatták, hogy a (19) egyenlettel leírt modell megfelelő pontosságot szolgáltat mind a gázban, mind a folyadékban való esési sebesség meghatározásához.

A folyadékugó kiemeléséhez szükséges idő

A folyadékugó kiemeléséhez szükséges idő meghatározásához a dugattyú emelkedési sebességét kell ismerni, ami a bélésűfejen a zárási periódusban kialakuló nyomásnak és a folyadékugó alján lévő nyomásnak arányától függ. Minél nagyobb ez az arány, annál nagyobb lesz a dugattyú emelkedési sebessége.

Az optimális emelkedési sebesség a dugattyú függő, bár a legtöbb dugattyú esetében az optimális emelkedési sebesség 230 m/perc körül van. Ha a dugattyú túl nagy sebességgel emelkedik, akkor a kút energiája kárba vész, és a nagy érkezési sebesség a berendezés károsodását is eredményezheti. Ha a dugattyú emelkedési sebessége túl lassú, akkor a gáz hajlamos a dugattyú mellett előre siklani és a dugattyú elakadhat, estenként el sem éri a felszínt. Az iparban használt általános hüvelykujj szabály, hogy a dugattyú emelkedési sebességének 150 m/perc és 300 m/perc közötti tartományban kell lennie. A dugattyú emelkedési sebességének ismeretében az emelkedéshez szükséges idő egyszerűen számítható:

$$t_{dgki} = L_{\text{ütk}} / v_{dg}, \quad (20)$$

ahol

v_{dg} – a dugattyú emelkedési sebessége, m/s.

Az optimális dugattyúemelkedési sebességhez szükséges zárási bélésűfejnyomás

Foss és Gaul módszerét [3] felhasználva fel lehet írni az optimálisnak gondolt emelkedési sebességet is tartalmazó, a bélésűfejen a folyadékugó felszínre érkezésekor uralkodó nyomást leíró egyenletet:

$$P_{ch\min} = \Delta P_{fgics} + \Delta P_{dg} + \Delta P_{sfd} + \Delta P_{ffics} + P_{vez}, \quad (21)$$

ahol

$P_{ch\min}$ – a bélésűfej nyomása a dugattyú felszínre érkezésekor, psig,

ΔP_{fgics} – a termelőcsőben áramló gáz súrlódási nyomásvesztesége, Pa,

ΔP_{dg} – a dugattyú súlyának emeléséhez szükséges nyomás, Pa,

ΔP_{sfd} – a folyadékugó statikus nyomása, Pa,

ΔP_{ffics} – a folyadékugó súrlódási nyomásvesztesége a termelőcsőben, Pa,

P_{vez} – a folyóvezeték nyomása, Pa.

$$\Delta P_{fgics} = \bar{\lambda}_g \frac{v e_{dg}^2 \bar{\rho}_g (L_{pk} + dh_{vez})}{2d_{itcs}}, \quad (22)$$

ahol

$\bar{\lambda}_g$ – a gáz átlagos súrlódási tényezője, –,

$\bar{\rho}_g$ – a termelőcsőben áramló gáz átlagos sűrűsége, kg/m^3 .

$$\Delta P_{dg} = \frac{4w}{d_{itcs}^2 \pi}, \quad (23)$$

ahol

w – a dugattyú súlya, N.

$$\Delta P_{sfd} = \rho_{fd} g h_{fd}, \quad (24)$$

ahol

ρ_{fd} – a folyadékugó sűrűsége, kg/m^3 ,

g – a nehézségi gyorsulás, N/m^2 ,

h_{fd} – a kiemelő folyadékugó hossza, m.

$$\Delta P_{ffics} = \bar{\lambda}_f \frac{v e_{dg}^2 \bar{\rho}_f h_{fd}}{2d_{itcs}}. \quad (25)$$

A (20) bélésűfejnyomás alapján felírható az adott folyadékugóhosszhoz és emelkedés sebességhez szükséges zárási bélésűfejnyomás:

$$P_{ch\max} = P_{ch\min} \frac{d_{ibcs}^2 - d_{otcs}^2 + d_{itcs}^2}{d_{ibcs}^2 - d_{otcs}^2}. \quad (26)$$

Összefoglaló

A cikkben bemutatam a hagyományos talpi folyadékfelhalmozódás megszüntetésére kidolgozott módosított plungerliftes berendezés szerkezeti elemeit, működési módját és a tervezéshez és üzemeltetéshez szükséges egyenleteket.

A bemutatott egyenletek segítségével a teljes folyadékkiemelési ciklus megtervezhető és ütemezhető. A teljes folyadékkiemelési ciklus a termelőcsőfejre és bélésűfejre telepített nyomásvezérelt szelepekkel vezérelhető.

- A gáztermelési időszakban a termelőcső felszíni nyomása jelzi a csöközben és a termelőcsőben összegyűlő folyadék mennyiségét (8) egyenlet.

- A (16) egyenlet segítségével meg tudjuk határozni a maximálisan kiemelhető folyadék-dugóhosszt (h_{dmax}), ezt a (8) egyenletbe behelyettesítve meghatározhatjuk az ehhez tartozó gáztermelés közbeni zárt termelőcső-fejnyomást. Ez a nyomás jelzi, hogy mikor kell lezárni a kutat a folyadékkiemelés elvégzése céljából. Ekkor a dugattyút a felszínről a talpra kell ejteni. Az ehhez szükséges idők meghatározására szolgál a (18) egyenlet.
- A kút lezárása után a zárt felszíni bélésűcsőnyomás értéke jelzi, hogy mikor kell a termelőcsövet megnyitni a folyadékkiemelés elindításához. Ennek értékét a (26) egyenlettel lehet meghatározni.

Köszönetnyilvánítás

A tématerületi kutatás a Miskolci Egyetemen, az Innovációs és Technológia Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kibocsátott támogatói okirat (Támogatói Okirat ikt. száma: TKP-17-1/PALY-2020) alapján végrehajtott projekt részeként valósult meg.

IRODALOM

- [1] Mower L. N., et al. (1985): Defining the Characteristics and Performance of Gas-Lift Plungers. In: SPE. SPE-14344-MS, s.n. p. 12.
- [2] Lea J. F., Rowlan O. L., McCoy J. N. (2007): Measurement and Calculation of Key Events During the Plunger Lift Cycle. In: SPE. SPE-110829-MS.
- [3] Foss D. L., Gaul R. B. (1965): Plunger-lift Performance Criteria with Operating Experience-Ventura Avenue Field. Drilling and Production Practice, s.n., p. 16.
- [4] Rowlan O. L., McCoy J. N., Podio A. L. (2003): Determining How Different Plunger Manufacture Features Affect Plunger Fall Velocity. In: SPE. SP-80891-MS.
- [5] Rowlan O. L., et al. (2013): Measured Plunger Fall Velocity Used to Calibrate New Fall Velocity Model. In: SPE. SPE-164495.
- [6] Acosta R., Pereyra E., Sarica C. (2018): Plunger Fall Velocity Studies in Vertical Wells. In: SPE. SPE-190949-MS.
- [7] Rowlan O. L., Lea J. F., McCoy J. N. (2009): Modified Foss and Gaul Model Accurately Predicts Plunger Rise Velocity. In: SPE. SPE-120636.
- [8] Garg D., et al. (2005): New Considerations for Modeling Plunger Performance. In: SPE. SPE-93997.

Borbála-nap a MVM Mátra Energia Zrt.-nél

Az MVM Mátra Energia Zrt. 2022.12.02-án a bükkábrányi bányüzemben tartotta meg a Borbála-napi megemlékezését.

Mata Tibor bükkábrányi bányagazgató ünnepi beszédében felelevenítette Szent Borbála legendáját és visszatekintett a 2022-es évre bonyolult időszakára. „Az elmúlt két évben a világvárvány átírta az életünket, majd azt követően a gazdaság fellendülésekor már energiahány jelei mutatkoztak Európában. Az elmúlt félév eseményei pedig odavezettek, hogy a világpiacon rendkívül megdrágultak az energiahordozók és hiány is kialakult, melyek energia vészhelyzethez vezettek. Az energiaszuverenitás kérdése fókuszba került, a saját előállítású és termelésű energia hányad növelésén dolgozik minden európai ország.” Elmondta, hogy a Mátrai Erőmű nagyon fontos alaperőműve az országnak, tevékenységükre ebben a nehéz energetikai helyzetben fokozott felelősség hárul. Köszönetet mondott minden munkatársának az egész éves kitartó munkájáért és gratulált azoknak a kollégáknak akik kiemelkedő munkájukért elismerésben részesültek.

Az ünnepi beszéd után a társaság vezetése, a szakszervezetek, a leányvállalatok, a térség polgármesterei koszorúkat helyeztek el a bányász hősök emléktáblájánál.

Az ünnepség 17 órai kezdettel folytatódott a bükkábrányi római katolikus templomban ahol Pálfi János plébános celebrálta a szentmisét. Az ünnepi szentmise a zászló behozatalával kezdődött, majd Dr. Dovrtel Gusztáv az OMBKE Mátraaljai szervezet titkára mondott ünnepi köszöntőt. A szentmise a nemzeti Himnuszunk és a Bányászhimnusz közös eléneklésével zárult.

A mise után az ünneplők átvonultak a bükkábrányi Jószerencse Háza különtermébe, ahol hagyományos Borbála-napi szakestélyt tartottak Halmai György praesesi vezetésével. A felszólalók vidám hozzászólásai gondoskodtak a jó hangulatról. A szakestély az Erdész-, Kohász, Bányászhimnusz eléneklésével fejeződött be.

Cégünk egész napi ünnepségeiből kitűnik, hogy a selmeci hagyományokat ápolók ezen a napon nem fáradnak, hogy tiszteljenek védőszentjüknek, Szent Borbála hősi életének.

Papp Tímea

Szerzői életrajzok

DR. MOLNÁR JÓZSEF okl. bányamérnök (1983), a műszaki tudomány kandidátusa (1993), PhD. Szakterülete az építőanyagok, a bányagazdaságtan és a bányaművelés. Egyetemi docens, jelenleg a Bányászati és Geotechnikai Intézet igazgatója a Miskolci Egyetemen.

DR. DEBRECZENI ÁKOS okl. bányamérnök (1989), a műszaki tudomány kandidátusa (1994), PhD. Szakterületei: kőzetmechanika, geomechanika, bányákárok. Jelenleg a Bányászati és Geotechnikai Tanszék intézeti tanszékvezető egyetemi docense a Miskolci Egyetemen.

DR. HAVASI ISTVÁN a Nehézipari Műszaki Egyetemen 1985-ben szerzett bányamérnöki oklevelet. 1986-tól az egyetem Geodéziai és Bányamérési Tanszékén különböző egyetemi beosztásokban dolgozik, 2000-től tanszékvezető egyetemi docens. 2021-től a Geofizikai és Térinformatikai Intézet igazgatója is. 2010 és 2022 között az OMBKE egyik alelnöke, az Egyetemi Osztály elnöke volt, 2022-től pedig az Egyetemi Szakosztály elnöke. Ugyanezen időszakban az OMBKE Bányamérő Szakcsoportjának a vezetője is volt, jelenleg annak egyik alelnöke. A BKL-ben számos megjelent bányamérési tanulmány szerzője/társ szerzője.

DR. MÁDAI FERENC, a Moszkvai Geológiai Egyetemen szerzett bányamérnök-geológus oklevelet 1989-ben. 1992 óta a Miskolci Egyetem oktatója, ahol 1995-ben dr. univ, majd 2004-ben PhD-fokozatot szerzett. 1998-ban az University of Dundee (Skócia) ásványvagyoni jogi specializációval Master of Law (LLM) végzettséget is szerzett. Jelenleg a Miskolci Egyetem Ásványtan-Földtani Intézetének egyetemi docense.

DR. NAGY SÁNDOR, előkészítéstechnikai mérnöki oklevelet szerzett a Miskolci Egyetemen 2003-ban, majd ugyanitt PhD-fokozatot 2013-ban. Jelenleg a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárás-technikai Intézetének intézetigazgató egyetemi docense.

DR. KRISTÁLY FERENC tudományos főmunkatárs, 2005-ben a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetemen szerzett geológusmérnök ásványtan szakképzéssel oklevelet, majd 2013-ban a Miskolci Egyetem Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskolában PhD-fokozatot. Fő kutatási területe az anyagösszetétel vizsgálat, ásványi nyersanyagok és termékek, másodnyersanyagok és régészeti leletek tekintetében. Tudományos közleményeinek száma több, mint 300, amelyekből több mint 150 vezető nemzetközi folyóiratban jelent meg. Rendszeresen részt vesz hazai és nemzetközi alap- és ipari kutatási projektek megvalósításában.

DR. ZÁKÁNYINÉ DR. MÉSZÁROS RENÁTA tudományos főmunkatárs, Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet

DR. BARACZA MÁTYÁS KRISZTIÁN tudományos főmunkatárs, Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet

VARGA GYULA tudományos segédmunkatárs, Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet

EKE ZOLTÁN környezetmérnökként diplomázott a Miskolci Egyetemen 2000-ben, ahol ezt követően 2007-ig tanársegéd volt a Geodéziai és Bányamérési Tanszéken, majd tíz évet a szeizmikus szénhidrogén kutatásban dolgozott geodéziai vezetőként. 2017 óta áll a Bay Zoltán Kft. alkalmazásában, ahol térinformatikával foglalkozik.

DR. NYIRI GÁBOR okl. hidrogeológus mérnök, PhD, tudományos segédmunkatárs, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Környezetgazdálkodási Intézet

KOLENCSEKNÉ DR. TÓTH ANDREA okl. környezetmérnök, PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Környezetgazdálkodási Intézet

FEKETE ZSOMBOR okl. hidrogeológus mérnök, tudományos segédmunkatárs, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Környezetgazdálkodási Intézet

DR. MADARÁSZ TAMÁS okl. geológusmérnök, PhD, intézetigazgató egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Környezetgazdálkodási Intézet

DR. ZÁKÁNYI BALÁZS okl. környezetmérnök, PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Környezetgazdálkodási Intézet

DR. SZŰCS PÉTER okl. bányamérnök, PhD, DSc, az MTA levelező tagja, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Környezetgazdálkodási Intézet

DR. LAKATOS ISTVÁN 1966-ban a Veszprémi Vegyipari Egyetemen szerzett vegyészmérnöki oklevelet. 1968-tól az MTA Olajbányászati Kutatólaboratórium, majd az annak jogutódjaként működő ME Alkalmazott Kémiai Kutatólaboratóriumának munkatársa. 1976-tól 2008-ig a Fizikai Kémiai Osztály vezetője, 1994 és 2008 között az intézet igazgatója. A Miskolci Egyetemen 1996-ban egyetemi tanári kinevezést kapott. Az MTA 2004-ben levelező, 2010-ben rendes taggá választotta.

DR. VADÁSZI MARIANNA a Miskolci Egyetem Bányamérnöki Karán 1999-ben földtudományi, 2001-ben olaj- és gázmérnöki oklevelet szerzett. 2003-ban földtudományi PhD fokozatát védte meg. 1999-től 2005-ig a Bányászati és Geotechnikai Tanszék oktatója, 2019-ig a ME Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet tudományos főmunkatársa. Jelenleg az ME Kőolaj és Földgáz Intézet Gázmérnöki Intézeti Tanszék vezetője, ahol számos hidrogéntekológiákhoz köthető projektben tölt be vezető szerepet.

DR. SZUNYOG ISTVÁN 2002-ben szerzett okl. olaj- és gázmérnöki diplomát a Miskolci Egyetemen. Ezt követően PhD hallgató, tanársegéd, adjunktus, majd 2021-től egyetemi docens. 2013-tól a Gázmérnöki Intézeti Tanszék vezetője, majd 2022-től a Kőolaj és Földgáz Intézet igazgatója. A Műszaki Földtudományi kar dékán-helyettese. Számos szakmai egyesült és munkabizottság tagja, elnökségi tagja. Oktatási és kutatási területei: telekhatáron belüli gázellátás, gázkészülékek, tüzeléstechnika, gázminőségi követelmények, megújuló gázok és földgázhálózati betáplálásuk.

GALYAS ANNA BELLA 2015-ban végzett a Miskolci Egyetemen okl. olaj- és gázmérnökként, majd 2018-ban abszolutóriumot szerzett a Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskolában. 2019 decemberétől a ME Kőolaj és Földgáz Intézetben dolgozik tanársegédként. Doktori kutatási témája a hidrogéntartalmú földgáz gázhálózati betáplálásának vizsgálatához kötődik.

DR. TURZÓ ZOLTÁN egyetemi docens, 1989-ben szerzett bányamérnöki oklevelet kőolaj- és földgázipari szak, olajbányászati ágazaton. Az egyetem elvégzése óta a Kőolaj és Földgáz Intézet oktatója. 2006-ban védte meg PhD-értekezését, 2013 óta az intézet igazgatója.

Működő és költséghatékony technológia támogathatja a fenntartható geotermikusenergia-termelést

2022. november 30-án lezárul a GINOP-2.2.1-15-2017-00102 – „Fenntartható és költséghatékony termálvíz-visszasajtolás kútkiképzési technológiájának kifejlesztése” című kutatási-fejlesztési projekt. A program a Mecsekérc Zrt. vezetésével, a Pécsi Tudományegyetem a ROTAQUA Kft. és a Kőmérő Kft. részvételével zajlott 2017 szeptembere óta összesen 63 hónapon keresztül.

A projekt elsődleges célja a jelenlegi hazai gyakorlatban alkalmazottnál sokkal fejlettebb, költséghatékony technológiák kifejlesztése, kidolgozása volt, amellyel azáltal válik lehetővé a fenntartható geotermikusenergia-termelés, hogy a kinyert termálvizet ugyanazon porózus vízadó rétegbe sajtoljuk vissza.

A geotermikusenergia-hasznosítók által megfizethető, korszerű és hatékony kútkiképzési technológiák alkalmazása iránt mind hazánkban, mind az egész EU-ban egyre nagyobb igény mutatkozik. Tekintettel a megújuló energiák, így a geotermikusenergia-hasznosítás szerepének növelésére vonatkozó uniós és kormányzati szándékokra, várhatóan jelentős számú termelő és kapcsolódó visszasajtoló kút fűrésára kell számítani a jövőben. Ezek visszasajtolási módszertani kidolgozásához biztosít jelentős információt, tapasztalást és szaktudást a projekt.

A projekt során egy, már meglévő kút rétegserkentéses technológiával való átalakítása, valamint egy gravel pack kút kialakítása történt meg. A fejlesztés eredményeként így olyan visszasajtoló kútkiképzési technológia jött létre, amely nemcsak a hazai szinten, hanem nemzetközi szinten is hasznosítható.

A kútkiképzés mellett a kutatási-fejlesztési területen is jelentős részeredményeket értünk el: elő tudunk állítani (a nagy piaci igényeket is kiszolgálva) természetes kötőanyagú mesterséges mintatesteket, amelyek adott közetfizikai jelleggel rendelkeznek. Ezeknek a mintatesteknek köszönhetően lehetőség nyílik a virtuális közetfizikai laboratóriumok validálására, a permeabilitásmérés standardizálására, rezervoárkísérletekhez megfelelő maganyag biztosítására, olcsóbb, prototípus jellegű laborvizsgálatok végrehajtására. E mintatestek révén továbbá standard körülmények között lehetséges laboratóriumi méréseket, nagy pontossággal végrehajtani.

A technológia elterjedését és használatát segíti a kútkiképzési folyadéktechnológiai módszertanának kidolgozása. Ezt követve lehetőség nyílik rétegtkárosodás-mentes kútkiképzésekhez, így a kísérleti fejlesztés komplex szolgáltatásfejlesztést is biztosít. A kísérleti fejlesztéssel, a rendszerbizonytalanságot okozó tényezők kiszűrésével a kockázatok csökkenthetőek. A jelenlegi fejlesztés előzményprojektje (GINOP-2.1.1-15-2015-00616 – Energetikai célú földtani kutatási projektek rendszerbizonytalanságának csökkentése a Mecsek-hegység déli előtere földtani modelljének validálása példáján) során elkészült be rendezéseket (pl. anyagmigráció a kavicságyon és kőzeten keresztül, kiszűrődés, iszaplepleny-képződés és -eltávolítás, kitémasztó anyag tönkremenetele, inhibitorok, gélesítők, enzimek gyakorlati kipróbálása stb.) a most záródó projekt során rezervoár körülmények között is próba alá vetettük, így megtörtént az eszközöknek az adott réteg és pórusnyomáson, valamint hőmérsékleten való vizsgálata, a kútkiképzésekhez szükséges paraméterek közvetlen mérése és validálása.

A projekt legnagyobb eredménye, hogy összeállt a felszíni visszasajtoló egység. Az elvégzett tesztek alapján az eszköz hosszú távú visszasajtolásra alkalmazható. Ezáltal fontos lépést tettünk a fenntartható geotermikusenergia-termelés megvalósítása és piaci alapon is rentábilis működtetése felé.

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

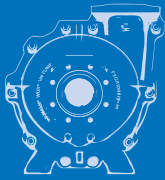
Európai Unió
Európai Regionális
Fejlesztési Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE



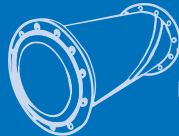
Hat vezető iparági termék.



Warman®
zagyszivattyúk



Cavex®
hidrociklonok



Linatex®
tömlők



Enduron®
rosták



Linatex®
gumi



Isogate®
szelepek



Egy Megbízható Forrás.

A Weir nagy szakértelemmel megtervezett homokmosó berendezései kis helyigényűek és a Weir saját világszínvonalú gépegyeiből épülnek fel melyek igen magas kopásállóságú anyagokból készülnek ezért hosszú élettartam mellett maximális kinyert hasznos homok mennyiséget garantálnak.

Mindez kiegészül a Weir elkötelezett terméktámogatás csapatával, projekt mérnökeivel, szervízálózatával, egyszerű kopóalkatrész hozzáféréssel nem csak Magyarországon, de a világ 170 pontján...

A döntés az Ön kezében van.

Tudjon meg többet weboldalunkon: sandwashplant.weir

Copyright © 2020, Weir Minerals Australia Limited. All rights reserved. 202003/AU1114

WEIR
Minerals