
HIDROLÓGIAI KÖZLÖNY



A MAGYAR HIDROLÓGIAI TÁRSASÁG LAPJA • 99. ÉVF. 4. SZÁM • 2019
HUNGARIAN JOURNAL OF HYDROLOGY • VOL 99. NO 4. • 2019





Hidrológiai Közlöny

A Magyar Hidrológiai Társaság lapja
Megjelenik háromhavonként

Főszerkesztő

Fehér János

Szakszerkesztők

Ács Éva
Konecsny Károly
Nagy László

Olvasószerkesztő

Szlávik Lajos

Szerkesztőbizottság elnöke

Szőllősi-Nagy András

Szerkesztőbizottság tagjai

Ács Éva, Bakonyi Péter, Baranyai Gábor, Bíró Péter, Bíró Tibor, Bogárdi János, Bozán Csaba, Csörnyei Géza, Engi Zsuzsanna, Fehér János, Fejér László, Gampel Tamás, Gayer József, Hajnal Géza, Honti Márk, Ijjas István, Józsa János, Kerekesné Steindl Zsuzsanna, Kling Zoltán, Konecsny Károly, Koris Kálmán, Kovács Sándor, Kuti László, Licskó István, Major Veronika, Melicz Zoltán, Nagy László, Rákosi Judit, Rátky István, Román Pál, Szilágyi Ferenc, Szlávik Lajos, Szűcs Péter, Tamás János, Ungvári Gábor

Kiadó

Magyar Hidrológiai Társaság
1091 Budapest, Üllői út 25. IV. em.
Tel: +36-(1)-201-7655
Fax: +36-(1)-202-7244
Email: titkarsag@hidrologia.hu
Honlap: www.hidrologia.hu
A Kiadó képviselője: Szlávik Lajos, a Magyar Hidrológiai Társaság elnöke

Hirdetés

Gampel Tamás, a Magyar Hidrológiai Társaság főtítkára
1091 Budapest, Üllői út 25. IV. em.
Telefon: (1)-201-7655 Fax: (1)-202-7244 Email: fotitkar@hidrologia.hu

Indexelik

Appl. Mech.; Rew. Chem.; Abstr. Fluidex; Geotechn. Abstr.; Meteor / Geostrophys. Abstr. Sei.; Water Res. Abstr.

Index: 25374
HU ISSN 0018-1323

Tartalomjegyzék

Fehér János: Előszó 3

SZAKCIKKEK

Burián Alajos és Domány András: A vízerőművek hatása a Dráva vízjárására 5

Nagy László: A buzgárképződés feltételei 13

Rátky István: Mesterséges neurális háló alkalmazása expedíciós lebegtetett hordalék mérési adatokra 24

Nyiri Gábor, Székely Ferenc, Zákányi Balázs, Szűcs Péter: Horizontális és csápos kutak hidraulikai modellezése különböző számítási eljárások segítségével 35

Farkas Dávid, Farkas-Karay Gyöngyi, Hegedűs Noémi: Szivárgási tényező laboratóriumi meghatározása szemeloszlási görbe és kisminta-modell felhasználásával 42

Szilágyi Mariann, Zsugyel Márton, Krámer Tamás: Légi felvételezés alkalmazhatósága sekély tavi növényzetfoltok hidrodinamikai hatásainak meghatározására 52

Nagy Attila, Tamás János, Szabó Andrea, Gálya Bernadett, Fehér János: Mezőgazdasági aszály monitoring és aszály előrejelzés távérzékelte adatok alapján a Tisza vízgyűjtőn 61

Nagy Gábor, Nagy László: Kötött talajok diszperzitása – a jelenség háttere, a mértékadó hézagképző alkalmazhatósága 69

FÓRUM

Bodáné dr. Kendrovics Rita: Települési szennyvízgyógyászati szakmérnök képzés az Óbudai Egyetemen 77

NEKROLÓG

Dr. Lorberer Árpád Jenő – Liebe Pál, Révi Géza és Major Veronika megemlékezése 79

KÖNYVISMERTETÉS

Ijjas István: Integrált vízgazdálkodás. A hidrinformatika születése — Európai és globális integráció című könyvét ismerteti Reich Gyula 80

KONFERENCIA AJÁNLÁS

Magyarországot fenyegető vízválság – árvízvédelem 81



Hungarian Journal of Hydrology

Journal of the Hungarian Hydrological Society
Published quarterly

Editor-in-Chief

János FEHÉR

Assistant Editors

Éva ÁCS

Károly KONECSNY

László NAGY

Copy Editor

Lajos SZLÁVIK

Editorial Board Chairman

András SZÖLLŐSI-NAGY

Editorial Board Members

Éva ÁCS, Péter BAKONYI, Gábor BARANYAI, Péter BÍRÓ, Tibor BÍRÓ, János BOGÁRDI, Csaba BOZÁN, Géza CSÖRNYEI, Zsuzsanna ENGI, János FEHÉR, László FEJÉR, Tamás GAMPEL, József GAYER, Géza HAJNAL, Márk HONTI, István IJJAS, János JÓZSA, Zsuzsanna KERESKÉSNÉ STEINDL, Zoltán KLING, Károly KONECSNY, Kálmán KORIS, Sándor KOVÁCS, László KUTI, István LICSKÓ, Veronika MAJOR, Zoltán MELICZ, László NAGY, Judit RÁKOSI, István RÁTKY, Pál ROMÁN, Ferenc SZILÁGYI, Lajos SZLÁVIK, Péter SZÜCS, János TAMÁS, Gábor UNGVÁRI

Publisher

Hungarian Hydrological Society

H-1091 Budapest, Üllői út 25., Hungary

Phone: +36-(1)-201-7655; Fax: +36-(1)-202-7244;

Email: titkarsag@hidrologia.hu

Web: www.hidrologia.hu

Represented by: Lajos SZLÁVIK, President of the Hungarian Hydrological Society

Email: titkarsag@hidrologia.hu

Advertising

Tamás GAMPEL, Secretary General of the Hungarian Hydrological Society

H-1091 Budapest, Üllői út 25., Hungary

Phone: +36-(1)-201-7655. Fax: +36-(1)-202-7244

Email: fotitkar@hidrologia.hu

Indexed in

Appl. Mech.; Rew. Chem.; Abstr. Fluidex.; Geotechn. Abstr.; Meteor / Geostrophys. Abstr. Sei.; Water Res. Abstr.

Index: 25374

HU ISSN 0018-1323

Contents

János FEHÉR: Foreword 3

SCIENTIFIC PAPERS

Alajos BURIÁN and András DOMÁNY: Impact of hydroelectric power stations on the flow regime of the Dráva River 5

László NAGY: Criteria of the sand piping formation 13

István RÁTKY: Application of an artificial neural network to expeditionary suspended sediment measurement data 24

Gábor NYIRI, Ferenc SZÉKELY, Balázs ZÁKÁNYI, Péter SZÜCS: Hydraulic modelling of horizontal and radial collector wells using different calculation methods 35

Dávid FARKAS, Gyöngyi FARKAS-KARAY, Noémi HEGEDŰS: Laboratory determination of hydraulic conductivity using the grain-size distribution curve and a small-scale physical model 42

Mariann SZILÁGYI, Márton ZSUGYEL, Tamás KRÁMER: Application of airborne surveys to determine hydrodynamic impact of vegetation patches in shallow lakes 52

Attila NAGY, János TAMÁS, Andrea SZABÓ, Bernadett GÁLYA, János FEHÉR: Monitoring and prediction of agricultural drought in the Tisza River Basin based on remote sensing data 61

Gábor NAGY, László NAGY: The dispersive soils behaviour – the background of the phenomenon, application of the Galli-type void ratio 69

FORUM

Rita BODÁNE DR. KENDROVICS: Post-graduate engineering education in urban wastewater management at Óbuda University 77

OBITUARY

Dr. Árpád Jenő LORBERER – Commemoration by Pál Liebe, Géza Révi and Veronika Major 79

BOOK REVIEW

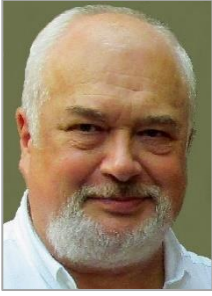
István IJJAS: Integrated water management. The birth of hydroinformatics - European and global integration – a review by Gyula Reich 80

CONFERENCE RECOMMENDATION

Water crisis in Hungary - flood protection 81

Cover page photo: The River Dráva at Órtilos. Courtesy of Alajos BURIÁN (South-Transdanubian Water Management Directorate)

Előszó



A *Hidrológiai Közlöny* centenáriumi évfordulóját megelőző 99. évfolyam 4. száma a vízgazdálkodás több szakmai területét érintő cikkek közül.

Első helyen egy érzékeny és sok vitát kiváltó témát jár körül *Burián A. és Domány A.* cikke. Megvizsgálták a Dráva öt vízmércéjének adatsorát, amelynek során a vízerőművek

üzembe lépése előtti időszak adatsorát összevetették a megépítésük után mért adatokkal. Megállapították, hogy a megépült vízerőművek hatást gyakoroltak, illetve gyakorolnak napjainkban is a Dráva vízjárására, annak intenzitás változására, azaz az egységnyi idő alatt bekövetkezett vízállás változásra, amely leginkább kisvízes időszakban mutatkozik meg.

A sikeres árvízvédekezés egyik legnagyobb szakmai ismeretet igénylő feladatához, a buzgárok elleni védekezéshez foglalja össze az ismereteket *Nagy L.: A buzgárképződés feltételei* című cikke. A buzgárképződést kiváltó tényezőket, illetve a néhány éve megjelent könyve óta feltárt új megközelítéseket konzekvens keretben taglalja az oktatási anyagának is beillő cikk.

A hidrológiai mérések közül a hordalékhozam meghatározása a jelentős hibával terhelt mérések egyike. *Rátky I.* cikkének célja az volt, hogy múltbeli expedíciós lebegtetett hordalékszállítási méréseket felhasználva, a hordalékiszállítást előrejelezni képes módszer kidolgozását mutasson be, megvizsgálva, hogy a neurális hálózati számítástechnikai módszer alkalmazható-e a hordalékszállítás előrejelzésére, ritka mérési adatokra alapozva. A tanulmány egyik végkövetkeztetése, hogy jelenleg a lebegtetett hordalékszállítást csak nagy hibával lehet meghatározni, mind a mérés, mind az előrejelzés tekintetében.

Az ivóvízellátás országos szinten 35%-ban parti szűrésű vízbázisokra épül jelenleg. A parti szűrésű vízbázisok jellemző víztermelő műtárgyai a csápos kutak. *Nyíri G. és társai* cikkükben a horizontális és a csápos kutak hidraulikai modellezését mutatják be különböző számítási eljárások segítségével. Tanulmányukban egy fél-analitikus, valamint egy véges differencia módszert alkalmaztak a termelés hatására kialakult vízszintek meghatározására, permanens állapotban. A számított vízszinteket összevetették független számítási eredményekkel. Az összehasonlítások során jó egyezést találtak a számított vízszintek között. Ez az egyezés lehetővé teheti, hogy a jövőben valós földtani körülmények között szimulálják a csápos kutak hidraulikai viszonyait, valamint lehetőség nyílik különböző scénáriók vizsgálatára is.

A talajmechanikai, a szivárgáshidraulikai és a mélyépítési feladatok megoldásában egyik sarkalatos kihívás a szivárgási tényező pontos meghatározása, ám a feladat sokszor igen időigényes és költséges vagy egyszerű

ugyan, de pontatlan és/vagy pontszerű. *Farkas D. és társai* bemutatnak hat egyszerű és közismert egyenletet, melyek alkalmasak a szivárgási tényezőnek a szemeloszlási görbe eredményeiből való meghatározására, valamint bemutatják kutatásuk során felhasznált laboratóriumi kisminta-modelljüket, amely próbaszivattyúzások ellenőrzött laboratóriumi keretek közötti vizsgálatára szolgált. Összehasonlították a közelítő egyenletekkel és a laboratóriumban végrehajtott próbaszivattyúzások kiértékelésével kapott szivárgási tényezőket. Az eredmények alapján megállapították, hogy a szemeloszlási görbét felhasználó összefüggésekkel – egy módszer kivételével – akár egy nagyságrenddel nagyobb szivárgási tényezőt kaptak, mint a kismintával történő vizsgálatokkal. A csak szemeloszlási görbét felhasználó módszerekkel kapott áteresztőképességi értékek között is megfigyelhető a közel egy nagyságrendbeli különbség. Ez rámutat a szivárgási tényezőt a jellemző szemátmérből számító összefüggések bizonytalanságaira.

Szilágyi M. és társai cikkükben beszámoltak arról, hogy a hagyományos *in situ* áramlásmérő berendezések adatainak területi kiterjesztésére egy tavakban még kevésbé alkalmazott légi felmérési és részecskekövető módszert teszteltek, nevezetesen a Fertő tó egy kácafoltokkal tarkított területére. Céljuk volt meghatározni a mérés érzékeny paramétereit, az időbeli felbontás változtatásának hatását, illetve drón által a vízfelszín felett rögzített képek pontosságát. Számításaik megmutatták, hogy a mérés pontosságát nagyban befolyásolja a részecskék pozíciójának EOVS rendszerbe transzformálása.

Nagy A. és társai a mezőgazdasági aszály monitorozásának és a mezőgazdasági aszály előrejelzés lehetőségét vizsgálták távérzékelési adatokra alapozva, különös tekintettel az aszályos időszak során termelt kultúrnövények (pl. kukorica) termésveszteségének előrejelzésére. A kutatásuk elsődleges célja egy olyan módszertan kidolgozása volt, amely információt szolgáltat a releváns aszálymutatók és az aszályos időszakban végbemenő hozamveszteségek hatékonyabb becslésére távérzékelés és spektrális adatok alapján. A cikk egy új számítási módszertant mutat be, amely az aszály különböző kockázati szintjeinek fizikai meghatározásával korai információt biztosít a termésveszteség becslésére.

A szakmai cikkek sorát *Nagy G. és Nagy L.* közös cikke zárja, amelyben a szerzőpáros a diszperzív talajok árvízvédelmi töltésekben való jelenlétével és a belőle származható problémákkal foglalkozik. A cikk bemutatja a talajok diszperzításának lehetséges magyarázatát, a talajszemcsék felépítését és a diszperzív tulajdonság fizikai-kémiai okait, valamint a diszperzív talajokkal kapcsolatos hazai és nemzetközi kutatási tapasztalatokat, továbbá a korábbi vizsgálatok eredményeiből levont tapasztalatokat, és a mértékadó hézagképző korrelációját a túsűrűsviszsgálat eredményeivel.

Rövid FÓRUM cikk mutatja be *Bodáné dr. Kendrovics Rita* egyetemi docens, intézeti igazgató, oktatási dékánhelyetttel készült interjú alapján az Óbudai Egyetemen folyó települési szennyvízgazdálkodási szakmérnök képzést. A képzési program elsődleges célja a vízügyi ágazat szakember utánpótlásának biztosítása. Olyan szakemberek képzése, illetve továbbképzése, akik a korábban megszerzett felsőfokú mérnöki végzettségük, valamint az Óbudai Egyetemen megszerzett szakképzettségük és szakismereteik birtokában képesek a szennyvízgazdálkodás szakterületén építési, üzemeltetési, szakértői, beruházási, közigazgatási és vállalkozói munkakörökben a legújabb szakmai- tudományos és fejlesztési eredmények követésére és alkalmazására a szennyvíz- és vízgazdálkodás területén.

A közelmúltban elhunyt jelentős vízügyi személyiségről emlékezünk meg a NEKROLÓG rovatban. Életének 79. évében elhunyt *dr. Lorberer Árpád Jenő* a VITUKI volt vezető tudományos kutatója. *Liebe Pál, Révi Géza* és *dr. Major Veronika* nekrológiájukban kiemelik: „*dr. Lorberer Árpád Jenő* sokoldalú és értékes életpályáját, azt a hihetetlen mennyiségű információt, ami a fejében volt. Ez az információ mennyiség sokkal több is volt, mint ami a munkáival, térképeivel zsúfolásig telt szobájában volt található, ahol mégis mindig gyorsan megtalálta az aktuális problémához megfelelőt. Fejből idézte a legrészletesebb szakmai és nem szakmai tudnivalókat, nyújtott segítséget munkatársaknak, konzulensként egyetemi hallgatóknak. Nemcsak szakemberként, hanem emberként is derekasán helyt állt. Kiállt barátaiért, munkatársaiért, a saját igazáért, kevésbé törődve a következményekkel. Nem kereste a maga javát. Szerényen élt, családtagjait segítve, élete nehézségeit panasz nélkül viselve.”

A 99. évfolyam 4. számának utolsó része egy olyan könyvet ismert, amely az OVF Vízügyi Tudományos Tanácsának a „Jövőépítés a vízgazdálkodásban” című sorozatában készült, és amely sorozatban a hazai vízgazdálkodás kiemelkedő tudósai foglalják össze életművüket, bemutatják mivel és hogyan járultak hozzá a vízgazdálkodás jövőjének az építéséhez, tanulságot a jövőt építő új generációk számára. 2019 november végén jelent meg az *Integrált vízgazdálkodás. A hidroinformatika születése — Európai és globális integráció* című könyv, amelyben a magyar vízgazdálkodás kiemelkedő szakembere, kutatója és mérnök generációk egyetemi oktatója *Prof. Dr. Ijjas István*

foglalja össze szakmai életpályáját, mutatja be eredményeit. A könyvről *Reich Gyula* írt áttekintő recenziót.

Végül, de nem utolsó sorban, a 2019. évi Budapesti Víz Világtalálkozó utórendezvényeként, az OVF Vízügyi Tudományos Tanácsa, a Magyar Hidrológiai Társaság, a Magyar Mérnöki Kamara és a Global Water Partnership Magyarország Alapítvány közös rendezésében, mintegy 300 fő részvételével 2019. október 29-én megtartott „Homokzsákoktól a drónokig” című konferencia ajánlásait adjuk közre a rendező szervezetek kérése alapján. Úgy gondoljuk, hogy a konferencia plenáris ülésén elhangzott öt és a négy szekcióban bemutatott 24 előadás ugyan az árvíz más-más szegmensét és vetületét dolgozta fel, de a szervező szervezetek részéről összefoglalt és elfogadott ajánlás az árvízi problémakörrel foglalkozó vízügyi szakemberek számára fontos iránymutatást ad a jövőbeli teendőket illetően.

Áttekintve a Hidrológiai Közlöny 99. évfolyamának négy számában megjelent írásokat, a következő rövid statisztikát állíthatjuk fel. Összességében megjelentettünk 32 szakcikket, a FÓRUM rovatban közöltünk 4, egyéni véleményeket is tartalmazó cikket. 6 elhunyt kiemelkedő szakemberről emlékeztünk meg a NEKROLÓG rovatban. Öt szakmai könyvet ismertettünk és egy TÖRTÉNELMI PILLANTKÉP cikket közöltünk 2019-ben. Végül, de egyáltalán nem utolsó sorban személyes motívumokat is tartalmazó írással köszöntöttük 95. születésnapja alkalmából az építőmérnökök generációját oktató Kozák Miklós professzort.

A 32 szakcikk nem jelenhetett volna meg 2019-ben a Hidrológiai Közlöny szerkesztőbizottsága által meghatározott szakmai színvonalon a szerkesztőség munkáját önkéntesen segítő szakmai bírálók munkája nélkül. Köszönetet fejezem ki valamennyi szakembernek, akik értékes bírálati munkájukkal segítették a Hidrológiai Közlöny szerkesztési munkáját.

A 2019. év végéhez közeledve a *Hidrológiai Közlöny* valamennyi olvasójának kívánok – szerkesztőbizottságunk tagjai nevében is – kellemes ünnepeket és sikerekben gazdag, boldog, békés új esztendőt!

Dr. Fehér János
címzetes egyetemi tanár
a *Hidrológiai Közlöny* főszerkesztője

A vízerőművek hatása a Dráva vízjárására

Burián Alajos* és Domány András*

* Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, Árvízvédelmi és Folyógazdálkodási Osztály, 7623 Pécs, Köztársaság tér 7. (E-mail: burian.alajos@ddvizig.hu; domany.andras@ddvizig.hu)

Kivonat

A mintegy 710 km hosszú, öt országot érintő Dráva mai vízjárása a legalsó, horvát Dubravai vízerőmű (254,0 fkm) alatti szakaszán az erőmű megépítése előtti vízjárástól eltérő napi vízszint ingadozást mutat. Az Őrtilos vízmércén (235,9 fkm) napi 80-120 cm-es vízállás változás, míg még lejjebb, a barcsin (154,1 fkm) 40-50 cm és a drávaszabolcsin (77,7 fkm) 10-20 cm változás is érzékelhető. Antropogén hatásoknak köszönhető ezen változások a természetes vízjárástól eltérő hatást gyakorolnak mind a mederre, mind a folyó környezeti és természeti állapotára.

A korábbi és jelenlegi vízállás észlelések adatait elemezve meghatároztuk az egyes vízmérce szelvényekre (Őrtilos, Barcs és Drávaszabolcs) az erőmű megépítése előtti vízjárás változások értékeit annak tudatában, hogy egy statisztikai elemzésen alapuló ilyen számítás igazából a trendekre hívja fel a figyelmet, és alkalmazása ennek figyelembevételével történhet. Ennek ellenére, a mai műszaki lehetőségek figyelembevételével, a szerzők bizakodnak abban, hogy az emberi hatások következményeként kialakult és a természetestől eltérő drávai vízjárás valamikor, ha nem is elérni, de megközelíteni tudja majd a természetes vízjárást.

Kulcsszavak

Dráva, vízszint ingadozás, mederállapot, vízerőmű, vízjárás változás intenzitás, folyó szabályozás, vízrajzi állomás, referencia időszak, kisvíz, középvíz, nagyvíz.

Impact of hydroelectric power stations on the flow regime of the Dráva River

Abstract

The current flow regime of the approximately 710 km long Drava, which situated in five countries shows daily water level fluctuation that is different from the flow regime before the construction of the Dubrava Hydroelectric Power Plant in Croatia on the lower section of the river. (254.000 rkm). The 80-120 cm daily water level fluctuation, which is observed at the water gauge of Őrtilos (235.9 rkm) is even detectable at the lower sections of the river at water gauge of Barcs (154.1 rkm, 40-50 cm) and at water gauge of Drávaszabolcs (77.7 rkm, 10-20 cm). Changes in the river's natural flow regime due to these anthropogenic interferences and effects have different impacts on the river bed, the environmental and natural state of the river.

Analysing data from past and current water level observations, we determined the values of the water flow changes for each gauge section (Őrtilos, Barcs and Drávaszabolcs), knowing that such a calculation based on statistical analysis actually draws attention to trends and applies it accordingly. However, based on current technical possibilities and opportunities, the authors are confident that the flow regime of human-induced Drava will be able to approach its natural flow regime sometime in the future even if the original natural flow regime cannot be achieved completely.

Keywords

Drava, water level fluctuation, river bed condition, hydro-power station, water regime intensity change, river regulation, hydrographic station, reference period, low-water, middle-water, high-water.

BEVEZETÉS

A Dráva, mint Európa egyik folyója, az elmúlt 100-200 évben számos antropogén hatás következményeként mai állapotában az eredeti természetes vízjárását már meg sem közelíti. A folyószabályozás, a mederanyag eltávolítás, a vízi erőművek megléte kisebb-nagyobb mértékben bizony „igazítottak”, „igazítanak” a folyó vízjárásán, a meder állapotán. A vízrajzi adatok rögzítése és elemzése markánsan mutatják a folyamatot, melynek mind vízgazdálkodási, mind környezet- és természetvédelmi vonatkozásai kedvezőtlenek. De tehetünk-e ennek érdekében, változtathatunk-e ezen kedvezőtlen folyamatokon? Ennek első lépése, hogy egyáltalán megpróbáljuk meghatározni az emberi hatások nélküli állapotot, vízjárást vagy legalábbis azt a vízjárást, amely ha teljesen nem is, de legalább megközelíti az antropogén hatások nélküli állapotot a folyó 236,000 fkm alatti magyarországi szakaszán.

A DRÁVÁRÓL RÖVIDEN

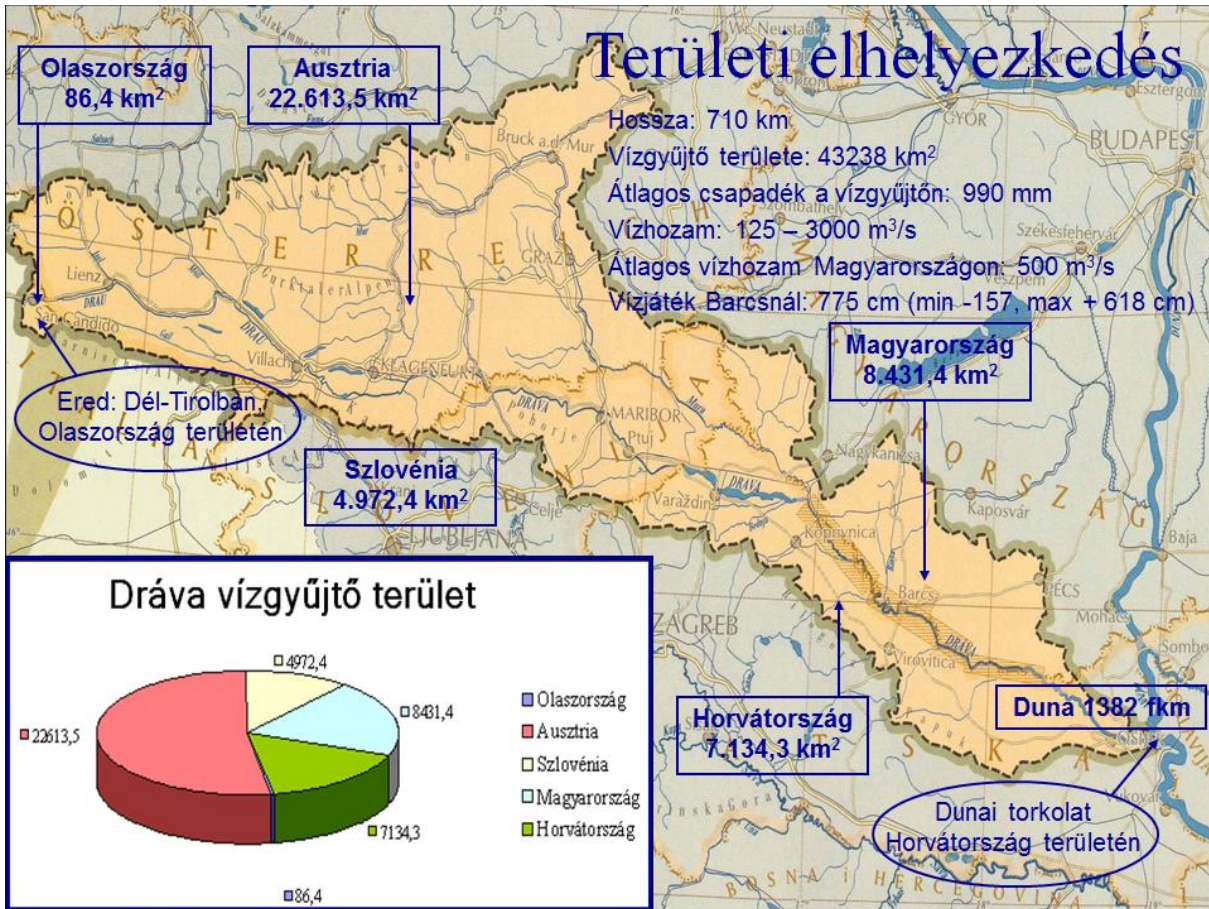
A Dráva a Duna negyedik legnagyobb hozamú és negyedik leghosszabb mellékfolyója. A Déli Alpokban ered Olaszország területén, majd Ausztrián, Szlovénián, Hor-

vátországon, Magyarországon és ismét Horvátországon keresztül éri el dunai torkolatát Eszék alatt, Aljmás település közelében. Az egyes országok hossz szerinti megoszlása: Olaszország 10,6 km, Ausztria 254,8 km, Ausztria-Szlovénia határfolyó 4,2 km, Szlovénia 117,7 km, Szlovénia-Horvátország határfolyó 23,3 km, Horvátország 166,4 km, Horvátország-Magyarország 133 km (*forrás: see-river.net*). A Dráva főbb mellékfolyói a Mura, a Gurk, az Isel és a Möll. Teljes vízgyűjtő területének nagysága 43 238 km², melyből Magyarország 8 431,4 km²-el részesül. Teljes hossza 710 km, vízgyűjtő területén mért éves átlagos csapadék mennyisége 990 mm (*1. ábra*).

A Dráva vízgyűjtő területe megközelítőleg Ny – K-i irányban elnyúlt, északi vízválasztó vonala a Magas-Tauern, az Alacsony-Tauern, a Hochschwaben és a Schneepén húzódik. Ezt követően az Alpok előterében a Zalai-dombság K-i pereméig halad, majd a Rinyák vízgyűjtő területe után csatlakozik a Zselic dombsághoz, a Mecsek vonulatához, és a Dél-baranyai-dombságot követően ér véget a torkolatnál. A déli vízválasztó a Ma-

gas-Tauernből indulva a Karni-Alpokon és a Karavankákon át a Dráva és a Száva közötti paleozóos hegységeken fut, majd síksági vonalon halad a Dráva torkolatáig. A nagy kiterjedésű vízgyűjtő területen csak-

nem valamennyi földtörténeti kor képződménye fellelhető a felszínen. A legidősebb képződmények a legnagyobb kiterjedésben az Alpok központi területén találhatók. (Lovász 1972).



1. ábra. A Dráva vízgyűjtő területe
 Figure 1. Catchment area of Drava

A Dráva magyarországi szakaszának felső szelvénye Órtilosnál, a Mura torkolatánál, a 236,000 fkm-ben kezdődik. A folyó itt lép be Magyarországra és két szakasztól eltekintve (227,600 – 198,600 fkm és 70,200 – 0,000 fkm között) a magyar-horvát országhatár mentén „meanderezik”, míg végül a horvátországi Aljmás településnél éri el a dunai torkolatát.

NEMZETKÖZI ÉRINTETTSÉG

A Dráva dunai torkolatától a 236,000 fkm-ig magyar-horvát közös érdekelttségbe tartozik. Ennek megfelelően a magyar és a horvát Fél – figyelemmel a *Magyar Köztársaság Kormánya és a Horvát Köztársaság Kormánya között a vízgazdálkodási együttműködés kérdéseiben* 1994. július 10-én megkötött vízgazdálkodási EGYEZMÉNY-ben foglaltakra – ezen egyezmény szerint végzi vízgazdálkodási tevékenységét. Az egyezmény célja a vízgazdálkodási viszonyok egységének fenntartása érdekében – elismerve az ebből következő jogokat és kötelezettségeket – a Felek az Egyezmény rendelkezései alapján megvizsgálják és egyeztetett módon megoldják minden vízgazdálkodási kérdéseket – beleértve a vizek mennyiségét, minőségét, környezeti állapotát befolyásoló munkákat vagy tevékenységeket – amelyek mindkét Fél érdekeit érintik vagy az egyik Fél érdekében tesznek szükségessé a másik Féllel egyeztetett intézkedéseket.

A DRÁVA SZABÁLYOZOTTSÁGA

A Dráva a 70,200 fkm és a 155,200 fkm (Barcs térsége) között viszonylag szabályozottnak mondható. E szelvény fölött egészen a közös érdekű szakasz határáig, azaz a 236,000 fkm-ig (Órtilos) részben szabályozott. A szabályozás érinti a kis- és középvízi medret (itt szabályozási kőművek, kanyarátvágások és mederkotrások készültek), valamint a nagyvízi medret (árvízvédelmi töltések, hullám- és árterület rendezés). A szabályozási tevékenység mintegy 200 éves múltra tekint vissza, ezen időszak alatt hol nagyobb, hol kisebb ütemben történtek szabályozási munkák. Ma jelenleg kis- és középvízi szabályozás csak nagyon elvétve történik, a nagyvízi szabályozás mondható jelentősebbnek.

A Dráva teljes területe az ún. Mura-Dráva-Duna bioszféra rezervátum része, e mellett magyarországi területe nemzeti parki védetség alatt áll, a Duna-Dráva Nemzeti Park része és egyben NATURA 2000-es terület is.

VÍZERŐMŰVEK A DRÁVÁN

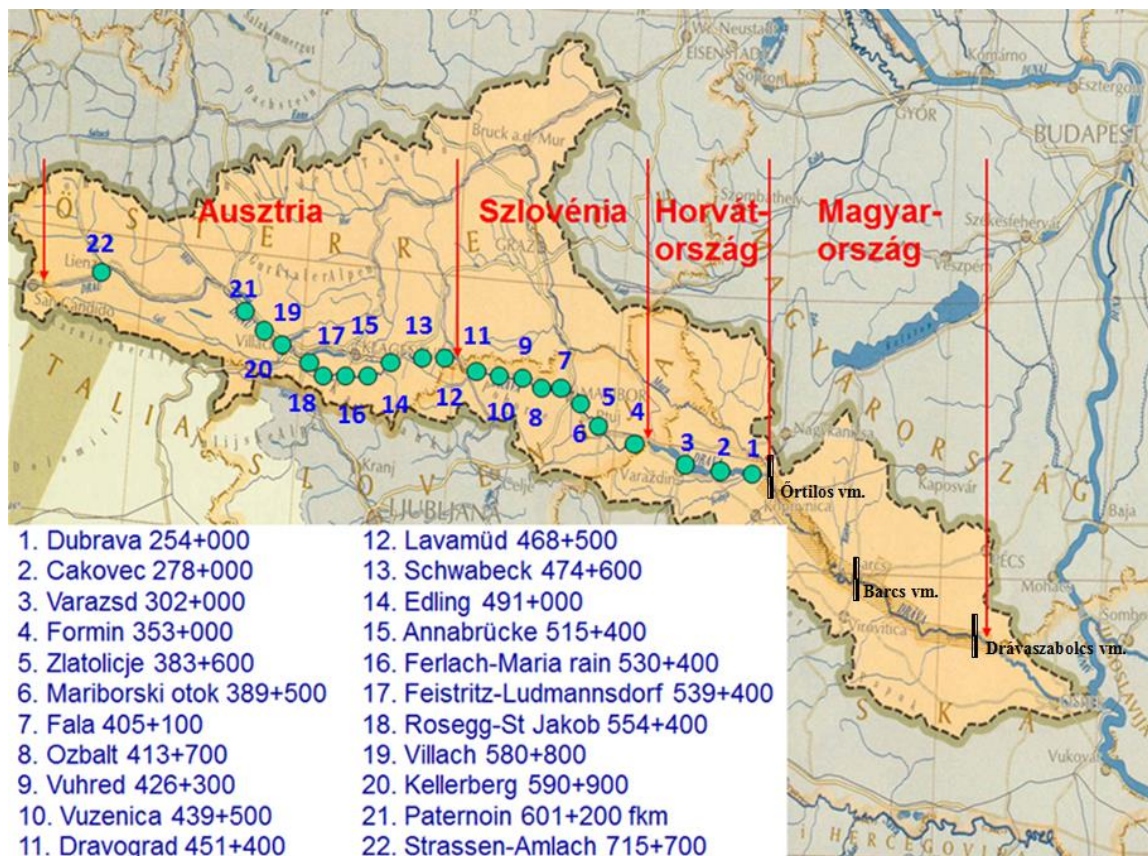
A Dráván az elmúlt mintegy 100 évben összesen 22 vízerőmű épült, melyek összes teljesítménye 1 412,8 MW, éves energia termelése 6 926,65 GWh (1. táblázat). Az erőművek közül 11 Ausztria, 8 Szlovénia és 3 Horvátország területén üzemel. Ezek közül a legidősebb a 405,100

fkm-ben lévő Fala erőmű, melyet 1918-ban, a legfiatalabb – és egyben a magyarországi Dráva szakaszra a legna-

gyobb hatást gyakorló – a 254,000 fkm-ben lévő Dubrava erőmű, melyet 1989-ben helyeztek üzembe (2. ábra).

1. táblázat. A Dráva vízerőművek adatai
Table 1. Data of hydro-power stations on Dráva

Erőmű neve	Szelvénye	Ország	Üzembe helyezés	Konstr. esés	Tározó	Kilépési vízhozam	Teljesítmény	Éves energia
	[fkm]		[év]	[m]	[m ³]	[m ³ /s]	[MW]	[GWh]
Strassen-Amlach	715+700	A	1988	370,0	230 000	20	60	233
Paternoin	601+200	A	1988	8,7	3 600 000	320	23	98
Kellerberg	590+900	A	1985	8,7	3 500 000	320	24	101
Villach	580+800	A	1988	9,2	n.a.	320	24	104
Rosseg-St Jakob	554+400	A	1974	22,7	19 300 000	395	80	355
Feistritz-Ludmannsdorf	539+400	A	1968	23,1	50 000 000	415	80	360
Ferlach-maria Rain	530+400	A	1975	20,4	33 400 000	410	75	330
Annabrücke	515+400	A	1981	24,3	26 000 000	418	90	405
Edling	491+000	A	1962	21,0	80 000 000	410	75	405
Schwabeck	474+600	A	1943	19,8	25 000 000	360	60	360
Lavamünd	468+500	A	1944	8,5	820 000	385	28	163
Dravograd	451+400	SLO	1943	8,2	1 280 000	309-384	21	128,85
Vuzencia	439+500	SLO	1954	13,0	8 090 000	411-450	53,4	230,8
Vuhred	426+300	SLO	1956	16,5	17 540 000	411-450	59,4	307,8
Ozbalt	413+700	SLO	1960	15,9	12 890 000	411-450	59,4	307,25
Fala	405+100	SLO	1918	13,5	2 900 000	500	58	273
Mariborski otok	389+500	SLO	1948	14,4	15 260 000	411-466	50,4	263,95
Zlatolicje	383+600	SLO	1969	32,6	4 600 000	450	133,2	660
Formin	353+000	SLO	1979	n.a.	n.a.	450	112	580
Varazsd	302+000	HR	1975	n.a.	n.a.	450	86	476
Cakocec	278+000	HR	1982	n.a.	51 500 000	450	80,4	400
Dubrava	254+000	HR	1989	17,5	93 500 000	500	80,6	385
Összesen:					449 410 000		1 412,8	6 926,65



2. ábra. A Dráva vízerőművek áttekintő helyszínrajza
Figure 2. An overview of the Dráva hydroelectric power plant sites

A horvát vízerőművek a múlt század 70-es és 80-as éveinek végére megépülnek a Dráván, amelyek a folyó „felső”, Barcs feletti szakaszán kimutathatóan megváltoztatják a folyó vízjárását. Őrtilosnál az erőművek, legfőképp a legalsó Dubravai vízerőmű (254,000 fkm) közelsége (18 km) miatt nem ritka a napi 80-120 cm-es vízálás ingadozás, míg ez az érték még Barcsnál (154,100 fkm) is viszonylag jelentős, mintegy 40-50 cm. Ez az alsó, Barcs alatti szakaszon már csak kisebb mértékben észlelhető, azonban vizsgálatunk szerint a változás a folyó intenzitás változásában a drávaszabolcsi állomásra vonatkozóan is kimutatható. Ez a mederre gyakorolt hatás mellett kihat a Dráva élővilágára is, megváltoztatva a folyó erőművek nélküli természetes vízjárását.

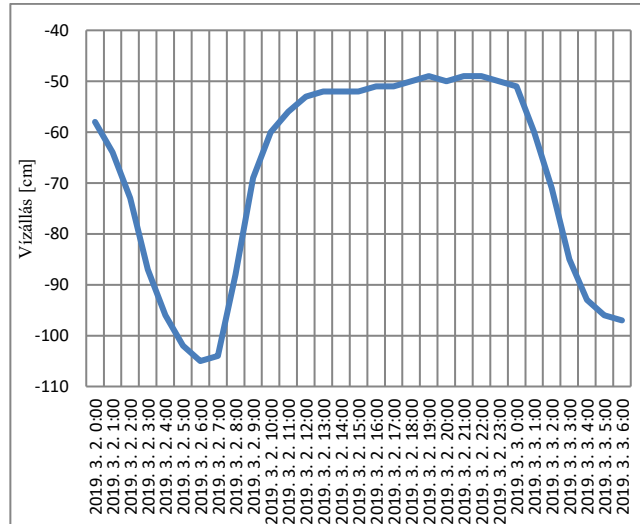
Egy folyó természetes vízjárása az emberi hatások nélküli életét jelenti a folyónak. Azonban a több mint 200 évre visszatekintő kis-, közép- és nagyvízi szabályozás, a több mint 100 éve épült első drávai vízerőmű (ld. a Fala erőművet az 1. táblázatban) és további vízerőművek már önmagukban is olyan hatásokat okoznak, amelyeknél már természetes vízjárásról nem beszélhetünk. Ennek ellenére meg kell találnunk azt a természeti környezet szempontjából még tolerálható vízjárást, amely elfogadható, és amelyre rámondhatjuk, hogy a mai időszakban, a mai környezeti feltételek mentén elfogadhatjuk természetes vízjárásnak. Ez a vízjárásra kedvezőtlen hatásoknak egy bizonyos küszöbszint alá történő „beszorítását” jelenti, és az ennek hatására előálló vízjárás értéket.

Meg kell említenünk, hogy a Dráva legnagyobb mellékfolyóján, azaz a Murán is nagyságrendileg hasonló számú vízerőmű létesült, melyek hatása szintén érvényesül az Őrtilosnál lévő torkolati szakasz alatt.

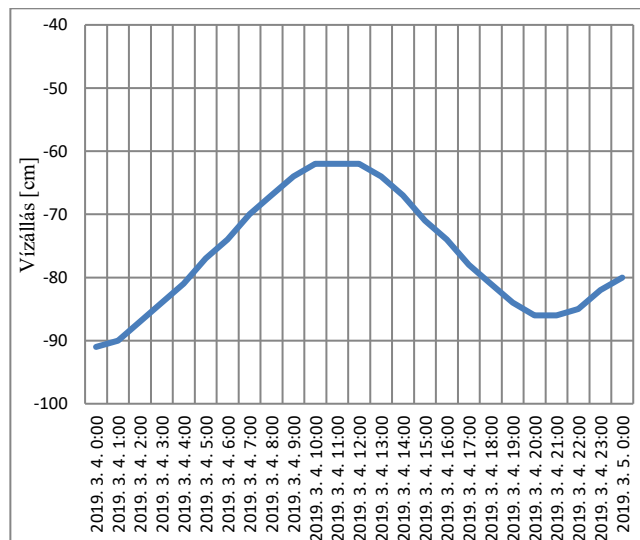
A DUBRAVAI VÍZERŐMŰ ÉPÍTÉSE ELŐTTI VÍZJÁRÁS MEGHATÁROZÁSA

A folyón észlelt, fent bemutatott napi ingadozású vízjárás változás (3., 4. és 5. ábrák) vélhetően nagy részben a vízerőművek üzemrendjére vezethető vissza. Az erőművek csúcsra járatása során generált vízszint ingadozás azonban nem csak a mederre, annak partjára és környező területeire gyakorol más, a természetes vízjárástól eltérő hatást, hanem a természeti környezetre is (Horváth 2002) Kézenfekvő volt, belegondolva a vízgazdálkodási érdekeken felül a környezet- és természeti érdekekbe, hogy a folyó felső szakaszain, nem magyar érdekeket szolgáló vízerőművek üzemrendje igazítható-e egy természetesebb állapothoz? Azonban ehhez ezt a bizonyos természetes állapotot, természetes vízjárást először meg kell vizsgálni, meg kell határozni.

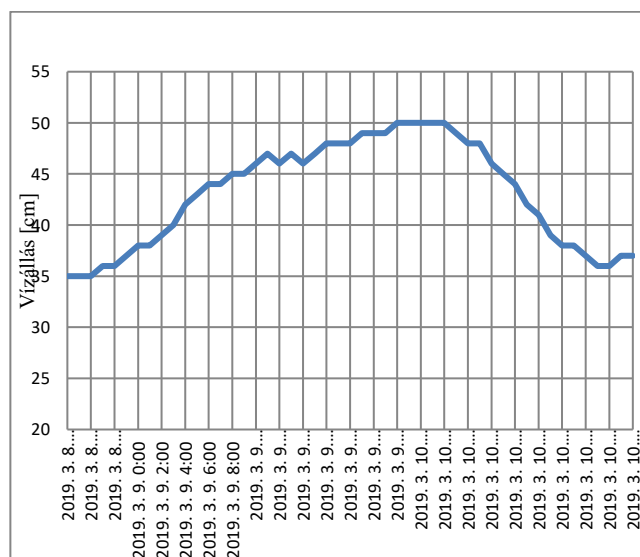
Az elmúlt években, évtizedekben, évszázadokban a vízerőművek mellett más antropogén hatások is érvényesültek, azonban a vizsgálatok során ezek hatásai az észlelések miatt gyakorlatilag beépültek a vizsgálat módszerébe. A szerzőknek alapvetően a célja egy olyan „nagyságrend” megállapítása, amely alapot képezhet egy esetleges jövőbeni további vizsgálatokhoz, és ennek kapcsán olyan beavatkozásokhoz, amelyek hatására a Dráva, ha nem is teljes mértékben, de megközelítheti a korábbi természetes vízjárását.



3. ábra. Napi vízálás ingadozás az Őrtilosi (235,900 fkm) szelvényben
Figure 3. Daily water level fluctuation in section Őrtilos (235,900 rkm)



4. ábra. Napi vízálás ingadozás a barcsi (154,100 fkm) szelvényben
Figure 4. Daily water level fluctuation in section Barcs (154,100 rkm)



5. ábra. Napi vízálás ingadozás a drávaszabolcsi (77,700 fkm) szelvényben
Figure 5. Daily water level fluctuation in Drávaszabolcs (77,700 rkm) section

Vizsgálatunkat a folyó 77,700 fkm-ben lévő drávaszabolcsi, a 154,100 fkm-ben lévő barcsi és a 235,900 fkm-ben található őrtilosra vonatkozóan végeztük el (2. ábra). Ezen állomások esetében vizsgáltuk a Dráva vízjárását kisvízi, középvízi és nagyvízi időszakokra bontva, hogy van-e érzékelhető változás a határfolyónk vízjárás változás intenzitásában az erőművek előtti időszakot összevetve a 2000-es évek utáni, azaz vízerőművi hatásokkal terhelt időszakokkal.

Két hosszabb periódust választottunk ki a folyó intenzitás változásának vizsgálatához. Először a 70-es évek közepétől 80-as évek közepéig gyűjtöttünk ki órás vagy ahol erre nem volt lehetőség adatok hiányában, 6-8 óránkénti vízállás adatokat, hogy segítségükkel vizsgálni tudjuk az erőművek hatása előtt a Dráva időbeli intenzitás változását. Külön vizsgáltuk egy-egy éven belül a kisvízi, középvízi és nagyvízi időszakokat mind az erőművekhez közel eső őrtilos, a távolabb eső barcsi, és a legtávolabbi drávaszabolcsi állomáson. Ezt követően hasonló elvek alapján vizsgáltuk a 2000-es évektől kezdődően 2016-ig az órás vízállás adatokat.

Az adatsorok kiválasztásának egyik alapfeltétele volt, hogy az intenzitás vizsgálatok szempontjából elegendő hosszúságú és egyenletesen növekedő vagy csökkenő vízállás időszakok legyenek. Ez a követelmény nagymértékben korlátozta a vizsgálható időszakokat. E mellett figyelemmel kellett arra lenni, hogy a napi egy észlelés ezen vizsgálatokhoz nem elegendő.

Referencia időszak (1977 – 1986)

Első körben kigyűjtöttük az alsó folyószakasz erőművei által még nem befolyásolt napi vízállás adatokat. 1977 – 1986. év közötti időszakot vizsgálva mind a három vízrajzi állomásra vonatkozóan a 7 év kisvízes, 7 év középvízes és 7 év nagyvízes időszakának vízállás adata-

iból kiszámítottuk a folyó órás intenzitását (intenzitás = az egységnyi idő alatt bekövetkezett vízállás változása cm/órában), mely intenzitás adatokból meghatároztuk az az évi átlagos intenzitást, annak szórását (statisztikai módszerrel átlag és szórás számítással) és maximális értékét. Az egyes évek átlagos intenzitás értékeinek átlagát kiszámolva meghatároztuk az éves átlagos intenzitást az 1977 – 1986. év közötti időszakokra vonatkozóan (Kontur és társai 1993). A számításokat az alábbi összefüggésekkel végeztük el:

Átlag (számtani közép):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

Szórás (közepes négyzetes eltérés):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

Megjegyezzük, hogy a Dráva legalsó, a 254 fkm-ben épült Dubravai erőmű hatása a legmarkánsabb, melyet 1989-ben helyeztek üzembe.

A kisvízes időszakok az alapján kerültek kiválasztásra, hogy a Dráva folyó vízállása a vizsgált év melyik időszakában mozgott a drávaszabolcsi vízmérce LKV – +90 cm-es intervallumában, míg a középvízes időszakok az alapján, hogy a Dráva folyó vízállása a vizsgált év melyik időszakában mozgott a drávaszabolcsi vízmérce a 90 cm – 270 cm-es intervallumában. A vizsgált nagyvízes időszakokban a folyó vízállása minden esetben meghaladta a drávaszabolcsi vízmérce 270 cm-es vízállását. A másik két állomásra vonatkozóan ugyanezen kis-, közép-, és nagyvízi időszakokban, időpontokban vizsgáltuk a folyó vízjárását, intenzitás változását. A számítás eredményeit a 2., 3. és 4. táblázatok tartalmazzák.

2. táblázat. Kisvízes időszakok átlagos intenzitása (cm/óra) az 1980-as években

Table 2. Average intensity of low-water period (cm/hours) in 1980s

Időszak	Őrtilos			Barcs			Drávaszabolcs		
	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max
1977.10.12 - 11.13	1,3	1,36	6,1	0,9	1,06	7,7	0,6	0,54	2,4
1978.01.01 - 01.31	3,5	2,69	11,9	1,1	1,14	5,8	0,5	0,46	2,4
1979.01.16 - 01.24	1,7	1,86	5,9	1,4	1,14	5,1	0,4	0,36	1,2
1980.02.28 - 03.19	2,4	2,19	7,2	1,1	1,06	5,7	0,7	0,59	2,6
1981.02.19 - 03.02	1,2	0,93	3,4	0,9	0,63	2,6	0,6	0,42	1,4
1982.01.26 - 03.20	2,4	2,20	9,4	1,2	0,97	5,0	0,5	0,53	3,0
1986.12.01 - 12.25	2,0	3,25	20,0	0,6	0,70	2,8	0,5	0,45	2,3
Átlag	2,07			1,03			0,54		

3. táblázat. Középvízes időszakok átlagos intenzitása (cm/óra) az 1980-as években

Table 3. Average intensity of middle-water period (cm/hours) in 1980s

Időszak	Őrtilos			Barcs			Drávaszabolcs		
	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max
1977.07.15 - 09.04	1,5	1,63	8,0	1,8	1,35	8,2	0,9	0,84	4,6
1978.04.24 - 05.20	1,3	2,09	14,0	1,6	1,03	4,4	0,7	0,56	2,4
1979.11.29 - 12.22	1,9	2,04	7,5	2,1	1,61	7,8	0,7	0,59	2,6
1980.06.09 - 07.05	0,8	1,55	12,0	1,4	1,30	5,7	0,8	0,71	3,8
1981.03.27 - 04.20	2,3	2,21	8,8	2,3	1,67	9,0	0,8	0,6	2,2
1982.06.20 - 08.27	5,5	4,66	29,0	2,2	1,85	9,2	1,2	1,06	6,7
1986.08.30 - 09.20	1,9	2,77	15,0	2,9	2,17	9,4	1,5	1,32	5,4
Átlag	2,17			2,04			0,94		

4. táblázat. Nagyvízes időszakok átlagos intenzitása (cm/óra) az 1980-as években

Table 4. Average intensity of high-water period (cm/hours) in 1980s

Időszak	Órtilos			Barcs			Drávaszabolcs		
	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max
1977.04.02 – 06.27	1,8	2,50	18,0	1,2	1,05	5,9	0,8	0,69	3,5
1978.05.24 – 07.29	0,8	1,69	20,0	1,4	1,22	7,0	1,2	1,08	4,9
1979.06.12 – 07.31	1,6	5,37	41,0	1,3	1,13	11,3	0,9	0,67	3,4
1981.07.20 – 08.02	1,6	1,64	7,6	1,8	1,36	6,1	1,5	1,61	6,5
1982.12.19 – 12.31	2,0	2,04	7,8	1,7	1,50	6,2	1,4	1,14	4,7
1985.05.07 – 06.25	2,0	3,57	30,0	0,9	0,98	4,6	0,8	0,82	4,6
1986.03.09 – 07.02	0,8	1,88	20,0	2,0	1,79	9,4	0,9	0,97	9,0
Átlag	1,51			1,47			1,07		

Az 1977 – 1986 évek közötti időszakot vizsgálva, amikor a legelső Dubrava erőmű még nem épült ki a határfolyónk külföldi szakaszán, a Dráva éves átlagos intenzitása a drávaszabolcsi állomásra vonatkozóan az alábbi értékeket adja: kisvízes időszakban 0,54 cm/óra, középvízes időszakban 0,94 cm/óra, nagyvízes időszakban 1,07 cm/óra. Ugyanezen értékek a barcsi állomásra vonatkozóan rendre 1,03 cm/óra, 2,04 cm/óra és 1,47 cm/óra, valamint az órtilosi állomásra vonatkozóan 2,07 cm/óra, 2,17 cm/óra és 1,51 cm/óra.

A drávaszabolcsi állomás esetén a kapott eredmények jól mutatják, hogy nagyobb vízhozam idején az óras intenzitás is növekszik, így egy nagyvízes időszakban gyakorlatilag duplájára nő az intenzitás értéke.

A barcsi állomás esetén a kapott értékeket vizsgálva a középvízes időszak adja a legnagyobb intenzitás változást, míg kisvíz és nagyvíz esetén ez az érték 1 – 1,5 cm/óra körüli.

Az órtilosi állomás esetén a folyó óránkénti intenzitás változása kis-, és középvíz esetén 2 cm/óra körüli, míg nagyvízek esetén ez mintegy 1,5 cm/óra.

Vízerőművek működésével befolyásolt időszak

A 70-es, 80-as évek vízállás adatainak vizsgálatát követően kigyűjtöttük a 2000-es évek napi vízállás adatait, melyeket az erőművek működésük révén már befolyásoltak.

A vizsgált 2000 – 2016 évek közötti időszakban 12 év kisvízes, 16 év középvízes és 12 év nagyvízes időszakának óras vízállás adataiból kiszámítottuk a folyó óras intenzitását (cm/óra), mely intenzitás adatokból meghatároztuk az az évi kis-, közép- és nagyvízes időszak átlagos intenzitását, annak szórását és maximális értékét. Az egyes évek átlagos intenzitás értékeinek átlagát kiszámolva meghatároztuk az éves átlagos intenzitást a 2000-es éveket követő időszakra vonatkozóan (*Kontur és társai 1993*). A számítás eredményeit az alábbi. 5., 6. és 7. táblázatok tartalmazzák.

5. táblázat. Kisvízes időszakok átlagos intenzitása (cm/óra) 2000 után

Table 5. Average intensity of low-water period (cm/hours) after 2000

Időszak	Órtilos			Barcs			Drávaszabolcs		
	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max
2000.01.05 - 03.28	6,9	6,89	140,0	2,2	1,91	8,6	0,8	0,80	7,0
2001.10.16 - 12.31	8,0	10,38	122,0	1,8	1,59	8,0	0,9	0,93	6,0
2002.01.01 - 04.18	8,1	9,30	112,0	2,5	1,70	9,7	1,0	0,85	4,1
2004.01.09 - 03.15	8,1	8,68	52,0	2,9	1,89	9,0	1,0	0,75	5,0
2005.01.01 - 03.14	8,4	8,72	52,0	3,0	1,88	9,0	0,9	0,69	3,0
2006.10.17 - 12.31	10,2	9,50	72,0	3,7	2,97	25,0	1,4	1,00	5,0
2008.01.01 - 03.20	8,3	8,55	94,0	2,7	1,98	10,0	2,0	1,90	8,0
2010.03.14 - 05.04	2,4	3,19	30,0	1,0	1,12	7,0	0,7	0,70	4,0
2011.11.15 - 12.31	6,7	6,86	56,0	1,8	1,50	13,0	0,8	0,75	6,0
2012.01.01 - 05.01	4,3	4,53	34,0	1,0	0,99	12,0	0,7	0,94	18,0
2013.09.05 - 10.13	6,4	10,34	90,0	2,9	2,54	12,0	1,2	1,04	6,0
2015.11.07 - 12.31	7,4	6,99	52,0	2,0	1,63	12,0	1,0	0,73	4,0
Átlag	7,10			2,29			1,03		

6. táblázat. Középvizes időszakok átlagos intenzitása (cm/óra) 2000 után
 Table 6. Average intensity of middle-water period (cm/hours) after 2000

Időszak	Őrtilos			Barcs			Drávaszabolcs		
	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max
2000.04.23 - 05.26	6,1	5,84	44,0	1,8	1,53	7,0	0,7	0,75	3,0
2001.05.06 - 06.23	4,0	4,83	54,0	1,4	1,34	8,0	0,7	0,69	4,0
2002.05.17 - 06.25	9,5	9,70	80,0	3,4	2,52	13,0	1,4	1,10	5,0
2003.05.09 - 06.23	1,8	2,41	22,0	1,9	1,84	10,0	1,1	0,87	5,0
2004.04.13 - 06.11	9,8	10,09	70,0	3,4	2,55	12,0	1,5	1,11	6,0
2005.03.14 - 06.05	4,0	4,09	46,0	1,6	1,37	10,0	1,0	0,82	5,0
2006.02.20 - 04.26	5,1	5,68	62,0	2,0	1,67	11,0	1,2	0,93	5,0
2007.08.31 - 10.12	12,1	11,63	88,0	4,1	2,73	12,0	1,7	1,24	6,0
2008.05.18 - 08.31	7,2	7,75	70,0	2,3	1,97	10,0	2,3	1,99	8,0
2010.10.21 - 11.23	6,6	7,21	82,0	2,1	2,14	14,0	1,2	1,03	7,0
2011.05.26 - 06.18	6,8	9,39	86,0	2,5	2,20	13,3	1,6	1,38	7,0
2012.05.22 - 07.09	7,1	7,02	56,0	2,1	1,64	10,0	1,3	1,12	8,0
2013.05.31 - 06.27	2,0	3,20	32,0	0,8	0,68	3,0	0,7	0,56	2,0
2014.06.06 - 08.12	6,6	7,71	50,0	2,3	2,00	11,0	1,3	1,02	5,0
2015.06.07 - 10.13	9,9	8,83	56,0	3,5	2,67	13,0	1,2	1,02	6,0
2016.05.08 - 07.10	5,7	6,52	46,0	1,9	1,60	8,0	1,1	0,81	4,0
Átlag	6,52			2,32			1,25		

7. táblázat. Nagyvizes időszakok átlagos intenzitása (cm/óra) 2000 után
 Table 7. Average intensity of high-water period (cm/hours) after 2000

Időszak	Őrtilos			Barcs			Drávaszabolcs		
	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max	Átlag	Szórás	Max
2000.11.15 - 12.08	4,0	3,14	18,0	1,5	1,22	7,0	0,8	0,78	3,0
2002.11.19 - 12.16	4,1	3,55	20,0	2,2	1,82	12,0	1,6	1,10	5,0
2004.06.14 - 07.19	3,3	2,79	20,0	1,2	1,06	6,0	1,0	0,81	6,0
2005.08.15 - 09.07	4,3	4,71	32,0	2,3	1,63	8,0	1,5	1,00	4,0
2006.04.29 - 06.10	5,0	5,07	40,0	1,6	1,26	7,0	1,1	0,80	3,0
2009.06.20 - 07.30	3,9	4,05	44,0	1,5	1,37	8,0	1,4	1,50	8,0
2010.09.17 - 10.07	4,8	4,93	50,0	2,3	1,86	9,0	1,9	1,37	6,0
2012.11.02 - 11.25	4,0	3,32	28,0	1,3	1,37	9,0	1,0	0,91	5,0
2013.03.29 - 05.23	2,7	3,50	30,0	1,2	1,03	6,0	1,0	0,87	5,0
2014.09.01 - 09.29	2,7	2,75	24,0	1,9	1,15	5,0	1,3	0,88	4,0
2015.10.12 - 10.28	4,2	4,65	34,0	2,3	1,88	11,0	1,8	1,43	8,0
2016.07.13 - 07.24	3,4	3,73	16,0	2,1	1,49	6,0	1,7	1,03	5,0
Átlag	3,87			1,78			1,34		

A 2000. év utáni időszakot vizsgálva, mikor az erőművek már teljes körűen működtek a folyó külföldi szakaszain, a Dráva éves átlagos intenzitása a drávaszabolcsi állomásra vonatkozóan az alábbi értékeket adja: kisvizes időszakban 1,03 cm/óra, középvizes időszakban 1,25 cm/óra, nagyvizes időszakban 1,34 cm/óra. Ugyanezen értékek a barcsi állomásra vonatkozóan rendre 2,29 cm/óra, 2,32 cm/óra és 1,78 cm/óra, valamint az őrtilos állomásra vonatkozóan 7,10 cm/óra, 6,52 cm/óra és 3,87 cm/óra.

A drávaszabolcsi állomás esetén, ahogy a referencia időszakban, így a 2000-es években is a kisvizek idején a legnagyobb mértékű a folyó intenzitás változása. Szembetűnő, hogy kisvizek esetén duplájára nőtt az intenzitás mértéke az erőművek üzembe helyezése előtt időszakhoz képest.

A barcsi állomás esetén az adatokból látható, hogy a külföldi vízi erőművek hatása leginkább kis-, és középvízi időszakban érvényesül. A tározók leürítésének eredményeképp átlagosan 2 - 2,5 cm/óra intenzitás tapasztalható ezekben az időszakokban, míg nagyvizek esetén kissé alacsonyabb intenzitás érték adódik.

Várakozásainknak megfelelően az őrtilos állomásnál adódtak a legmagasabb intenzitás értékek. A dubravai vízerőmű közelsége miatt Őrtilosban 7 cm-t meghaladó óras átlagos intenzitást kaptunk. A barcsi szelvényben is fokozottan érezhető az erőművek hatása. A kapott értékeknél feltűnő, hogy voltak olyan kisvizes időszakok, amikor előfordult 100 cm-t meghaladó maximális óras intenzitás is.

ÖSSZEZGÉS

Összevetve a két vizsgált - vízerőműveket megelőző, és azt követő - időszakot, a folyó intenzitás különbsége - külön vizsgálva kis-, közép- és nagyvizes időszakokat - az értékeket a 8. és 9. táblázat mutatja be a három vizsgált állomásra.

8. táblázat. Átlagos intenzitás különbségek
Table 8. Average intensity values

		Átlagos intenzitás (cm/óra)		
		Drávaszabolcs	Barcs	Órtilos
Kisvizes időszak	80-as évek	0,54	1,03	2,07
	2000 után	1,03	2,29	7,10
Középvizes időszak	80-as évek	0,94	2,04	2,17
	2000 után	1,25	2,32	6,52
Nagyvizes időszak	80-as évek	1,07	1,47	1,51
	2000 után	1,34	1,78	3,87

9. táblázat. Intenzitás különbség értékek
Table 9. Intensity difference values

	Intenzitás különbség (cm/óra)		
	Drávaszabolcs	Barcs	Órtilos
Kisvizes időszak	0,49	1,26	5,03
Középvizes időszak	0,31	0,28	4,35
Nagyvizes időszak	0,27	0,31	2,35

A fenti értékekből megállapítható, hogy a megépült vízerőművek hatást gyakoroltak, illetve gyakorolnak napjainkban is a Dráva vízjárására, annak intenzitás változására, azaz az egységnyi idő alatt bekövetkezett vízállás változásra, mely leginkább kisvizes időszakban mutatkozik meg. A külföldi vízerőművek üzembe helyezésével a folyó órás intenzitása – még az erőművektől legtávolabb eső drávaszabolcsi vízmércé esetében is – kisvizes időszakokban közel 0,5 cm-t emelkedett, de középvizes és nagyvizes időszakokban is kimutatható 0,25 – 0,3 cm-es intenzitás növekedés az erőművek megépítése előtti időszakhoz képest.

A szerzők véleménye szerint még ez az alacsony érték is változásnak tekinthető, ha belegondolunk – és ahogy számításaink kimutatták – hogy az 1970-es, 1980-as években az 1-2 cm-es órás intenzitás volt a jellemző a

teljes, vizsgált Dráva szakaszra vonatkozóan. Az órtilos 5 cm-t meghaladó intenzitás változás is véleményünk szerint olyan érték, amely további, már az ökológiai (Majer 1994) és természetvédelmi szakterületre is kiterjedő vizsgálatok szükségességét megalapozza. Ezen vizsgálatoknak számos szakterületre kell kiterjedniük:

- Dráva vízhozam jellemzőinek vizsgálatára,
- a vízállást befolyásoló jégjelenségek vizsgálatára,
- mederhordalék és annak vándorlási vizsgálatára, a parti erózió és medervándorlás kapcsolatára, üledéklerakódásra,
- a medermélyülésre gyakorolt hatások vizsgálatára,
- a környezeti feltételekben bekövetkezett hatások vizsgálatára, úgymint a fizikai, biológiai és kémiai paraméterekre,
- a természeti környezetben bekövetkezett változások vizsgálatára, a flóra és fauna változásokra különösen a reofil fajok tekintetében,
- a folyó hosszirányú átjárhatóságának vizsgálatára, azok változására,
- a Dráva menti társadalmi-gazdasági változások vizsgálatára.

Az eredmények ismeretében – noha azok elemzésénél csak tendenciákat kimutatható adatsorok álltak rendelkezésünkre – remélhetjük, hogy ha teljesen nem is, de vízerőművek üzemének módosításával részben egyszer mégis visszaállhat a természetes vízjárás a Dráván nem sértve ezzel jelentősen az energia szektor érdekeit.

IRODALOMJEGYZÉK

Horváth G. (2002). Hydrological analysis of the Hungarian-Croatian section of the Drava. In” „Az EU VKI bevezetése a Dráva vízgyűjtőjén” conference abstract, WWF, Pécs

Kontur István, Koris Kálmán, Winter János (1993). Hidrológiai számítások. Akadémiai Kiadó, Budapest. ISBN: 9630565021.

Lovász György (1972). A Dráva-Mura vízrendszer vízjárási és lefolyási viszonyai. Akadémiai Kiadó, Budapest. ISBN: 0669002846131.

Majer J. (1994) Az ökológia alapjai. Szaktudás Kiadó, Budapest. ISBN: 963-356-032-2.

A SZERZŐK



BURIÁN ALAJOS a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karán szerzett diplomát vízepítő mérnöki szakirányon. A Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóságon több, mint 20 éve dolgozik az Árvízvédelmi és Folyógazdálkodási Osztályon. Fő szakterülete az árvízvédelem és a folyógazdálkodás. A Drávával már a kezdetektől foglalkozik, számos mellékág megújulása, a folyó mérése, medersüllyedésének vizsgálata és hajózhatóságának kérdése fűződik nevéhez.



DOMÁNY ANDRÁS a Pécsi Tudományegyetem Pollack Mihály Műszaki Karán szerzett környezetmérnöki diplomát, majd a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Építőmérnöki Szakán építőmérnöki diplomát. A Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság Árvízvédelmi és Folyógazdálkodási Osztályán több, mint 6 éve dolgozik. Fő szakterülete az árvizek elleni védelem, e mellett foglalkozik folyógazdálkodási kérdésekkel is.

A buzgárképződés feltételei

Nagy László

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Geotechnika és Mérnökgeológiai Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. (lacinagydr@gmail.com)

Kivonat

A buzgár kialakulása az árvízvédelemben jól ismert jelenség. Begyakorolt árvízvédelmi szervezet esetén a legtöbb esetben hatékony védekezéssel a gát állékonysága megvédhető. A védekezés alapja a mentett oldali ellennyomó medence építése. Amikor a hidraulikus talajtörés már bekövetkezett, a szemcse kimosódása megindult a mentett oldal felé. A fizikai folyamatot vizsgálva, kétségtelen, hogy még vannak nem teljesen tisztázott részek, azonban a kiváltó tényezők megfelelően leírhatók. Ezekkel a kiváltó tényezőkkel és a folyamat magyarázatával foglalkozik jelen közlemény, továbbfejlesztve a szerzőnek a „Buzgárok az árvízvédelemben” című könyvében 2014-ben megfogalmazottakat.

Kulcsszavak

Buzgár kialakulása, peremfeltételek, szemcseméret, víznyomás.

Criteria of sand piping formation

Abstract

The development of the sand boil in flood protection is a well-known phenomenon. In most cases, a trained flood defense organization can effectively protect the dike's stability. The basis of defense is the construction of a counter pressure pool. When the hydraulic fracture had already occurred, the particle washout starts toward the protected side. While examining the physical process, there is no doubt that there are still some unclear parts, but the triggers can be properly described. These triggers and the explanation of the process are addressed in the present article, further developed in the author's 2014 book „Sand boils in the flood control”.

Keywords

Sand boil formation, criterion, grain size distribution, water pressure.

BEVEZETÉS

Buzgárnak nevezzük azt a víznyomás különbség hatására kialakuló jelenséget, amikor egy gát mentett oldalán víz tör fel, és ez a vízfeltörés talajszemcsék kimosódásával jár (Nagy 2014). A buzgár kialakulásának feltételei jól meghatározhatóak. Ezek egy része a helyszíni talajrétegződéssel, másik része a gát geometriájával, harmadik része pedig a vízszintekkel kapcsolatos. Buzgár kialakulásánál a következő nyolc tényező hatását vizsgáljuk:

1. Azon rétegeknek, amelyikből a talaj kimosódik, a talajvízszint alatt kell lennie. Gyakran a mentett oldalon a talajvízszint a terepszinten van.
2. A talajrétegződés hatásánál több lehetőség is szóba jöhet, 1-2-3 rétegű altalajok esete.
3. A buzgárból kimosódó talaj szemcseösszetétele.
4. A helyszínen zavartalan állapotban lévő talaj állapotjellemzője.
5. A földmű geometriája.
6. A víznyomás nagysága a vízoldalon.
7. A buzgárosodásra hajlamos réteg felszínközeli elhelyezkedése.
8. A buzgár kijárata.

Ezek után vizsgáljuk meg egyenként a nyolc tényezőt, vagyis csak hetet, hiszen amennyiben a talajrétegünk nincs víz alatt, akkor a buzgár kialakulása determinisztikusan kizárható. Előzetesen külön kell szólni a nyolcadik tényezőről is. Kétségtelen, hogy egy meglévő kijárat elősegíti a buzgár kialakulását, de nem szükséges tényező, mert a buzgár kialakítja a saját (ki)já-

ratát. Ugyanakkor azt is látni kell, hogy sok buzgár alakult ki mesterséges járaton keresztül és az is igaz, hogy a nem víz által kialakított járat erősen felülírja a mentett oldali talajrétegződés fontos szerepét. Legveszélyesebbek ebből a szempontból az állatok által kialakított járatok és az ember alkotta „járatok”, amibe bele tartozik a fedőréteg elvékonyítása is. Ezért, bár a buzgár kijárata fontos tényező, de a jelen publikációban nem foglalkozunk vele.

Sokan említik a talajok áteresztőképességi együtt hatóját, mint kilencedik tényezőt, de ez valójában a 2., 3. és 4. tényezőkben benne foglaltatik, hiszen az áteresztőképességi együtt ható függ a talajszemcsék eloszlásától és a talaj tömörségétől. Az is kétségtelen, hogy a földmű geometriája a kialakult (vagy tervezés esetén a kialakulható) vízszintekkel-víznyomással van a legszorosabb kapcsolatban, hiszen ezek határozzák meg a talajrétegződéssel egyetemben a kialakuló hidraulikus gradienst. Tehát a hidraulikus gradiens is visszaszármaztatható a 2.-6. tényezőkre.

A szakirodalomban olvasható olyan felfogás is, hogy a buzgár kialakulásához felszíni átboltozódásra képes talaj is szükséges, ami majd a kellő időpontban beszakadhat, vagy felszakadhat (Durst 1962, Fehér 1972, Fehér 1973, Fehér és Szepessy 1977, Von Thun 1996, Fell és társai 2005, Lampl 1959, Polgár és társai 1974, Szepessy és Fehér 1981, Tápay és Szalai 1954). Ez valójában nem szükséges feltétel, mert egyrétegű altalajnál, vagy a mentett oldali felszínen elhelyezkedő talajban is kialakulhat buzgár.

A TALAJRÉTEGZŐDÉS HATÁSA

Buzgárok leggyakrabban a következő talajrétegződésnél azonosíthatók:

- fedőréteg nélküli szemcsés altalajnál - egyrétegű buzgár,
- vízzáróbb (rendszerint kötött) fedőréteg alatti szemcsés altalajnál – kétrétegű buzgár,
- ún. „háromrétegű” altalajnál, amikor a kötött fedőréteg alatt kohézió mentes finomszemcsés réteg van, amihez a vízutánpótlást a jó vízvezető alsó réteg biztosítja,
- kötött talajba szemcsés rétegnek lokális beékelődésénél.

Homogén altalaj

Homogén vízáteresztő altalajon épült töltés alatt a vízáramlás árvíz hatására a telített altalajban gyorsan kialakul. Ebben az esetben a terepszinten lévő finomszemcsés réteg vastagsága a néhány decimétertől a több méterig terjedhet. Minden esetben a töltés jelenti azt a fedőt, ami alatt a hátrarágódó erózió kialakul. A buzgáros tönkremenetel két leggyakoribb leírása a következő:

- A vízszint emelkedésével a homogénnek tekinthető feltalajban, az áramlási nyomás és felhajtóerő hatására - különösen finomszemcsés talajban - először felszín közeli szemcsék, majd a mind mélyebben fekvő rétegek szemcséi lebegő állapotba kerülhetnek. Ekkor a talajszemcsék súlyával egyensúlyt a felhajtó erő és az áramlási tömegelő tart. A felfelé áramlás hatására a talaj teljesen fellazul, mely fellazulás a töltés alá is behatolhat. Az így teherbírást veszített talaj a töltés súlyát nem bírja el, kitér előle és rézsűcsúszás vagy altalajtörés alakul ki. Ez a leírás egy egyensúlyvesztést mutat be, ami Terzaghi-elméletével (Terzaghi 1943) van összefüggésben, csak leszűkítve a problémát egyedi szemcsékre a rétegek helyett.
- Az altalajból adódó szivárgási nyomás a mentett oldalon a töltés lábánál a legnagyobb, itt koncentrálódnak a szivárgási áramvonalak. Ha a szivárgó víz koncentráltan a felszínre tör, intenzív áramlás (csurgás) indulhat meg, mely a vízáteresztő altalaj finom szemcséit kimoshatja, üregeket, vízvezető „csöveket”, „csatornákat” alakíthat ki a talajban. Ezek miatt a vízmozgás felgyorsul és megindul a belső erózió a csatornában, amely végül is az üregek beszakadásához és a töltés összeomlásához vezethet. Ez a leírás erózióra vezet vissza a buzgár kialakulását, a kialakult üregekben kialakuló eróziós határsebességekre.

Kétrétegű altalaj

Ha a vízáteresztő talajon vízzáróbb fedőréteg fekszik és az árvízből származó víznek a talajba való beáramlása a fedőréteg áttörésein (például anyaggyödrökön keresztül) vagy a vízáteresztő rétegbe beágyazódott mederből történik, akkor is kialakulhat buzgár. Ez leggyakrabban kötött fedőréteg alatti szemcsés talaj esetén fordul elő.

A töltés alatt a mentett oldal felé a talajban nyomuló víz a mentett oldali vízzáróbb fedőréteg miatt nem tud a töltés mentett oldali lába közelében a felszínre lépni. A ve-

szélyre néha a felszíni kötött fedőréteg (vagy az alacsonyabb áteresztőképességű gyökérzóna) megemelkedése figyelmeztet. A víznyomás növekedésével (a vízállás emelkedésével) a felfelé ható erő nő, létrejöhet a fedőréteg felszakadása, kialakulhat a buzgár. Ilyen esetben az altalajba vagy a töltésbe beáramló víz nyomása a kötött fedőréteg alsó síkját nyomja felfelé és azt felszakítani törekszik. A fedőréteget felszakítani igyekvő víznyomással szemben a fedőréteg súlya hat (a Terzaghi-féle elmélet szerint). Ennek elégtelensége esetén a fedőréteg felszakad. A víz rendszerint valamilyen repedésen, gyökérjáraton, az atmoszférikus hatások miatt fellazult, elöregedett és/vagy mozaikossá vált felszíni rétegen keresztül talál utat a felszínre vagy ott tör ki, ahol a fedőréteg relatíve a legvékonyabb. A fedőréteg elvékonyodását több tényező is okozhatja, mint például a holtmeder keresztelés, geológiai változás vagy maga az ember, amikor felszántja a 10 méteres biztonsági sávot, illetve fát ültet a gát mentett oldali lábához. Mindegyikre több példával rendelkezünk akár az előző húsz évből is. A felszakadásban az ellennyomás megszűnésével az áramvonalak koncentrálódása, az áramlás felgyorsulása robbanásszerű eróziót indíthat meg. Ez az erózió a töltés alá hátrálva annak beszakadását idézheti elő.

Ha a vízvezető rétegen fekvő fedőréteg nem teljesen vízzáró, hanem például gyökérjáratokkal áttört és különösen, ha a vízvezető réteg sem homogén, hanem a durvább szemű réteg és a vízzáró réteg közé apróbb szemű, könnyen erodálható homok települt és a fedőréteg vastagsága nem haladja meg az 1,0-1,5 m-t, akkor bizonyosan számolhatunk buzgárok feltörésével.



1. kép. Az 1998. évi dombrádi buzgár körülzárása és a kimosott anyag kúpja a vízszint csökkenése után

(Megjegyzés: A képen jól látható, hogy homokzsákok elszedésével lehet a vízmagasságot szabályozni az ellennyomó medencében.)

Photo 1. Enclosure of the 1998 Dombrád sand boil and the out-washed sand cone after the water level decreased

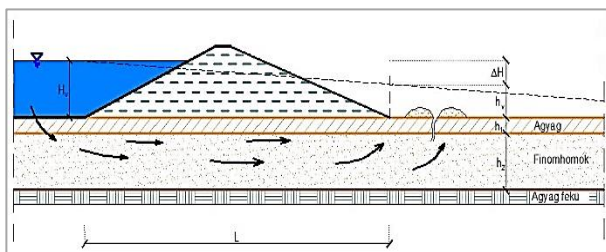
(Note: The picture clearly shows that by collecting sandbags the water level in the counter pressure basin can be adjusted.)

A külföldi szakirodalomban a kétrétegű altalajnál szerepel a hátrarágódó erózió, a kötött fedőréteg alatt egy buzgárképződésre hajlamos finomszemcsés talaj található (Fell és Fry 2007, Fell és társai 2005, Foster és Fell 2000, Foster és társai. 2000, Mattsson és társai 2008, Norstedt és Nilsson 1997, Ravaska 1997, Schmertmann 2000, Sellmeijer és társai 2012, Skoglund és Solvik 1995,

Townsend és társai 1988, Van Beek és társai 2010a, Van Beek és társai 2010b, Van Beek és társai 2012, Von Thun 1996, Wan és Fell 2004, 2007, 2008).

A töltés viszonylag vékony, kötött fedőrétegen áll, ez alatt szemcsés vagy finomszemcsés talaj található. A mentett oldali fedőrétegben, pl. egy korhadt gyökér helyén, függőleges járat keletkezik, melyen át víz léphet ki a felszínre. A koncentrált kilépéssel a víz megbonthatja a szemcsés réteget, amiből a terepszinten kis krátert épít (1. és 2. kép). Amennyiben nincs árvízvédekezés a buzgár ellen, a járat a vízoldal felé hátráló erózióval fejlődik. A folyamat egyre gyorsul, mert a kezdeti hidraulikus gradiens a szivárgási úthossz csökkenésével egyre nő. Végül a járat elér a vízoldalig, ahol a fedőréteg beszakad az alatta keletkezett üregbe. Ekkor a nyíláson át már a folyó vize közvetlenül folyik a mentett oldalra, gyorsan tágítva a járatot, melybe a gát beszakad.

Az 1. ábra a kétrétegű buzgár jelenség szerkezetét és kialakulását mutatja (Fehér 1983). Ha a töltést egy viszonylag vékony át nem eresztő fedőrétegre építették, mely alatt egy erózióveszélyes (pl. finomhomok) réteg található, kialakulhat a belső erózió. A fedőrétegben vagy a gát mentett oldali rézsűjén valamilyen okból egy csatorna nyílik (például korhadt gyökér, vagy ürgelyuk stb. következtében) a kiáramló víz kimoshatja az erózió veszélyes réteget. A 70-es években két elmélet is volt a buzgár kialakulására, amit többször is keverten használtak. Az egyik elmélet szerint úgy gondolták, hogy a nagy vízsebesség közrejátszik az erózió kialakulásánál. A vízsebesség ragadja el a vízben lévő talajszemcséket és mossa ki a hátrarágódó erózió során. Itt az eróziós határsebességnek volt nagy szerepe, ami a kohézómentes finomszemcsés talajoknál a legalacsonyabb. A másik elképzelés szerint a hidraulikus gradiens meghaladja az ott lévő talaj (többnyire finom homok) felszínén lévő határgradiens értékét. E miatt megindul egy eróziós folyamat, mely a finomhomokot szállítja a felszínre és az üreg nyílása körül krátert alakít ki. A következőkben a két és háromrétegű altalajnál ezt a két, a hidraulikus gradienre és az eróziós határsebességre vonatkozó elméletet ismertetjük. Ez a két elmélet többször vegyesen szerepel a leírásokban.



1. ábra. Kétrétegű altalajnál a buzgár sematikus ábrája, a hátrarágódó erózió kialakulása

Figure 1. Schematic representation of sand boil in a two-layer subsoil

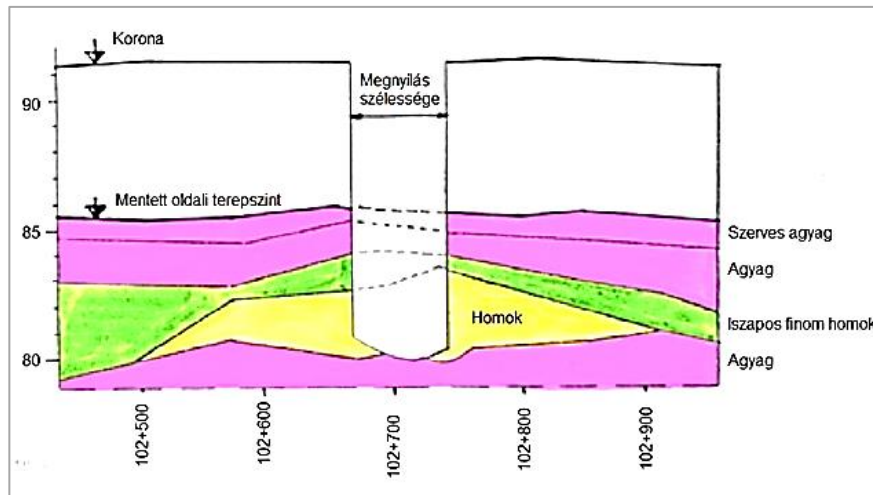
Amikor az erózióra hajlamos finomhomok réteg kimosódik, a járat hossza növekedik a vízoldal felé, ami a kezdeti $\Delta H/\Delta L$ arány folyamatos növekedéséhez vezet. A gát alatt a növekvő csatorna gyengíti a fedőréteget és magát a gátat is: rézsűcsúszás vagy a töltés magasságvesztése következhet be, ami a gát megnyílásához vezethet. Ez az elmélet a hidraulikai gradiens változására vezeti vissza a buzgár kialakulását.

Megtörténik azonban, hogy minden előzetes jelzés nélkül hirtelen szakad fel a fedőréteg. A felszakadás után az ilyen talajtörésnél a buzgár kifejlődése olyan gyors, hogy hatékony beavatkozásra kevés idő marad. Ezért törekedni kell az olyan helyek megismerésére, térképezésére, ahol a fedőréteg talajának erős kötöttsége és viszonylag vékony volta ilyen veszélyt rejt magában. A XX. század közepén több hidraulikus talajtöréssel kialakult gátszakadás is volt Magyarországon és néhány a szomszéd országokban, amelyeknél gyakorlatilag nem volt esély az árvízvédekezésre, olyan gyorsan alakult ki a gát megnyílása.



2. kép. A nyomás alatt feltörő buzgár bugvogása
Photo 2. Sand boil bubbling under pressure

A fent leírt gyors mechanizmus szerinti egyik legutolsó gátszakadás a Kettős-Körös jobb partján Hosszúfoknál történt 1980-ban (Szepessy és Fehér 1981). Ez volt a második gátszakadás, melynél részletesen dokumentált talajmechanikai feltárás készült, és nemcsak homályos árvizes elbeszélések alapján lehetett meghatározni a tönkremenetel mechanizmusát és a talajrétegződést. A Hosszúfoki buzgárnál feltárt talajrétegződést mutatja a 2. ábra, melyhez tartozó szemeloszlási görbe a 3. ábrán látható. A gátőrök, akik ennek a gátszakadásnak a rendszeres megfigyelésével voltak megbízva, ez alatt az árvíz alatt nem vettek észre semmiféle károsodásra utaló jelet egészen 1980. július 28-án kora hajnalig. A vízszint tetőzése utáni második nap reggel 6.35-kor az örök kb. 100 méter távolságban a gáttól egy nagyon erős vízkilövellést figyeltek meg. A víz, jelentésük szerint „fekete és sűrű iszapos” volt. A gátszakadás körülbelül 5 perc alatt következett be. A szakadás szélessége gyorsan nőtt, reggel 7 órára elérte a 10 métert, végleges szélessége 78 m lett.



2. ábra. Talajrétegződés a Hosszúfoki gátszakadásnál
Figure 2. Subsoil layers at the Hosszúfok dike breach

Szepessy (1983) szerint: „Nagyon fontos, hogy ebben a folyamatban a víz mennyisége, mely a finom homokot szállítja, a szivárgási folyamatból származik. Másrészt a finomhomok kritikus gradiense Terzaghi szerint $i = 0,7-0,8$. Azonban ennél a gátnál is az $i = \Delta H/\Delta L$ értéke $1/8-1/12$ volt. Ha a szivárgási jelenség kezdeti gradiensét csak a mentett oldali fedőrétegre kell tekinteni (1. ábra), akkor az mondható, hogy az értéke elérte, vagy meg is haladja a kritikus gradienst, így az eróziós folyamat el tudott indulni.” A buzgár kialakulását a 4. ábra mutatja.

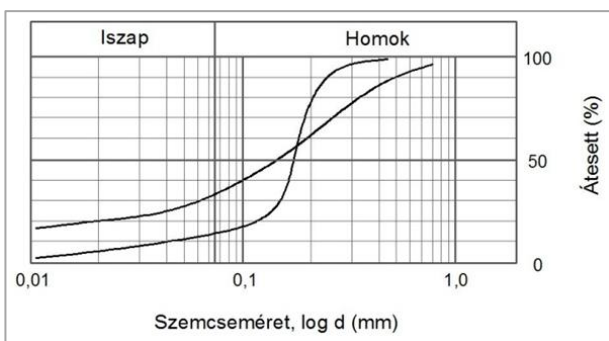
képződés lehetősége, vagyis hosszabb távon az árvízvédelem hatékony fejlesztése nélkül a csúcsdöntő árvizeknél egyre több buzgár megjelenésével kell számolni. Egy nagy árvízkor kialakult buzgár egy kisebb árvízkor is tovább növekedhet, ugyanis a folyamat már korábban beindult, a lassú buzgárnál egy alacsonyabb hidraulikus gradiensnél is van lehetőség a már megrövidült szivárgási út miatt a buzgár újbóli kialakulására.

Háromrétegű altalajnál kialakuló buzgár

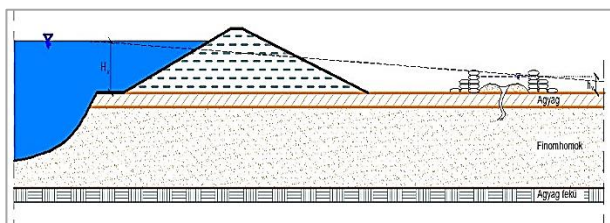
A háromrétegű altalajnál kialakult buzgárok vizsgálata már az 1980-as években hidraulikailag kompetens, geometriailag helyes megoldást adott a buzgár kialakulására. A külföldi irodalomban kevés információ van az ilyen altalaj rétegződésről.

A veszélyes buzgár kifejlődésének egyik legvalószínűbb helye Magyarországon a háromrétegű altalaj, ahol a vizet rosszul vezető fedőréteg és a vizet jól vezető alsó réteg között egy erózió veszélyes, finomszemcséjű, többnyire iszapmentes szemcsés talaj is van, amit a buzgár kimos. A vizet jól vezető réteg – rendszerint homokos kavics, kavicsos homok, apró kavics – biztosítja a folyamatos és egyenletes víznyomást és vízhozamot. A kohézió mentes finomhomok réteg a víz által könnyen elsodorható, elmosható, ha megfelelő mennyiségű víz áll rendelkezésre. A vizet rosszul vezető fedőréteg visszatartja, visszadzasztja a víznyomást, egészen addig, amíg valamilyen járaton koncentráltan meg nem indul egy csurgás. A jó vízvezető, alsó rétegben nyomás alatt áramló víz a fedőréteg folytonossági hiányain át utat talál a felszínre. Erre a járatra koncentrálnak a víznyomás, mely lehetővé teszi a finom homok megbontását.

Egy háromrétegű altalaj esetén a buzgár egy valószínű rétegrendjét és kialakulását mutatja a 3. és az 5. ábra. Ha a gátat egy viszonylag vékony, vizet át nem eresztő fedőrétegre építették, mely alatt a fenti háromrétegű altalajnak megfelelő két réteg helyezkedik el, a fedőrétegben vagy akár a gát mentett oldali rézsűjének alsó részén keresztül a szivárgó víz koncentráltan a felszínre tud törni. Nem lehet tudni, hogy a kiáramló víz az erózióveszélyes talajnak a felszínét bontja-e meg a lokálisan kialakult hidraulikus gradiens megnövekedése (és a kritikus gradienst túlhaladó



3. ábra. A 2. ábrán bemutatott talajrétegződésben az iszapos homok és iszapos finomhomok szemcse eloszlási görbéje
Figure 3. The grain size distribution curves of the silty sand and silty fine sand in the soil layer shown in Figure 2



4. ábra. A buzgár elleni védekezés sematikus ábrája kétrétegű altalaj esetén

(Megjegyzés: Az altalajban lévő semleges feszültség nyomásvonalát mutatja a szaggatott vonal a buzgár kitörése előtt.)

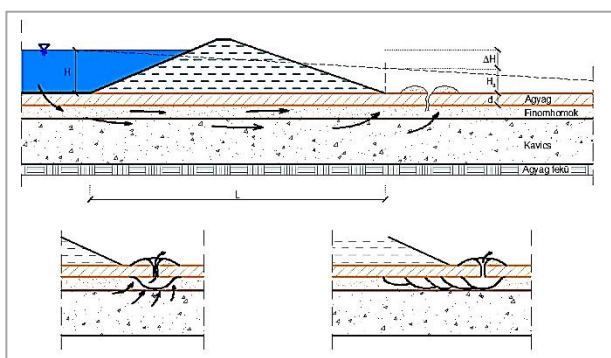
Figure 4. Schematic representation of sand boiling control in double-layer subsoil

(Note: The pressure line of the water pressure in the subsoil is indicated by a dashed line before the outburst of the sand boil.)

Az állandó gátméret mellett a folyók tetőző vízszintjének emelkedése maga után vonja, hogy megnő a buzgár-

értéke) miatt alakul-e ki, vagy a hirtelen fellépő semleges feszültség csökkenése miatt kialakult húzás miatt bontja meg erőteljesen. Megindul egy eróziós folyamat, mely az erózióveszélyes anyagot elszállítja, és a felszínen az üreg nyílása körül krátert alakít ki. Amikor az erodálódó talaj kimosódik, a járat hossza növekszik a vízoldal irányába. Ez a kezdeti gradiens folyamatos növekedéséhez vezet. A gát alatt a növekvő eróziós csatorna gyengíti a fedőréteget és magát a gátat is, ami gátszakadáshoz vezethet.

A kiáramló víznek nincs nagy a sebessége. Az üreg felszíni eróziója okozza a szemcsék leválását. Azonban mi okozza a felszíni eróziót? Az eróziós határsebesség nagysága kétségtelenül a laza finomszemcsés talajokban a legalacsonyabb, amikor még éppen nincs kohézió, de ennek nagysága nem éri el a talajban az eróziós határsebességet (a feltárt járat mérete és a kiáramló víz közbőzése alapján.)



5. ábra. A háromrétegű altalaj

(Megjegyzés: A lejátszódó hátrarágódási folyamat gyakorlatilag megegyezik a kétrétegű talajnál tapasztalttal, azzal a különbséggel, hogy az alsó jó vízvezető réteg erős vízutánpótlást biztosít.)

Figure 5. The three-layer subsoil

(Note: The process of back erosion is practically identical to that of a double-layer soil, except that the lower good drainage layer provides a strong water supply.)

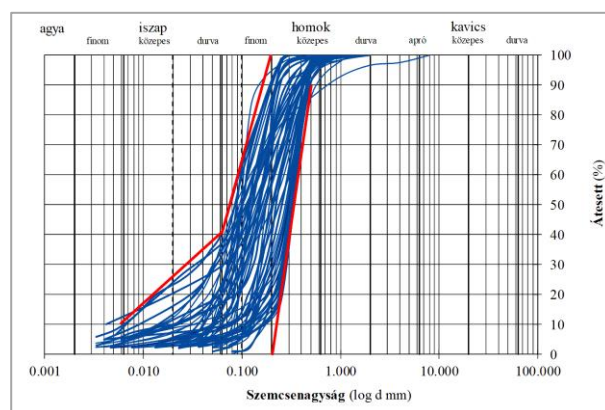
A jelenlegi ismereteink szerint a vízáram belső eróziója először a fedőréteg alatti finom homok réteget bontja meg, majd az így kialakuló üregben még jobban megerősödő, úgyszólván akadálymentes vízáramlás ezt a járatot, amelyik a felette levő, boltozatszerűen megálló kötött réteg alatt hátráló erózióval a folyó felé tart (Csak a hazai szakirodalom töredékét említve: Szepessy és Fehér 1981, Lampl 1959, Fehér 1971, Polgár és társai 1974, Sümegi 2003, Tápay és Szalai 1954, Nagy 1999, 2000, 2009). Közben a fedőrétegben levő kifolyó nyílás oldalai is kimosódva, a kifolyás bővül és mind több anyag kisodrása válik lehetővé. Végül, ha megfelelő és gyors beavatkozás nem történik, és az árvíz nyomása továbbra is fennáll, a visszarágódás átér a töltés árvízi oldalára, majd a visszarágódott járaton át meginduló átfolyás a járat nagymértékű bővülésére, végül beszakadására vezet. Ennek a folyamatnak az eredménye a töltés berogyása, a gátszakadás.

Válasszuk ketté a tényeket és az elképzeléseket. Tény, hogy a buzgáros talajtörések környezetét feltárva sok helyen ezt a jellegzetes, hármas rétegsort lehet azonosítani, és hogy a buzgár veszélyes talaj hátráló erózióval képez üreget és teszi tönkre a gátat. Elképzelés az, hogy ezt az eróziót a vízsebesség, a kilépési gradiens vagy a pórusvíznyomásban kialakuló húzás okozza. Ugyancsak tény, hogy

a nemzetközi irodalom kevésbé ismeri a háromrétegű altalajhoz tartozó buzgárképződési folyamatot. A hátrarágódó erózió itt még veszélyesebb lehet, mint a kétrétegű altalajnál, mert az alsó, a vizet jól vezető réteg gyakorlatilag gyengítés mentesen adja át a víznyomást és nagyon bő vízhozamot biztosít. Így a sokkal veszélyesebb, ún. gyorsbuzgár jöhet létre.

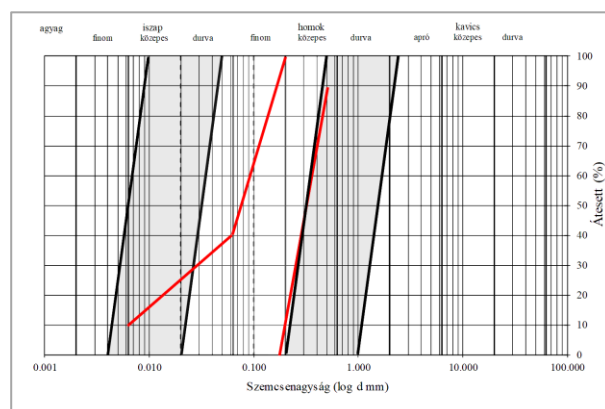
A BUZGÁRBÓL KIMOSÓDÓ TALAJ SZEMCSÉ ÖSSZETÉTELE

A buzgárból kimosódó talaj szemcséösszetételével részletesen foglalkozik Nagy (2014), 64 mintán elemezve a talajok összetételét, az egyenlőtlenségi mutató és az iszaptartalom szerepét, valamint a d_{10} , d_{60} és d_{80} eloszlását. Megállapítható, hogy a magyarországi buzgárból kimosódott talajok szemeloszlási görbéje viszonylag szűk tartományba esik (6. ábra). A pirossal jelzett határgörbe azt mutatja, hogy viszonylag keskeny az a sáv a szemeloszlási görbén, amelyik a buzgárból kimosódó talaj tartományát mutatja (Nagy 2014). Ez a tartomány közel azonos szemcseméretű talajokat mutat, olyanokat, amelyeknek alacsony a szemcseátmérője, de még alapvetően kohézió mentesek. A szemcseméretük alapvetően megegyeznek a földrengésnél tapasztalt megfolyósodás szemcsé-tartományával (7. ábra).



6. ábra. A buzgárból kimosott talajok szemeloszlási görbéi (Forrás: Nagy 2014)

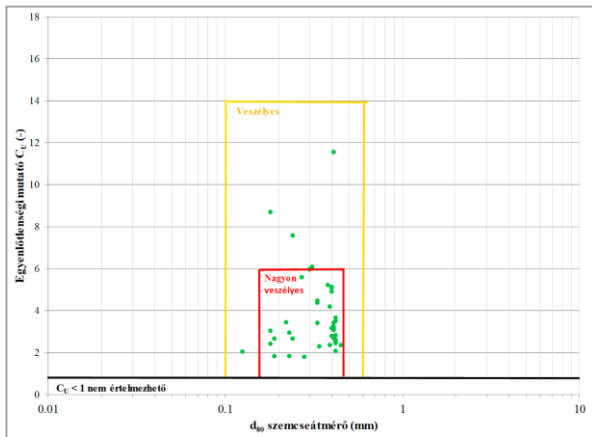
Figure 6. Grain size distribution curves of soils washed out from sand boils (Source: Nagy 2014)



7. ábra. A megfolyósodásra leginkább veszélyes talajok Smoltczyk (2002) sematizált ábrája (feketével), kiegészítve a buzgárból kimosott talajok határgörbéivel (piros)

Figure 7. Schematic representation of soils at risk of liquefaction (black) by Smoltczyk (2002), supplemented by boundary curves of soils washed out from sand boils (red)

A szemeloszlási vizsgálatok alapján a talaj szemeloszlásának veszélyességére egy kombinált értékelés került kidolgozásra, ahol a szemeloszlási görbe kitüntetett pontjainak van nagy szerepe (8. ábra).



8. ábra. A szemeloszlás veszélyességének kombinált értékelése (Forrás: Nagy 2014)

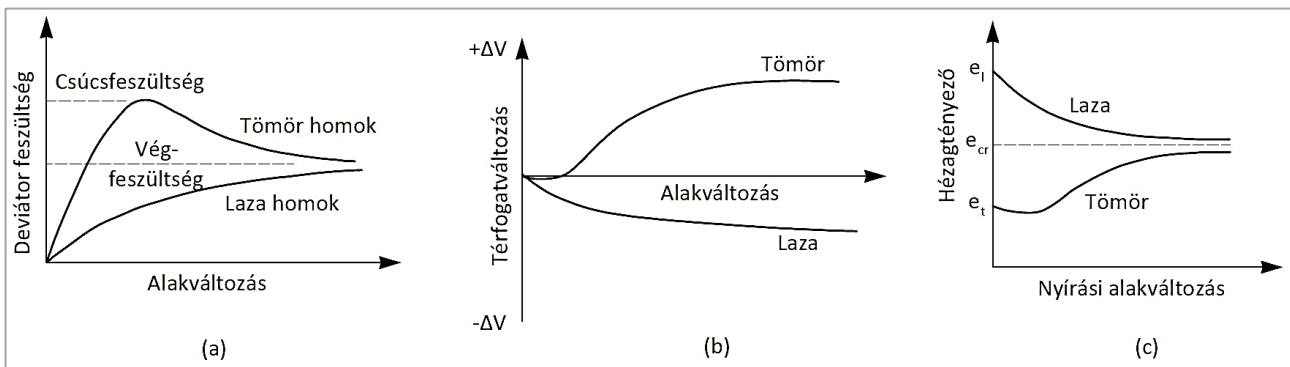
Figure 8. Combined assessment of the hazard of the grain size distribution (Source: Nagy 2014)

ZAVARTALAN ÁLLAPOTBAN LÉVŐ TALAJ TÖMÖRSÉGE

A talaj tömörsége minden geotechnikai szakember számára azt jelenti, hogy a laza talaj talajfizikai paramétereit rosszak, mint a tömör talajoké. Azonban sokszor nehéz megmondani egy adott talajnál, hogy az inkább laza vagy tömör. Casagrande (1936) ezt a kérdést már 1935-ben felismerte, amikor a közvetlen nyírási kísérlettel hozta párhuzamba. Azt állította, hogy a nyíródobozban a tömör talajok

nyírás hatására fellazulnak, a laza talajok pedig inkább összehúzódhatnak. Mivel mindkét kísérleti eredmény térfogatváltozással jár, azt állította, hogy kell lennie egy olyan tömörségnek, amikor a talajminta térfogata nem változik nyírásakor. Ehhez a tömörséghez tartozó hézagtenyezőt nevezte el kritikus hézagtenyezőnek (e_{kr}). A buzgárképződésnél a kritikus hézagtenyezőnél nagyobb hézagtenyező esetén, vagyis lazább állapotban könnyebben alakul ki buzgár, mint kisebb hézagtenyező esetén. Vagyis referencia értéként a kritikus hézagtenyező értéke lenne elfogadható. Hasonló a helyzet az áteresztőképességi együttható értékével is: a kritikus hézagtenyezőnél nagyobb hézagtenyező esetén nagyobb az áteresztőképességi együttható, mint kisebb hézagtenyező esetén. Meg kell állapítani, hogy a kritikus hézagtenyező feszültség függő, a feszültség növekedésével csökken az értéke.

Casagrande után Castro (1975) laza mintákon végzett triaxiális kísérletei azt mutatták, hogy a vizsgálat végén jól definiált egyensúlyi állapot alakul ki, szerinte ez a kritikus hézagtenyező értéke. A drénezetlen körülmények között történő nyírás során a minta térfogata a kezdeti állapottól függően változik (9. ábra). A laza homok csökkeni térfogatát, míg a sűrű homok kissé összenyomódik a nyírás kezdetén, majd jelentősen fellazul. Így a homok lehet összenyomódó vagy lazuló. Egyes kutatók szerint a laza és sűrű kifejezések sem eléggé megfelelőek, mivel a homok viselkedése nem csak a kezdeti hézagtenyezőtől, hanem a tényleges nyomástól is függ. Így az összenyomódó vagy lazuló (kontrakciós vagy dilatációs) kifejezések megfelelőbbek. A kritikus hézagtenyező értékének a meghatározására mutat példát a 9. ábra.



9. ábra. Tipikus feszültség-elmozdulás és térfogat változási görbék homoktalajoknál
Figure 9. Typical stress-strain and volume change curves for sands

A kritikus hézagtenyező értékének a laboratóriumi megállapítása azonban lassú és nehézkes feladat, ugyanakkor sok helyszíni sűrűség mérést is kell végezni. Egyszerűsíti a vizsgálatot a CPT szonda alkalmazása, egy talajfajta jellemző csúcsnyomásból következtetni a laza állapotról. Különösen hatékony lehet olyan geofizikai CPT szonda alkalmazása, ahol egyszerre sűrűség és víztartalom mérés is történik. Ezekkel a vizsgálatokkal ugyan a kritikus hézagtenyező nem kerül meghatározásra, de az izotópos mérésekből számolt állapotjellemzőkből pontosan következtethetünk a tömörségre és a hézagtenyezőre. Így a szemcsés talaj buzgárképződésre való hajlama jobban közelíthető.

A FÖLDMŰ GEOMETRIÁJA

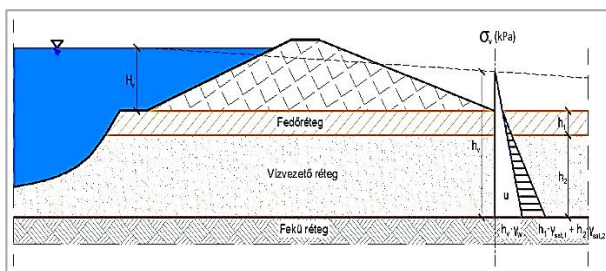
A buzgár elsősorban az gát általalajában alakul ki, a vízoldalon beszivárgó víz a mentett oldalon jelenik meg. De a buzgárképződésből nem zárható ki más beszivárgási és más kikapcsolási hely sem. A gát általalajában kialakuló buzgárnál a földmű geometriája, a töltés talpszélessége a minimálisan szükséges szivárgási úthosszat jelöli ki. A talpszélesség az, amit egy egyszerűsített szivárgási modellben a víznek a rétegekkel párhuzamosan meg kell tennie. Így könnyű lenne számolni a töltés alatti szivárgási úthosszat és könnyű lenne meghatározni a kialakult hidraulikus gradienst. Azonban, amikor a szivárgási vonal eltér a vízszintestől, számítási nehézség adódik. Ezért a szivárgási feladatok manapság már a korábbi egyszerű numerikus megoldásoknál a véges elemes programokkal sokkal jobban közelíthető.

A földmű geometriája determinálja a maximális víznyomást, vagyis a maximális vízszintet a folyóban. Ez a töltés magassága. A folyó vízszintje ugyan lehet magasabb a töltés koronaszintjétől nyúlgát építése esetén, de a tervezés nem erre a vízszintre, hanem a koronamagasságra készül. Vagyis szélső esetben a töltés koronával színelő vízállást kell a számításnál figyelembe venni. Azonban a legtöbb esetben a vízszint nem éri el a korona szintjét. A rögzített legnagyobb árvízkorai vízállásból, valamint a buzgár megjelenésekor vízállásból fontos visszszámolási lehetőség (back analysis) adódik a gátkereszttszelvény buzgárosodásával szembeni ellenállására.

A VÍZNYOMÁS KIALAKULÁSA ÉS ANNAK HATÁSA

Árvízmentes időben a folyó vízszintje a mederben van. Ennek megfelelően a mentett oldalon a talajvíz nyugalmi szintje a nem túl távoli meder és sík terepviszonyok esetén nagyjából a folyó vízszintje körül van. A semleges feszültség vagy pórusvíznyomás statikus állapotban a nyílt felszínű talajvízszinttől lefelé lineárisan nő.

Tetőző víznél statikus állapotot feltételezve az altalaj vízvezető rétegében kialakuló víznyomás magassági vonala a 10. ábrán látható. Az altalaj vízvezető rétegében – homogén izotróp réteget feltételezve – bárhová helyezett piezométercsőben a vízszint eddig a magasságig emelkedik. Feltételezve, hogy a mentett oldali kötött fedőréteg áteresztőképessége legalább két nagyságrenddel kisebb, mint a vízvezető rétegé, már azt kapjuk, hogy a fedőrétegen gyakorlatilag nem megy át a víz, a fedőréteg alján feltorlódik a nyomás, felhajtó erőt hoz létre. Ekkor a fedőréteg alsó síkjára ható felhajtó erőt az itt ható víznyomásból tudjuk meghatározni. A felfelé ható feszültség értéke a 10. ábra jelöléseit használva $(h_v - h_2) \times \gamma_w$ értékű lesz. Ezzel kell a klasszikus talajmechanika elvei szerint a fedőrétegnek a vastagságával és telített fajsúlyának szorzatával egyensúlyt tartania. Amikor a $(h_v - h_2) \times \gamma_w = h_1 \times \gamma_{\text{sat},1}$ értékkel, akkor a biztonsági tényező $\gamma = 1$. Ezzel azonban nem elégedhetünk meg tervezéskor.



10. ábra. Függőleges feszültségek nagysága a mentett oldali töltésláb alatt statikus terhelés esetén, árvíz tetőzésekor

Figure 10. The magnitude of the vertical stresses in the protective side of the dike under static loads during flood peaks

A buzgárt a vízdalról átadódó hidrosztatikus nyomás hozza létre, mely által kialakult nyomás a mentett oldalon nagyobb, mint amekkora mellett még a mentett oldal hidraulikailag állékony. A mentett oldali fedőréteg szemcséinek súlya és összetartó ereje (kohéziója) elégtelenné válik a felfelé irányuló víznyomás ellensúlyozásához. Ekkor a biztonsági tényező $\gamma < 1,0$ értékkel jellemezhető. A buzgár kialakulása után a töltéstest gyengülése rendszerint lassan,

nem robbanásszerűen megy végbe, így lehetőség van a buzgár krátere köré olyan homokzsák ellennyomó medence építésére, amely a közlekedő edények elve alapján egyensúlyt tart. A buzgárból kifolyt víz önmaga alakítja ki a biztonságos állapotot, ugyanis az ellennyomó medencében addig emeljük a víz szintjét, amikor már az anyagkiszodrás megszűnt. Ekkor a közlekedő edények elvéhez hasonlóan az ellennyomó medence vízszintje tart egyensúlyt a talajszemcséket elragadni törekvő folyóbeli víznyomással. Ez a helyzet azért veszélyes, mert gyakorlatilag a $\gamma = 1,0$ biztonsági tényezőhöz tartozó állapotot tartunk fenn. Ezért árvíz alatt a buzgár folyamatos ellenőrzést igényel.

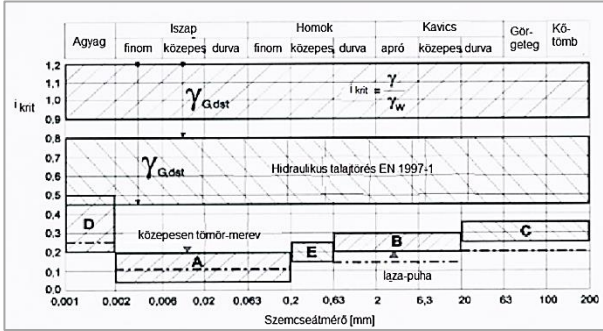
Tekintettel arra, hogy a hidraulikus gradiens eloszlása csak homogén talajban egyenletes, rétegzett talajnál az átlagos hidraulikus gradiens értéke csak műkedvelőknek szóló érték, nem ad magyarázatot semmire. A nagy hidraulikus gradiens ugyanis a legkevésbé vízvezető talajnál alakul ki, vagyis a kötött fedőrétegnél. Ezért a kötött fedőréteg átütése buzgárt eredményezhet egy adott helyen. A természet is alkotott olyan gyengített helyeket, melyeken keresztül a buzgár kialakulhat. Ilyenek lehetnek például a repedések (melyek térfogatváltozó talajokban alakulnak ki), fűrő vagy üreglakó állatok megtelepedése, elhalt vagy élő gyökerek stb. Kártékony az ember is: műtárgy melletti kontúrshivárgás, de gátszakadás nem megfelelő föld visszátöltése is kialakíthat buzgárt. Technológiai buzgárnak nevezzük, amikor a mentett oldali feltárás nem megfelelően lett visszatömédelve, és a fűrőlyuk hozza fel a szemcsés talajt a mélyből.

A hidraulikus gradiens helyi és az egész szivárgási vonalra vonatkozó értelmezése között különbséget kell tenni. Tény, hogy még manapság sem tudjuk számszerűsítve kezelni a réteg felületén, különösen a talaj közegből kilépő felületén lejátszódó folyamatot, a szivárgásból a felszíni lefolyásba történő átmenetet. Ez azt jelenti, hogy nem tudjuk, mekkora gradiens jelentkezik milyen hosszra elosztva. Valószínű, hogy elég nagy, ha a szemcséket el tudja mozdítani. Azonban ez nem igaz a teljes szivárgási hosszra, vagyis értelmetlenség átlagos gradienst számolni.

Egy átlagos vízmolekulának, ha a folyóból a mentett oldalra akar jutni az altalajon keresztül, akkor át kell jutnia a vízdalali fedőrétegen, végig kell haladnia a gát alatti vízvezető rétegben és hogy fakadó vízként megjelenjen, le kell küzdenie a mentett oldali felfelé áramlást. Kétségteljesen ezek eredője eltérő gradiensű részekből tevődik össze. Ha a mentett oldal felszakad és vízdalali beszivárgás veszteségétől eltekintünk, akkor értelmezhető egy átlagos gradiens a vízvezető talajban, ez azonban magasabb lesz, mint a valóság, a vízdalali elhanyagolás miatt. Az így kiszámolt gradiens azonban a tapasztalatok alapján el sem éri a Terzaghi (1943) által meghatározott kritikus gradiens értékét, sőt annak negyedét sem. Terzaghi elméletét a gyakorlat cáfolta, lényegesen kisebb hidraulikus gradiensnél alakulnak ki buzgárok. Chugaev (1971) és később Brandl (2010) vizsgálatai alacsonyabb kritikus gradienst állapítottak meg (I. táblázat és II. ábra). Chugaev ún. globális (átlagos) gradiensek figyelembevételét javasolta 1958-ban a finomszemcsés és kötött talajokra.

1. táblázat. Chugaev (1958) által javasolt globális gradiensek
Table 1. Global gradients suggested by Chugaev (1958)

Talaj típus	Globális gradiens
Finom homok	0,12
Közepes homok	0,15
Homokos iszap	0,2
Kavicsos homok	0,25
Tömörített agyag	0,4



11. ábra. A megengedett hidraulikus gradiensek értéke (eredményvonallal ábrázolva) különböző talajoknál Brandl (2010) szerint
Figure 11. Permissible hydraulic gradient value (plotted with dashed line) for different soils according to Brandl (2010)

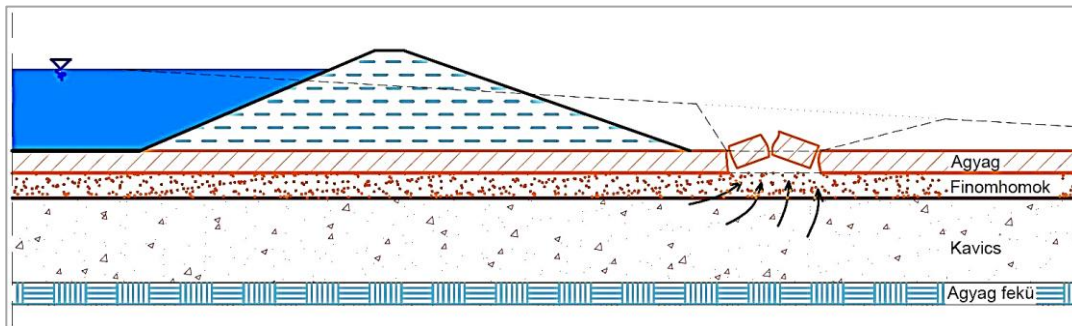
Ugyancsak figyelmet kíván az, hogy milyen nyomás-ábrát rajzolunk a gát alatti vízvezető talajban, mert a buzgár feltörésekor hirtelen nyomásnövekedés játszódik le. Tehát nem mindegy, hogy melyik időpillanatra vonatkoztatunk az ábrázolással.

A hátrarágódó erózió folyamatánál a semleges feszültség változásának hatását kell világosan látni. Ha buzgárban lévő talajszemcse-víz határfelületén a víznyomást két oldalról közelítjük (12.b. ábra), azt látjuk, hogy víznyomás különbség áll elő. A folyamat elején, amikor a buzgár felszínre tör, a semleges feszültség hirtelen lecsökken (12.a. ábra szaggatott

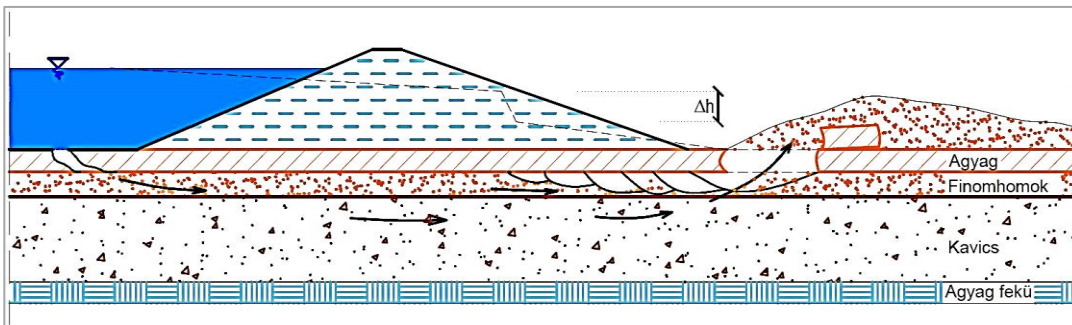
vonala), ahogy ezt a sematikus ábra mutatja. Az altalaj jó vízvezető rétegében uralkodó semleges feszültség akár egy-másfél métert is csökkenhet (a hazai árvízvédelmi gátak keresztmetszeti méretei alapján), mert a buzgár kitörésekor a víznyomás magassága a terepszint feletti néhány centiméterben adható meg. Ez a folyamat játszódott le a Hosszúfoki gátszakadásnál 1980-ban. Erős, nagy buzgároknál a kialakult vízdóm magassága meghaladhatja a 10 centimétert (2. kép). A hirtelen nyomásnövekedés relatív húzást jelent az erózió veszélyes altalajban. (A húzás szótól nem kell megijedni, húzás kialakulhat a vízben is, és ha nem szakad meg a vízszál (pl. levegő buborék - belevégzés - miatt), akkor több méteres is lehet a húzás értéke. Így működnek a szivornyák és a vákuum kutak. Azonban itt csak relatív húzásról van szó, ami egy korábbi állapothoz viszonyítva alakul ki. Jól fedi a folyamatot a „hirtelen leszívás” kifejezés is, vagy hirtelen bekövetkező semleges feszültség csökkenése is, mely ismert, és teljességgel elfogadott a hazai építőmérnöki gyakorlatban.)

Ez a „húzás”, ami az erodálható szemcséket elmozdítja, és a buzgárnál szemcsékimosódást okoz. Ezt a vízdal felé tartó eróziót mutatja a 12.b. ábra. A talajszemcsék elmozdulását a Δh nyomásnövekedés okozza. A mentett oldalon a buzgár kitörése előtti nyomásmagasságot az 5. és 10. ábra szemlélteti. Ugyanakkor a buzgár kitörésekor azt látjuk, hogy csak néhány cm magas vízdóm alakul ki (2. kép). A kettő közötti semleges feszültség csökkenés, eleinte a kitörés helyén (12.a. ábra), később a hátrarágódó erózió éppen aktuális helyén (12.b. ábra) vezethet az ellenintézkedések elmaradása esetén a gát tönkremeneteléhez (12.c. ábra).

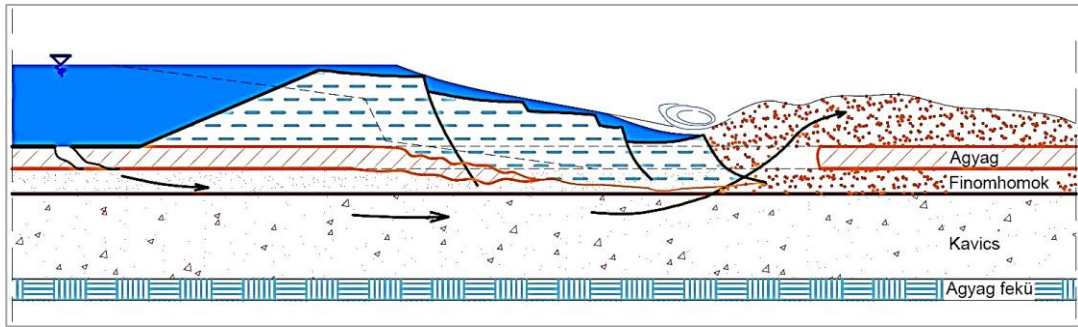
Az erózió hátrarágódásával a nyomásnövekedés tehát vándorol a vízdal felé az erózió veszélyes talajban, mint ahogy a 12.b. ábra mutatja. A vízdalhoz közeledve a még nem bolygatott részen kétségtelenül megnő a hidraulikus gradiens értéke, ami a hátrarágódó folyamat fenntartójává válhat.



12.a. ábra. Buzgár kialakulásánál a semleges feszültség csökkenése a buzgár helyén (vastag szaggatott vonallal)
Figure 12.a. Decrease in water pressure at the site of the sand boil formation (with a dashed line)



12.b. ábra. A hátrarágódó buzgár kifejlődése, a nyomásvonal csökkenése (Δh) a vízdal felé halad
Figure 12.b. Development of receding sand boil, pressure drop (Δh) towards water side



12.c. ábra. A gát tönkremenetele több módon is bekövetkezhet, leggyakrabban olyan nagy lesz a kimosódott üreg, hogy beszakad a gát
Figure 12.c. Failure of a dike can occur in many ways, most often with a large leached cavity fall in the dike

Kétségtelen, hogy a húzás következtében az erodálható talajnak a pillanatnyilag aktuális felületén kialakulhat nagy hidraulikus gradiens, azonban ez nem ok, hanem eredmény. Buzgáros talajtörésnél az ok a felszakadás következtében kialakult semleges feszültség csökkenése, a (relatív) húzás. Azért csak relatív húzás, mert a nyomófeszültség bizonyos szinten megmarad, tehát a nyomófeszültség nem fogy el teljesen.

A mentett oldali víznyomások kialakulása szempontjából nem érdektelen a vízdoldali talajrétegződés és a folyó távolságának hatása. Az altalajba történő beszivárgás csak a felszíni agyag rétegen vagy a medren keresztül jöhet létre. Könnyen belátható, hogy távoli meder esetén a víznek nagyobb távolságot kell megtennie, vagyis a hosszabb szivárgási úthossz miatt kisebb gradiensek alakulnak ki. Nagyon távoli meder esetén pedig már a kötött fedőrétegen történő beszivárgás lehet a mértékadó. Ugyanakkor ne feledkezzünk el arról, hogy ha a jó vízvezető réteg a vízdoldal felé a terepszintre kiékelődik vagy a vízdoldalon olyan gödör – esetleg a töltés építéshez használt korábbi anyagnyerőhely gödre – vagy kopolya van, amelyek a lecsökkenti a vízdoldalon a beszivárgás távolságát a mentett oldalon kedvezőtlenebb körülményeket hoz létre. Hasonló szerepe lehet olyan holtmedernek is, mely csak érinti a vízdoldalon a gát lábát vagy be is hatol a töltés alá.

FELSZÍNKÖZELI ELHELYEZKEDÉS

Árvízvédelmi gátaknál a szivárgási úthossz a vízbeszivárgás, az altalajban történő vízáramlás, majd a mentett oldali felszivárgás függvénye. Mivel a töltés alapjának hossza egy keresztmetszvényben állandó, a buzgárosodásra hajlamos réteg mélységbeli elhelyezkedésének erős hatása van. Könnyen belátható és végeselemes számításokkal pontosan is igazolható, hogy mélyen elhelyezkedő, veszélyes rétegnél egyrészt a beszivárgás úthossza, másrészt a mentett oldali felszakadása is lényegesen nagyobb hidraulikus veszteséget jelent, mint a töltés alatti szivárgásé. Tehát a buzgár kialakulásánál szükséges a felszín közeli, a felszínhez lehető legközelebbi talajréteg. Ennek nagyságára az eredeti terepszint alatt tíz méternél nem mélyebb elhelyezkedés olyan erős hátrányt jelent, ami az esetek csaknem mindegyikében megfelelő határfeltételeként fogadható el. Árvíz után feltárt buzgárok tapasztalata azt mutatja, hogy két-három méternél mélyebb járatok nem voltak jellemzőek.

ÖSSZEFOGLALÁS

A buzgár kialakulásának bemutatott feltételei leírják azokat a szükséges és elégséges követelményeket, melyek a

buzgár kialakulásának alapfeltételei. Kizárólagos tényezőként csak a talajvízszint alatti elhelyezkedés szerepel, de a kijárat megléte sem alapkövetelmény. A további hat tényező egymással szoros kölcsönhatásban áll. A kialakult hidraulikus gradiens, a rétegződés, a buzgárosodó réteg állapotjellemzői és a szemeloszlás kölcsönhatásában ezeknek egy hatdimenziós térben meghatározható eredője számít, egy vagy több tényező részben kompenzálhatja egy másik tényező hatásának erősségét vagy gyengeségét. Például egy tömörebb homoknál valószínűleg nagyobb hidraulikus gradiens szükséges, mint egy lazánál, vagy egy laza homokos iszapban is kialakulhat buzgár megfelelően nagy hidraulikus gradiens esetén annak ellenére, hogy nem ez a legveszélyesebb talaj buzgár szempontjából.

Az árvízvédelem stratégiája a megelőzés. Ehhez előre meg kell (és meg is lehet) határozni a buzgárveszélyes helyeket. Ennek az előrelátásnak a lényege, hogy az egyes tényezők térképezhetőek, előre felmérhetőek, jól meghatározhatóak, úgymint a talaj szemcseösszetétele, a talaj tömörsége, a rétegződés a geometria és a hidraulikus gradiens. Azonban ezeknek a tényezőknek a hatdimenziós eredőjét még nem tudjuk numerikusan meghatározni, így a hidraulikus talajtörés egyesített peremfelületét a hatdimenziós térben sem tudjuk megadni. Azonban a tényezők egyenkénti vizsgálatában egyre pontosabbak az eredmények.

Több elképzelés is kialakult a buzgár keletkezésére, milyen hatások játszanak szerepet azon a felületen, ahol a szemcsék leszakadnak a talajról (Csak néhány hazai forrást említve: *Fehér 1971, Polgár és társai 1974, Sümegi 2003, Tápay és Szalai 1954, Durst 1962*). Ezekkel egyetértve ami biztos, hogy egy eróziós folyamat játszódik le. Az elméletek közötti különbség az, hogy mi az a hatás ami a talajszemcséket leválasztja az erodálódó felületről: a vízsebesség, a kilépési gradiens vagy a talajszemcse-víz felületén a csökkenő pórusvíznyomás miatt kialakuló húzás. Ez utóbbit a víznyomások két oldalról (a víz és a mentett oldalról) történő numerikus közelítése támasztja alá.

IRODALOM

Brandl H. (2010). Geosynthetics Applications for the Mitigation of Natural Disasters. Giroud Lecture. 9th International Conference on Geosynthetics (IGS), Guarujá/Sao Paulo – Brazil, Conf. Proceedings.

Casagrande A. (1936). Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills, Journal of Boston Society of Civil Engineers, 23, 257–276.

- Castro G. (1975). Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands, *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, 101, 6, 551–569.
- Chugaev R.R. (1971). Seepage Through Dams, *Advances in Hydrosience*, V. T. Chow, ed., Academic Press, New York, Vol. 7, pp. 283-325.
- Durst Z. szerk. (1962). Az árvízvédekezés gyakorlati ismeretei, Országos Vízügyi Főigazgatóság, Budapest.
- Fehér Á. (1971). A buzgáros talajtörés folyamatának vizsgálata. VITUKI kutatási jelentés, Kézirat.
- Fehér Á. (1972). A buzgárosodás vizsgálata a kialakulás határfelületeinek tisztázására. VITUKI kutatási jelentés, Kézirat.
- Fehér Á. (1973). Talajok buzgárosodási hajlamának vizsgálatai. A KGST VÁB VIII-2. téma 3.1. pont. VITUKI tanulmány, Kézirat.
- Fehér Á. (1983). Árvízvédelmi töltések és régi medrek keresztződéseinek sorolása veszélyességük alapján, állékonyság számítása EMG 666 számítógéppel. *Hidrologiai Közlemény*, 63. évf. 1. szám, pp. 24-27.
- Fehér Á., Szepessy J. (1977). Káros talajkihordás gátaból. Két buzgárveszélyes szelvény feltárása. Laboratóriumi vizsgálatok. A buzgárfejlődés mechanizmusának áramlástan vizsgálat. VITUKI kutatási jelentés, Kézirat.
- Fell R. and Fry J.J. (2007). *Editors Internal Erosion of Dams and their Foundations*, Taylor and Francis, London, ISBN: 978-0-415-43724-0.
- Fell R., MacGregor P., Stapledon D. and Bell G. (2005). *Geotechnical engineering of dams*, Balkema, Leiden, ISBN 041536440x.
- Foster M., Fell R. (2000). Use of event trees to estimate the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping, In *Proceedings of the 20th ICOLD 49. Congress on Large Dams*, Beijing, Vol. 1, Q76, R16, pp. 237-260, International Commission on Large Dams, Paris.
- Foster M., Fell R., Spannagle M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, No.5, National Research Council Canada, Ottawa, 1000-1024, ISSN: 0008-3674.
- Gál D. (1992). A Duna jobb parti töltésének szakadása, *Vízügyi Közlemények*, LXXIV. évf. 2. szám.
- Lampl H. (1959). Buzgárképződés és talajtörés, *Vízügyi Közlemények*, 41. évf. 1. szám. pp 25-49. ISSN 0042-7616.
- Mattsson H., Hellström J.G.I., Lundström T.S. (2008). On internal erosion in embankment dams, A literature survey of the phenomenon and the prospect to model it numerically, Research report Luleå University of Technology, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering Division of Mining and Geotechnical Engineering, Luleå University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Fluid Mechanics, 2008:14, ISSN: 1402-1528, ISRN: LTU-FR -- 08/14 – SE.
- Nagy L. (1999). Az 1998. novemberi Tivadari buzgár vizsgálata, *Hidrologiai Közlemény*, 79. évf., 4. szám, pp. 217-222.
- Nagy L. (2000). Az árvízvédelmi gátak geotechnikai problémái. *Vízügyi Közlemények*, LXXXII. évf., 1. füzet, pp. 121-146, ISSN 0042-7616.
- Nagy L. (2009). Árvízvédekezés a településeken, Innova-Print Kft. nyomda, ISBN 978-963-06-7458-4.
- Nagy L. (2014). Buzgárok az árvízvédelemben, OVF, Innova-Print Kft. nyomda, p. 242, ISBN 965 334 5474 7.
- Norstedt U. and Nilsson Å. (1997). Internal erosion and ageing in some of the Swedish earth and rockfill dams, *Proc. 19th Int. Congress on Large Dams*, Florence, Q73, R20, 307-319. International Commission on Large Dams, Paris.
- Polgár L, Sipos B., Szappanos Z. szerk. (1974). *Árvízvédekezési kézikönyv*, VÍZDOK, Budapest.
- Ravaska O. (1997). Piping susceptibility of glacial till. *Proc. 19th Int. Congress on Large Dams*, Florence, Q73, R30, 455-471, International Commission on Large Dams, Paris.
- Schmertmann J.H. (2000). The non-filter factor of safety against piping through sands, *ASCE Geotechnical Special Publication*, No. 111, Judgment and innovation, Edited by F. Silva and E. Kavazanjian, ASCE, Reston.
- Sellmeijer J.B., Lopez De La Cruz J., Van Beek V.M. and Knoeff J.G. (2012). Fine tuning of the backward erosion piping model through small scale, medium scale and IJKdijk experiments, Accepted for publication in *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- Skoglund M. and Solvik Ø. (1995). External and internal erosion in rockfill dams, *International Journal on Hydropower and Dams*, 2(3), pp. 44-47.
- Smolczyk U. ed. (2002). *Geotechnical Engineering Handbook*. ISBN-13: 978-3433014493, ISBN-10: 3433014493, p. 787, Ernst & Sohn.
- Sümegei M. (2003). Emlékezés az 1954. és az 1965. év dunai árvizeire, *Hidrologiai közlemény*, 83. évf. 1. szám, január-február.
- Szepessy J. (1983). Szemcsés és kötött talajok járatos eróziója, illetve megfolyósodása árvízvédelmi gátakban. A veszély mértéke, csökkentése. *Hidrologiai Közlemény* 63. évf. 1. szám, pp. 11-20.
- Szepessy J., Fehér Á. (1981). Árvízvédelmi létesítmények védőképességének fokozása, *Kutatás záró jelentése*, VITUKI kutatási jelentés, Kézirat.
- Szepessy J., Fehér Á. (1981). Hidraulikus meghibásodási jelenségek vizsgálata, *Javaslatok a fejlesztésre*. VITUKI kutatási jelentés, Kézirat.
- Tápay L., Szalai M. (1954). *Árvízvédelmi kézikönyv*, Budapest.
- Terzaghi K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, ISBN 0-471-85305-4.
- Townsend F.C., Bloomquist D., Shiau J-M., Martinez R. and Rubin H. (1988). Evaluation of Filter Criteria and Thickness for Migrating Piping in Sands, Department of Civil Engineering, University of Florida, Report for U.S. Bureau of Reclamation.

Van Beek V.M., Bezuijen A., Zwanenburg C. (2010a). Piping: Centrifuge experiments on scaling effects and levee stability, *Physical Modelling in Geotechnics*, Zürich, Taylor and Francis Group.

Van Beek V.M., Knoeff J.G., Rietdijk J., Sellmeijer J.B., Lopez De La Cruz J. (2010b). Influence of sand and scale on the piping process - experiments and multivariate analysis, *Physical Modelling in Geotechnics*, Zürich, Taylor and Francis Group.

Van Beek V.M., Knoeff J.G., Sellmeijer J. B. (2012). Observations on the process of piping by under-seepage in cohesionless soils in small, medium and full-scale experiments, Accepted for publication in *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.

Von Thun J.L. (1996). Understanding seepage and piping failures – the No. 1 dam safety problem in the west, In *Proceedings of the Association of Dam Safety Officials*

(ASDSO) Western Regional Conference, Lake Tahoe, Nevada, pp. 3-21.

Wan C.F., Fell R. (2004). Experimental investigation of internal instability of soils in embankment dams and their foundations, UNICIV Report No. 429, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, ISBN 85841 396 5.

Wan C.F., Fell R. (2007). Investigation of internal erosion by the process of suffusion in embankment dams and their foundations, In *Internal Erosion of Dams and their Foundations*, Editors R. Fell and J.-J. Fry, Taylor and Francis, London, pp. 219-234.

Wan C.F., Fell R. (2008). Assessing the Potential of Internal erosion and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations, *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, ASCE, Vol. 134, No. 3, pp. 410-407.

A SZERZŐ



NAGY LÁSZLÓ 1956-ban született Nyíregyházán, iskoláit Debrecenben végezte. Első diplomáját 1980-ban szerezte a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karán. Ugyanott 1984-ben szakmérnöki államvizsgát tett. Munkahelyei a vízügyi szakterülethez kapcsolódtak: Vízügyi Tervező Vállalat, Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Központ, Árvízvédelmi és Belvízvédelmi Központi Szervezet, Országos Vízügyi Főigazgatóság. 2003 óta a Műegyetemen oktat, kutat. 2006-ban megvédte PhD disszertációját, kilenc évvel később habilitált. 2015-ben a geotechnika és az árvízvédelem határterületén végzett munkásságáért a Magyar Köztársaság Érdemrend Lovagkereszt kitüntetését kapta. A Magyar Hidrológiai Társaság tagja. 2016 májusától a Hidrológiai Közlöny egyik szakszerkesztője.

Mesterséges neurális háló alkalmazása expedíciós lebegtetett hordalék mérési adatokra

Rátky István

nyugalmazott egyetemi docens, (E-mail: iratky@gmail.com)

Kivonat

A tanulmányunkkal az elődleges célunk múltbeli expedíciós lebegtetett hordalékszálítási méréseket felhasználó, a hordalékszálítást előrejelezni képes módszer kidolgozása; annak vizsgálása, hogy a neurális hálózati számítástechnikai módszer alkalmazható-e a cél eléréséhez, ritka mérési adatokra alapozva. A mesterséges neurális hálót olyan jelenségek modellezésére alkalmazzák, ahol nem ismertek vagy nem állnak rendelkezésre a jelenséget befolyásoló leglényegesebb tényezők és a figyelembe vettek közötti kapcsolatok törvényszerűségei sem ismertek elfogadható pontossággal. Ugyanakkor a jelenségről, annak fontosabb jellemzőiről nagymennyiségű mérés áll rendelkezésre. A folyami lebegtetett hordalékszálítás kifejezetten egy ilyen jelenség. A Duna dunajvárosi szelvényében 1950-2008. években végzett geometriai, hidraulikai és lebegtetett hordalékszálítási jellemzők expedíciós méréseit vizsgáltuk. A neurális hálót alkalmazó számítások eredményeinek minőségét, pontosságát más modellek, így: *van Rijn*, és egy dimenzióelemzés segítségével származtatott, valamint $Q_t(Q)$ szimptomatikus kapcsolaton alapuló módszer eredményeivel hasonlítottuk össze. Vizsgálataink megmutatták (1. ábra), hogy a dunajvárosi szelvényben a lebegtetett hordalékhozam időben csökkenő tendenciát mutat. Leglényegesebb megállapításaink, hogy ritka, expedíciós, múltbeli méréseken alapuló mesterséges neurális hálót alkalmazó (függvény közelítő, leképző) modell a tényleges, pillanatnyi lebegtetett hordalékszálítás numerikus előrejelzésére nem ajánlható. Hasonlóan *van Rijn* módszere – az általa ajánlott kritikus *Shields*-paramétert felhasználva – a dunajvárosi szelvényben általában előforduló lebegtetett hordalék szemeloszlás esetén nem alkalmazható. A pontosság, az eredmények szórása, az adatok beszerezhetősége, azok pontossága, mérésük nehézsége, költsége, valamint a számítási módszer egyszerűsége alapján a teljes vízhozam tartományt két darab $G_t(Q)$ függvénykapcsolattal közelítő számítás jelenleg a legelőnyösebb, a nem egyensúlyi lebegtetett hordalékszálítás meghatározására, előrejelzésére (5. ábra, 5. és 6. táblázat). Ugyanakkor a számítások újból bebizonyították, hogy ma még a lebegtetett hordalékszálítás meghatározásánál a 2-3 szoros pontatlanságokat is kénytelenek vagyunk elfogadni (esetleg „jónak” mondani).

Kulcsszavak

Duna, Dunajváros, lebegtetett hordalékszálítás, mesterséges neurális háló, hordalék-vízhozam kapcsolat, dimenzióanalízis.

Application of an artificial neural network to expeditionary suspended sediment measurement data

Abstract

With this study, our primary goal is to develop a method for predicting sediment transport using past expeditionary suspended sediment transport measurements; to investigate whether neural network computing can be used to achieve the goal, based on sparse measurement data. The artificial neural network is used to model phenomena where the most important factors influencing the phenomenon are not known or available, and the regularities of the relationships taken into account are not known with acceptable accuracy. At the same time, a large number of measurements are available on the phenomenon and its important features. River suspended sediment transport is specifically such a phenomenon. Expeditionary measurements of the geometric, hydraulic and suspended sediment transport characteristics of the Danube River at Dunajváros in the years 1950-2008 were investigated. The quality and accuracy of neural network calculations have been compared with those of other models such as *van Rijn* and derived from a dimension analysis and based on $Q_t(Q)$ symptomatic relationship. Our investigations showed (Figure 1) that the suspended sediment yield in the Dunajváros section shows a decreasing tendency over time. Our most important finding is that a model using a rare, expeditionary, artificial neural network (function approximation, mapping) based on past measurements is not recommended for the numerical prediction of the actual suspended sediment transport. Similarly, *Rijn's* method, using its recommended critical *Shields* parameter, is not applicable to the suspended sediment distribution commonly found in the Danube city section. Based on accuracy, standard deviation of results, data availability, accuracy, difficulty of measurement, cost and simplicity of the calculation method, approximation of the total discharge range with two $G_t(Q)$ function relationships is currently the most advantageous for determining and forecasting unbalanced suspended sediment transport. (Figure 5, Tables 5 and 6). However, the calculations have again proved that even today, when determining the suspended sediment transport, we are forced to accept 2-3 times inaccuracies (perhaps to say "good").

Keywords

Duna, Dunajváros, suspended sediment transport, artificial neural network, sediment-discharge relationship, dimensional analysis.

BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

A mesterséges neurális háló (ANN) alkalmazása több tudományterületen jól bevált így például: karakterfelismerésnél, képfeldolgozásnál, jelfeldolgozásnál, adatbányászatnál, bioinformatikai problémáknál, mérés-technikai és szabályozástechnikai feladatoknál. Elsősorban olyan körülmények, jelenségek vizsgálatánál lehet hasznos, amelyeknél nagymennyiségű mérés (adat) áll rendelkezésünkre, de az adatok közötti pontos törvényszerűségeket nem

ismerjük. A kilencvenes évek eleje óta a mesterséges neurális hálót sikeresen alkalmazzák a hidrológiai területeken is pl. csapadék-előrejelzésnél, csapadék-lefolyás modellezésnél, vízhozam-, talajvíz-, vízminőség modellezéseknél, víztározók hidrológiai méretezésénél, általában a hidrológiai idősorok elemzésénél, előrejelzéseknél. A 2000. évig megjelent irodalmakról nagyon jó, áttekintő összefoglalást találunk a mesterséges neurális hálók hidrológiában való alkalmazásáról, az ASCE munkacsoport által „Artificial

Neural Networks In Hydrology I: Preliminary Concepts és II: Hydrologic Applications” címen megjelent tanulmányokban (ASCE Task Committee 2000a, 2000b). Jelen tanulmányunk szűkebb témájához tartozó irodalmak a 2000-es évek óta szaporodtak meg. Nemzetközi folyóiratokban igen sok tanulmányt lehet találni csatornáknban, vízfolyásokban szállított napi lebegtetett hordalék koncentráció, hozam előrejelzésére (extrapolálására), becslésére. Ezekből csak néhányat megemlítve: Kisi 2005, Tayfur és Guldal 2006, Cigizoglu és Kisi 2006, Nourani 2009, Melesse és társai 2011, Ebtehaj és Bonakdari 2013. Az általunk részletesebben vizsgált tanulmányok mindegyike alapjaiban a mesterséges neurális hálót alkalmazta kisebb nagyobb eltérésekkel. Mindegyik a többrétegű perceptron (MLP) előrecsatolt (feed-forward), hiba visszarámoltatásos (error back-propagation, FFBP) változatát, de különböző aktivációs függvényekkel és rejtett réteg-számmal. A rétegekben a cellák számát próbálgatással határozták meg. A legnagyobb változatosság az eredmények különböző módszerekkel való összehasonlításában, valamint a mért és a tesztek során számított eredmények illeszkedés vizsgálatában volt. Több módszert alkalmaztak: átlagos négyzetes hibát (mean squares of error, RMSE), abszolút százalékos hiba elemzést (mean absolute percent error, MAPE), a hiba szórásnégyzetét (error variance σ^2), autoregresszív modellt (autoregressive models, AR(i)), autoregresszív integrált mozgó átlag modellt (autoregressive integrated moving average, ARIMA), variancia analízist (analysis of variance, ANOVA), t-próbát, multilinear és nemlineáris regressziós kapcsolatokat (multilinear and nonlinear regression relations, MLR and MNL), hordalékhozam-vízhozam korrelációs kapcsolatot (Sediment Rating Curve, SRC).

Az irodalomban található publikációk eredménye nem csak az alkalmazott módszertől (most az ANN-től), de a felhasznált, kiindulási adatoktól is függött. Ebben a tekintetben lényeges különbség van az említett publikációk és a tanulmányban használni kívánt adatok között. Az említett irodalmak folyamatos, napi átlagos hidrológiai adatokat: csapadék (P), vízhozam (Q), lebegtetett hordalék koncentráció (C) vagy hordalékhozam (S) méréseket használtak számításaikhoz. Az ANN modell bemeneti (input) adatait az aktuális napi (alsó index t) és az előző nap ($t-1$) vagy az azt megelőző napok ($t-2, \dots$) mért adatai adták, így $P_t, P_{t-1}, P_{t-2}, \dots$ és/vagy $Q_t, Q_{t-1}, Q_{t-2}, \dots$, és C_{t-1}, C_{t-2}, \dots , vagy S_{t-1}, S_{t-2}, \dots . Természetesen C_t vagy S_t nem lehetett input adat, minden változatnál ez volt a cél, a kimenet (az output). Azt vizsgálták, hogy milyen hidrológiai adatok és ezekből hány előző napi adatot inputként megadva (t ; vagy t, t_1 ; vagy t, t_1, t_2 ; vagy t, t_1, t_2, t_3, \dots), adja legjobb eredményt.

Számunkra nem állt rendelkezésre folyamatos napi mérésorozat. Ezért azt a célt tűztük ki, hogy ritka, múltbeli, expedíciós lebegtetett hordalék-mérések és az ugyanakkor meghatározott hidraulikai, geometriai adatok közötti kapcsolatot vizsgáljuk mesterséges neurális háló alkalmazásával. A mesterséges neurális háló alkalmazásának lehetőségeit, esetleges előnyeit más módszerek adta eredményekkel kívánjuk összehasonlítani, hiszen ez dönti el, hogy érdemes-e alkalmazni ezt a számítási módszert.

Tudva azt, hogy ma még hazánkban gyakorlatilag csak ilyen mérések állnak rendelkezésre, igen hasznos lenne, ha a meglévő expedíciós mérések alapján ANN-el végzett számítások (becslések) jobb eredményt adnának, mint más – ebben a tanulmányban bemutatott – ismert módszerek.

Még egy lényeges eltérés van a fent ismertetett és jelen tanulmány között. A fentiek az idősorok felhasználásával csak egy napra előre kívánták megbecsülni a lebegtetett hordalék mennyiséget. A tanulmányok címében becslés („estimation”, „estimating”), előrejelzés („forecasting”, „prediction”) kifejezések szerepeltek, de helyesebb lett volna extrapolálást írni. Bár szigorúan véve ez is becslés, előrejelzés, még akkor is, ha csak egy napra előre történik. Ugyanakkor a hazai vízügyi szakmában – különösen nyíltfelszínű folyókkal kapcsolatban – az előrejelzés kifejezést általában több napra előre számító (becsülő) eljárásoknál használják. A tanulmányokban bemutatott módszer, a már kiépített mérési állomásokon, a napi mérési események kimaradása esetén az adatpótlásra, vagy költségcsökkentés céljából tervezett mérésritkítások esetén lehet hasznos. A jelen tanulmányban azt is célként tűztük ki, hogy megvizsgáljuk az expedíciós mérésekre alapozott ANN modellel lehet-e több napra előrejelzést adni, más módszerekhez viszonyítva elfogadhatóbb, nagyobb pontossággal.

A rendelkezésre álló adatok és abból következő célok közötti különbségek miatt döntöttünk úgy, hogy az irodalomban található módszereket, és az azok alapján kapott eredményeket, általánosítható következtetéseket – a fentiekén túl – részletesebben itt nem elemezzük.

ADAT-ELŐKÉSZÍTÉS

Rendelkezésünkre álltak a *dunaújvárosi szelvényre* (Duna 1580,6 fkm) 1950-2008. években végzett vízhozam és lebegtetett hordalékhozam mérések. A 288 db mérésnél különböző jellemzőket határoztak meg, 267 db mérésnél megadták az összetartozó:

- középvízállást a főmederben, H_a , (cm),
- a vízhozamot, Q , (m^3/s),
- a lebegtetett hordalékhozamot, G_t , (g/s),
- a lebegtetett hordalék közepes töménységét, C_k , (g/m^3) és
- az átlagos szemátmérőt, d_g , (mm), (3 mérés kivételével).

Az 1985-2008. években 138 db mérésnél a vízhozam mellett

- a szelvény közepsebességet, v , (m/s) is meghatározták.

2002-2008. évek 58 db mérésénél:

- a nedvesített területet, A , (m^2),
- a középmedlységet, H , (m) és
- a víztükör-szélességet, B , (m) is megadták.

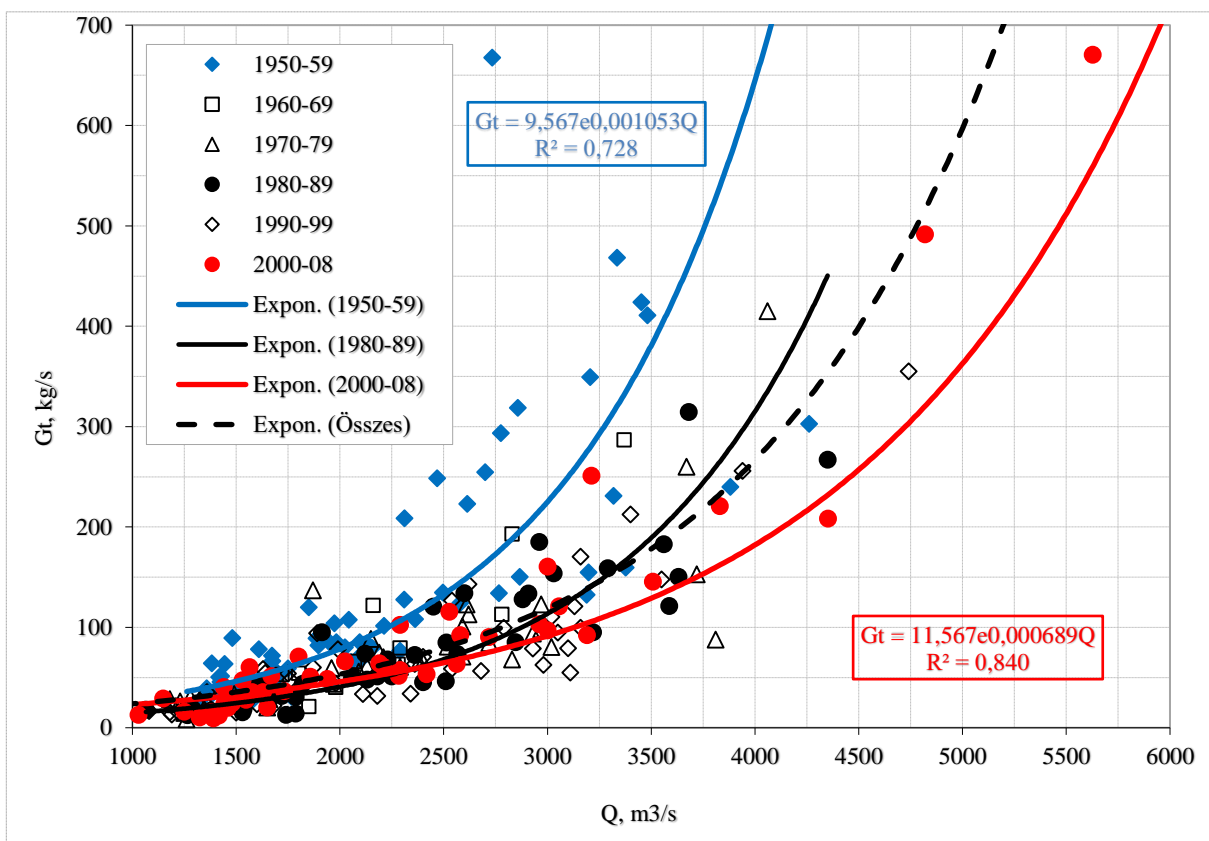
A 2002-2006. években 42 esetben csak a H_a , A , B , v és Q jellemzőket határozták meg, 19 esetben a lebegtetett hordalékhozamot nem mérték.

Természetesen az 58 évet átölelő mérésorozat a módszer és az összetartozó jellemzők tekintetében nem homogén. Ugyanakkor elegendő számú egy-időben mért jellemzőt adott ahhoz, hogy statisztikai módszerrel elemezhesük őket. Meghatároztuk 58 db összetartozó adatpárból a

mederalakra jellemző $A=f(H_a)$ vagy $B=f(H_a)$ függvénykapcsolatokat, melyek alapján a 2002. előtti évek hiányzó nedvesített szelvényterület és víztükörszélesség adatait becsültük meg. A hiányzó H értékeket $H=A/B$ alapján számítottuk. A pontthalmazokra szorosan illeszkedő regressziós függvények ($R^2_A=0,997$ ill. $R^2_B=0,900$) alapján feltételezzük, hogy a további számításokhoz elfogadható pontosságú A , és B értékeket kaptunk. Hasonlóan származtattuk a 138 db ismert adatpárra illesztett $v=f(Q)$ függvény ($R^2_v=0,971$) segítségével a hiányzó szelvény középsebesség értékeket. Kihagyva a hordalékhozammal és az átlagos szemátmérővel nem rendelkező méréseket összesen 264 db olyan adatsorral rendelkezünk, melyekben mért vagy a fenti módszerekkel meghatározott: H_a , Q , G_r , C_k , d_g , A , H , v és B jellemzők voltak. Ha a d_g hiányt nem vettük figyelembe, akkor 267 db összetartozó adatsorunk volt.

Az összetartozó 267 db $Q-G_r$ adatpárra illesztett $G_r=f(Q)$ regressziós függvényt az 1. ábrán adtuk meg ('Expon. (Összes)' jelű). A kisvízes tartományokban a mérési pontok és a dekádonkénti illesztő vonalak jobb láthatósága érdekében, az ábrán nem a teljes észlelési tartományt mutatjuk be, de a függvénykapcsolat illesztéséhez minden pontot figyelembe vettünk. Látható, hogy a pontok nagyon szóródnak, ami nem meglepő, az irodalomban hasonló (vagy még gyengébben illeszkedő) mé-

réseket találunk (pl. *Negentróp 2011*, *Sziebert 2015*, *Pomázi 2017*). Tudjuk, hogy 1950. óta változott a mintavétel módja és a mintából meghatározott G_r származtatásának módszere. Az 1. ábrán a $Q-G_r$ függvénykapcsolat évtizedenkénti változása is látható. Az áttekinthetőség érdekében csak három évtizedre mutatjuk be a kiegyenlítő trendvonalakat. Az egyes dekádok mért pontjaira az összehasonlítás érdekében mindig azonos, exponenciális függvénykapcsolatot illesztettünk. (Még akkor is, ha az adott pontthalmazra nem a legjobb R^2 determinációs együtthatót jelentett.) A görbék egyértelműen bizonyítják azt az ismert tényt, hogy időben csökkenő tendenciát mutat a szállított lebegtetett hordalékhozam. Az általános tendenciától eltérő, fordított tendencia csak 1970-1979. és 1980-89. években a nagyobb vízhozam tartományokban fordult elő. A 2000. évek mért lebegtetett hordalékhozamát viszonyítva az 1950-es évekéhez, $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ -nál $\sim 33\%$ -al, $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ -nál $\sim 50\%$ -al csökkent a G_r , (hatványfüggvénykapcsolatokból számítva). Ekkora változást nem lehet a mérési pontatlanság vagy a módszer változásának számlájára írni. Az 1. ábrán nem hosszabbítottuk meg az 1980-89. évtized trendvonalát, ezzel is mutatva, hogy az adott évtizedben mekkora legnagyobb vízhozamnál mértek hordalékhozamot, az afölötti Q előfordulása esetén már nem csak kiegyenlítő, de extrapolált G_r -t lehetne csak becsülni.



1. ábra. Dunaiújvárosnál mért lebegtetett hordalékhozam és vízhozam kapcsolata (1950-2008)
Figure 1. Relationship between suspended sediment and water discharge at Dunaiújváros (1950-2008)

Tekintettel a tendenciára, ha előrejelzésre szeretnénk használni a regressziós függvényeket, nem ésszerű figyelembe venni a több évtizeddel előbbi morfológiai állapot által befolyásolt, (valószínűleg módszertanban is külön-

böző) méréseket. A 2. ábrán bemutatjuk az 1970-2008. évek és külön csak a 2000-2008. évek mért pontpárjaira illesztett regressziós függvényeket, (a legjobb illeszkedést adó hatványfüggvényt). Eddig minden elemzéshez a nyers

adatokat használtuk, nem vizsgáltuk az esetleges mérési hibára utaló kiugró értékeket. Statisztikai módszerrel biztosan ki lehetne hagyni néhány, a szemlélet alapján kiugrónak ítélt mérést, de az egyáltalán nem biztos, hogy ezek mérési hibából származnak. A leíró statisztikai módszerek jogos 'igénye', hogy a statisztikai függvények (néha csak egy-két paraméter) valóban a teljes adathalmazt jellemezzék, a hibás adatok a becsléseket eltorzíthatják, de a ritkán előforduló kiugró értékek a valódi adathalmaz részei is lehetnek. A Dunán előfordulhat olyan hidraulikai körülmény, amikor extrém nagy a szállított lebegtetett hordalék, pl. valahol a mérési szelvény felett 'felszakadt' a főmederi vagy hullámtéri leülepedett anyag. Ne felejtsük, G_t nem hordalékhozam-kapacitás, hanem a körülmények által determinált pillanatnyi hordalékhozam. A legkorábbi 1970. év választása nem alapszik különösebb statisztikai vizsgálaton, a 1. ábra kiegyenlítő függvényei alapján úgy véljük időben érdekes eddig 'visszanyúlni' (1970-2008. évek között 179 db, míg 2000-2008. között már csak 48 db mérés volt). Ezt követően csak az 1970-2008. évek mért (ill. származtatott) adataival foglalkozunk.

2011-ben a Dunaföldvár és Mohács közötti Duna-szakaszra fókuszálva részletes vizsgálatokat végeztünk a lebegtetett és görgetett potenciális (egyensúlyi) hordalékszallító-képességre vonatkozóan (Rátky 2011). A számtalan ismert hordalékszallítást (hozamot, vagy töménységet) számító összefüggés közül 5 db (Ackers-White, Engelund-Hansen, Laursen-Copeland, Toffaleti és Yang-féle) transzport egyenletre érzékenységvizsgálatot végeztünk. Megállapítottuk, hogy nem meglepőek a kétszeresnél nagyobb eltérések. A 2011. évben nem vizsgáltuk a – itt később vizsgált – van Rijn (1984a, b) által ajánlott módszert.

Itt szokott következni egy nagyon rövid leírás a neurális háló (vagy hálózatok) úgynevezett 'lényegét' hivatva bemutatni, ami a lényeg esetében is több oldalt tenne ki. Egy ilyen ismertető feltehetőleg annak mondana valamit, aki már amúgy is ismeri a neurális háló számítási módszerek valódi lényegét. Mégis megpróbáljuk összefoglalni egy bekezdésben a 'lényeg-lényegét', hogy egy – a programot, a módszert nem ismerő olvasónak legyen valami elképzelése, arról, hogy mi történik a fekete dobozban. Természetesen ez a leírás – egy mérnöki szemléletű felhasználónak – nem adja meg az alkalmazhatóság szempontjából a lényeges információkat.

Ismert $x(n) = (x_1(n), x_2(n), \dots, x_m(n))$ n számú mérés mindegyikénél m számú mért paramétert érték és egy célérték $d(n)$ a kiindulási adat. A modell egy méréshez tartozó mindegyik paramétert megszorozza egy $w(n)$ súlyozó-értékkel, majd az így kapott értéket összegezi. Az összeghez hozzáadva még egy torzítást ($b(n)$, bias, elfogultságot) reprezentáló skalármennyiséget, előáll egy

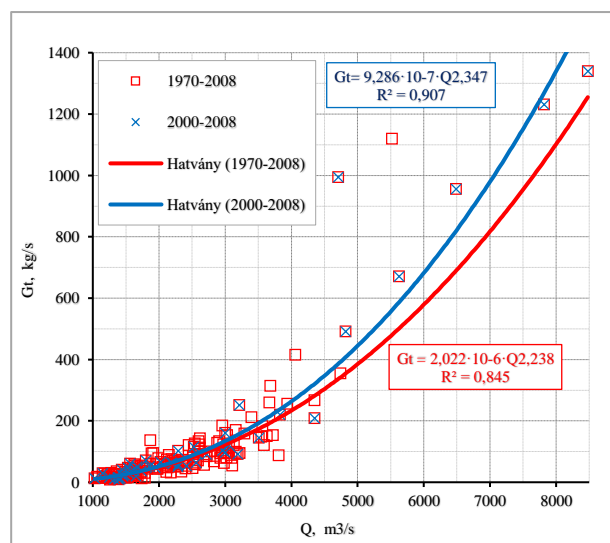
$$v(n) = b(n) + \sum_{i=1}^m w_i(n)x_i(n)$$

érték. Az $v(n)$ összegzett értéket alakítja át (képezi le), egy alkalmas aktivációs (vagy transzfer, $\varphi(\cdot)$) függvény segítségével. A nemlineáris aktivációs függvény általában küszöbfüggvény, leggyakrabban monoton növekvő, jobbról folytonos, határértéke a $-\infty$ -ben 0, a $+\infty$ -ben pedig 1 (pl. logisztikus, szigmoid függvény). Esetünkben egy modellfuttatás két fázisból állt egy tanulási és egy validálási (megbízhatóság ellenőrzése) fázis. A program a tanulási fázisában a leképzésnél kapott $y(n) = \varphi(v(n))$ kimeneti értéket hasonlítja a mért értékhez. A tanulás alatt addig ismétli a számítást különböző súly- és bias- értékekkel, míg a választott hibafüggvény minimális nem lesz. Az általunk választott Levenberg-Marquardt-módszernél (ez a default), a közelítő függvényt akkor fogadja el, ha a validálásra felhasznált adathalmaznál a számított $y(n)$ output és a cél $d(n)$ érték eltéréseinek négyzetösszege (MSE) minimális, vagy az újabb iterációnál már tovább nem csökkenő tendenciát mutatott.

A rendelkezésre álló 179 méréssorozatnál a lebegtetett hordalék „közep töménysége” (C_k , g/m³) vagy a hordalék hozama (q_s , m³/sm; G_t , kg/s) volt az output és a többi mért adat együtt vagy különböző csoportosításban az input. A neurális háló felépítésénél és a számításnál a MATLAB R2018a (MATrix LABoratory) programcsomagot használtuk. A „Neural Network Fitting” alkalmazással állítottuk össze a struktúrát. A tanítás folyamán az input adathalmazra legjobban illeszkedő outputot 10 db neuront tartalmazó 1 db rejtett (hidden) réteggel tudtuk elérni.

MESTERSÉGES NEURÁLIS HÁLÓ ALKALMAZÁSA

A mesterséges neurális háló alkalmazhatóságára utaló leglényegesebb jelek: a rendelkezésre álló nagy mennyiségű mérés (adat) és az adatok közötti 'pontos' törvényszerűség ismeretének hiánya. Dunaújvárosnál a lebegtetett hordalékkal kapcsolatban mindkét feltétel fent áll. „Egy neurális hálózatot érdemes úgy felfogni, hogy nem kívánja a jelenséget modellezni, arra törvényszerűségeket megállapítani (legalábbis a hagyományos természettudományos, matematikai értelemben nem). Hanem a jelenséget fekete dobozként kezeli, csak a bemenő (input) és a kimenő (output) adatokat tekinti.” (Kiemelés a szerzőtől.) Így foglalja össze röviden Fazekas (2018) a neurális hálózatok lényegét.



2. ábra. Dunaújvárosnál mért lebegtetett hordalékhozam és vízhozam kapcsolata (1970-2008)

Figure 2. Relationship between suspended sediment and water discharge at Dunaújváros (1970-2008)

Inputként többféle kombinációt kipróbáltunk: csak egy paramétert adva pl. H_a -t vagy v -t vagy H vagy A -t; két paramétert pl. H_a+v -t; az egy mérési alkalomnál ismert összes paramétert $H_a+v+Q+H+A+B$ -t egyszerre adva inputnak. Ezeknél a változatoknál is a számított output C_k (g/m³) vagy G_t , (kg/s) volt. Célunk a tanulás folyamata során (pontosabban 'validation'-ben) a legjobb illeszkedést mutató input-output adat-kombináció kiválasztása és előrejelzésre való alkalmazása. Összehasonlításunk alapjai egy-egy változatnál a számított 179 db, $e = C_{k,szám} - C_{k,mért}$

eltérés és $r = C_{k,szám} / C_{k,mért}$ relatív értékek statisztikai mutatói voltak. A legjobb illeszkedést a 6 paraméteres változat mutatta. Mivel a tanításra és a validálásra felhasznált méréseket a modellt véletlen generálással választja ki (95% tanulásra, 5% validálásra és 0% tesztre), minden újbóli számítással kissé eltérő eredményt kaptunk. Példaként az 1. táblázatban bemutatjuk a $C_k(H_a, v, Q, H, A, B)$ változatra egymásután háromszor végzett számításainak e és r értékeit.

1. táblázat. Számított paraméterek, $C_k(H_a, v, Q, H, A, B)$ kapcsolatra alkalmazva a neurális hálót

Table 1. Calculated parameters using $C_k(H_a, v, Q, H, A, B)$ for neural network

	C_k , g/m ³	1.e g/m ³	2.e g/m ³	3.e g/m ³	1. r	2. r	3. r
maximum	217	29,2	40,6	52,7	3,33	3,29	3,11
minimum	6,60	-43,6	-95,3	48,4	0,40	-2,29	0,36
átlag	34,7	0,002	1,35	-0,443	1,11	0,98	1,10
szórás	30,7	9,64	20,2	12,8	0,42	0,84	0,41
átlagos eltérés	18,1	7,03	15,8	8,87	0,29	0,64	0,30

A 2. táblázat tanulsága alapján a $G_t(H_a, v, Q, H, A, B)$ változatra egymásután háromszor végzett számításra az előzőekhez hasonló szóródó ('pontatlan') eredményeket kaptunk: $e = G_{t,szám} - G_{t,mért}$ és $r = G_{t,szám} / G_{t,mért}$.

2. táblázat. Számított paraméterek, $G_t(H_a, v, Q, H, A, B)$ kapcsolatra alkalmazva a neurális hálót

Table 2. Calculated parameters using $G_t(H_a, v, Q, H, A, B)$ for neural network

	G_t kg/s	1.e kg/s	2.e kg/s	3.e kg/s	1. r	2. r	3. r
maximum	1 340	167	80,0	81,7	3,78	3,61	4,91
minimum	8,32	-230	-80,6	-143	0,42	-0,51	-1,88
átlag	110	1,97	0,451	2,94	1,24	1,13	1,22
szórás	195	41,0	22,5	35,5	0,51	0,47	0,77
átlagos eltérés	94,7	24,5	15,8	25,9	0,37	0,31	0,48

A táblázatok tanulsága szerint a nagyon eltérő r eloszlások mellett meglepő, hogy negatív r értékeket is kaptunk, ami azt jelenti, hogy a számított C_k , vagy G_t negatív, ami a természetben lehetetlen (ez nem azt jelenti, hogy hordalék-szállítás helyett hordalék-lerakás történik!), ez a 'statisztikai jellegű' számítási módszer eredményeinek szóródása, hibája. A teljes tartományt résztartományokra osztva és e résztartományokra külön-külön 'tanítva' a modellt, ez a probléma kiküszöbölhető. Tartomány-függő neurális hálót (Range-dependent neural network, RDNN) alkalmazó módszert mutat be Cigizoglu és Kisi (2006) tanulmánya. Mi most ezt nem tettük meg, azért mert, mint az később látni fogjuk – negatív értéket elméletileg sem adó – más módszerek, az ismételt számítástól függetlenül mindig legalább olyan jó, sokszor jobb illeszkedést mutató paramétereket adnak.

Tehát ez eredmények alapján – a később ismertetett más módszerek eredményével való összehasonlítástól függetlenül – ki lehet jelteni, hogy ritka, expedíciós, múltbeli méréseken tanuló mesterséges neurális hálót alkalmazó (függvény közelítő, leképző) modell a tényleges, pillanatnyi lebegtetett hordalékszállítás numerikus előrejelzésére nem ajánlható. Részletesen megvizsgálva a $C_{k,szám}$ és a $G_{t,szám}$ negatív értékei mindig olyan észleléseknél fordult elő, ahol a $C_{k,mért}$ és a $G_{t,mért}$ is kicsi volt. Persze ez a

tény nem változtat azon, hogy ezek a számítások hibásak és ha előrejelzést készítenénk, értékelhetetlen eredményt kapnánk.

VAN RIJN ÁLTAL AJÁNLOTT MÓDSZER ALKALMAZÁSA

A dunai városi 179 db helyszíni mérésből rendelkezésre állt a van Rijn (1984b) egységnyi szélességre vonatkoztatott lebegtetett hordalékhozam (q_s , m³/sm, $q_s = G_t / (B \cdot 1000 \rho_s)$) számításához szükséges geometriai és hidraulikai jellemzők többsége. A hiányzó (nem mért) jellemzőket a következő értékekkel vettük figyelembe: kinematikai viszkozitási együttható, $\nu = 1,1 \cdot 10^{-6}$ m²/s; a folyadék sűrűsége, $\rho_w = 1000$ kg/m³; a hordalékszám sűrűsége, $\rho_s = 2650$ kg/m³; Kármán-féle konstans, $\kappa = 0,4$; $k_s \approx n_k d$, a Niquardse-féle egyenértékű érdesség-magasság. Hordalékmozgás szempontjából van Rijn vizsgált különböző szerzők által ajánlott érdesség-magasságokat, mozgó, alluvialis, sík mederfenék esetén, (a fenékalakzatok ellenállását figyelmen kívül hagyva) $k_s \approx (1-10) d_{90}$ (m) közötti értékeket talált (van Rijn 1982, 1984c). Mi a szemcse-függő (related to grains) érdesség-magassághoz $k_s \approx 6 \cdot d_g$ (m) értékeket vettünk fel, a totál (overall) Chézy-együtthatót $k_s \approx 0,1$ m értékkel számítottuk. A 179 db mért (és részben származtatott) adatsorra (Q, v, H, B, d_g, q_s) elvégezve a számítást, azt a meglepő eredményt kaptuk, hogy a van Rijn módszerével számított fajlagos hordalékhozam mindig lényegesen több, mint a mért érték. A számított és mért hozamértékek aránya ($r = q_{s,szám} / q_{s,mért}$) $r_{át} = 8,5$. Átlagosan is közel egy nagyságrenddel nagyobb a számított érték. De maximálisan 23,6-szor nagyobb és a legkisebb érték is kétszer akkora, mint a mért ($r_{min} = 2,1$; $r_{max} = 23,6$). A geometriai, hidraulikai paraméterek által meghatározott lebegtetett hordalékhozam (q_s , m³/sm) elméletileg az egyensúlyi hozamot, a hordalékszállítás-képességet adja, ennél többet nem tud lebegésben tartani, vagy hosszabb ideig szállítani a Duna. Tehát az nem meglepő, hogy a geometriai, hidraulikai paraméterekből számított q_s általában nagyobb, mint az aktuálisan éppen szállított mennyiség, de ekkora eltérés meglepő. (Leülepedési fázisban lehet rövid ideig 'túltelt' állapot.)

A fentiek alapján egyértelmű, a van Rijn (1984b) eredeti módszere nem alkalmazható a dunai városi a pillanatnyi lebegtetett hordalékszállítás becsléséhez. (Az extrém nagy eltérések miatt e módszer eredményeit a később bemutatásra kerülő módszerek eredményeivel nem hasonlítjuk össze.)

van Rijn a módszerét finom- és közepes méretű homok 0,1-0,5 mm-es tartományára ajánlotta, Dunai városnál a mért hordalék átlagos szemátmérő tartománya $d_g = 0,031-0,118$ mm volt; $d_{g,át} = 0,053$ mm, az alsó határ fele. Ez alapján nem meglepő, hogy van eltérés, bár ekkora eltérésre nem számítottunk. Ha elfogadjuk a módszer származtatásának logikáját – ami, hidraulikai megfontolásokon, laboratóriumi és természetbeni méréseken alapult (van Rijn 1984b) – úgy gondoljuk, kiterjeszthetjük az érvényességi határt a szemátmérő nagyságára legérzékenyebb változó, a dimenziómentes kritikus fenék-csúsztatófeszültség (θ_{cr} , kritikus Shields-paraméter) változtatásával. Már van Rijn is felhívta a figyelmet a turbulencia által erősen befolyásolt kis szemek tartományában a közelítése bizonytalanságára

(van Rijn 1984b). Mások a kritikus Shields-paraméter alulbecsléséről írnak (Cao és társai 2006), vagy megemlítik, hogy a Shields-diagram nincs hitelesítve kis szemátmérők tartományában (Guo 2014). Korábban egy tanulmányunkban mi is foglalkoztunk ezzel (Rátky 2016), ennek a tanulmánynak az 1. ábráján láthattuk, hogy $d < 0,10$ mm tartományban a mozgás-nyugvás határsebességét (így a kritikus fenék-csúsztatófeszültséget) a különböző szerzők nagyon tág határok között értelmezik.

A mért átlagos szemátmérők ($d_{g,min} = 0,031$ mm, $d_{g,max} = 0,118$ mm), és a $D^* = D_{50}[(\rho_s/\rho_w - 1) \cdot g / \nu^2]^{1/3}$ -ként definiált dimenziótlanszemátmérő esetén, ha $D^* < 4$, akkor van Rijn szerint a kritikus Shields-paraméter $\theta_{cr} = 0,24/D^*$ a teljes tartományban, most $D^*_{max} = 2,8$. Ha $\theta_{cr} = 0,24/D^*$ helyett $\theta_{cr} = 0,24 \cdot 3,11/D^*$ -al számolunk, (a határállapotot megadó görbét feljebb toljuk), akkor 179 db mérésnél a számított és a mért lebegtetett hozamértékek arányára a következő jellemzőket kapjuk: $r_{\hat{a}tl} = 1,00$; $r_{sz\acute{o}r} = 0,42$; $r_{min} = 0,26$; $r_{max} = 2,50$. Az eredmények számottevően jobbak, mint az eredeti, javítás nélküli módszerrel kapott értékek. Később, e módszerre, ill. eredményeire $\nu Rijn^*$ névvel hivatkozunk, (a * jellel utalva a kritikus Shields-paraméter javítására). Természetesen a 3,11-es szorzót próbálgatással határoztuk meg úgy, hogy $r_{\hat{a}tl} = 1,00$ legyen. Így ez csak a dunaujvárosi szelvényben, a vizsgált adatok esetén érvényes, nem általános érvényű. Valószínűleg hely és idő függő is.

DIMENZIÓELEMLÉSEN ALAPULÓ MÓDSZER, ('DimRy'-módszer)

A hordalékmozgással kapcsolatban – pl. a kritikus sebességre, vagy a hordalékhozam számítására – elfogadott módszer dimenzióanalízis segítségével meghatározott paraméterek közötti kapcsolat felhasználása. Főleg a görgetett hordalék kutatásánál fordul elő egy a hordalékszállítás intenzitását (Φ) és egy a vízfolyás-intenzitást (ψ) kifejező paraméterek közötti kapcsolat keresése. Itt még vázlatosan sem lehetne összefoglalni azt a sok-sok összefüggést, amellyel a kutatók megpróbálták leírni $\Phi = f(\psi)$ függvény kapcsolatot. Csak néhány ismertebbet szerzőt említve: Bogárdi 1971, Einstein, Einstein–Brown, Rouse (in Bogárdi 1971), Mayerle és társai (in Ebtehaj és Bonakdari 2013), Ab. Ghani (1993) stb. Mi a dimenziómentes hordalékszállítás intenzitásként,

$$\Phi = \frac{vH}{\sqrt{\Delta g d_s^3 C_v}} \quad (1)$$

és a dimenziómentes vízfolyás-intenzitásként,

$$\psi = \frac{u_*^2}{\Delta g H} \quad (2)$$

összefüggéseket alkalmaztuk, ahol a még ismeretlen változók értelmezése: C_v (m^3/m^3) a relatív hordaléktöménység, (térfogati koncentráció); u_* (m/s) a csúsztató sebesség, $u_* = (gHS)^{1/2}$; S (-) a vízmozgás energiavonalának relatív esése; g (m/s^2) a nehézségi gyorsulás; Δ a hordalék szem víz alatti 'súlyerejét' veszi figyelembe, $\Delta = \rho_s/\rho - 1$. Az ismeretlen S értéket Chézy-összefüggésből határoztuk meg, $S = v^2/(C^2H)$. A C Chézy-együtthatót az előző alfejezetben a van Rijn módszernél felvett $k_s = 0,1$ m értékkel számítottuk.

Megjegyezzük, hogy a paraméterek formái (bennük a változók) és a neveik is igen változatosak, Φ : hordalékhozam-intenzitás, röviden hordalékhozam-transzport paraméter, dimenziómentes hordalékhozam, Einstein-féle dimenziómentes hordalékszállítás intenzitás; ψ : a vízfolyás-intenzitás, mobilitási paraméter (vagy annak reciproka), ellenállási paraméter, Einstein-féle dimenziómentes szállítási intenzitás, dimenziómentes fenékcúsztató feszültség. Az általunk alkalmazott paraméterek csak kis mértékben térnek el az Ebtehaj és Bonakdari (2013) tanulmányában találhatóól.

A dunaujvárosi szelvényben rendelkezésre álló, mért lebegtetett hordalék töménység és geometriai, hidraulikai változók ismeretében (1970-2008. évek mért, ill. származtatott adataiból), határoztuk meg a dimenzió nélküli paramétereket. A pontpárookra illeszkedő kiegyenlítő kapcsolatot a

$$\Phi = 673,13 \cdot 10^5 \cdot \psi^{-1,3875} \quad (3)$$

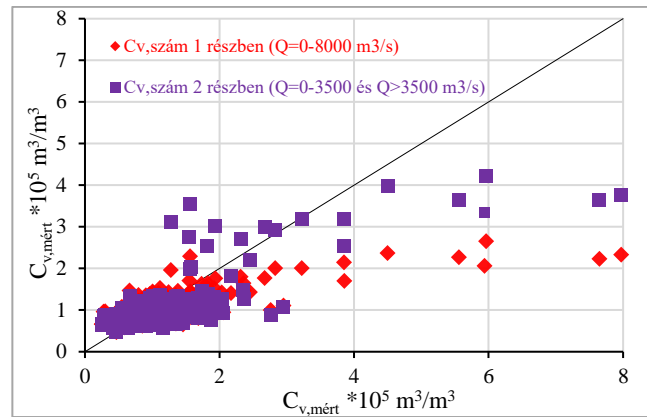
függvény írta le – 'hordalékos' gyakorlatban – elfogadható illeszkedéssel ($R^2 = 0,757$). A (3) kapcsolat alapján meghatározott 179 db $C_{v,szám}$ értéket összehasonlítottuk a $C_{v,m\acute{e}r}$ értékekkel: $r_{\hat{a}tl} = 1,11$, $r_{sz\acute{o}r} = 0,53$, $r_{min} = 0,29$; $r_{max} = 3,45$. Bár az $r_{\hat{a}tl}$ kismértékben rosszabb és szóródás is nagyobb, mint $\nu Rijn^*$ eredményei, de az lényeges, hogy e DimRy-módszernél nem próbálgatással, – külön bearányosítási paraméterrel (a 3,11-es szorzóval) – kaptuk ezeket az értékeket. Később a különböző módszerekkel kapott jellemző r -értékeket táblázatokban, eloszlásukat (relatív gyakoriságukat) hisztogramon is összehasonlítottuk.

A 2. ábrán láthattuk, hogy a kiegyenlítő regressziós görbétől való nagyobb eltérések többsége a nagyobb vízhozamok tartományában van. (Hasonló tendencia figyelhető meg, ha a sebesség vagy a vízállás függvényében ábrázoljuk a hordalék koncentrációt.) Nagyobb vízhozam tartományban a hidraulikai paraméterekből számított, egyensúlyi koncentráció (hordalékszállító-kapacitás) kevesebb, mint a mért (lehet, hogy hibás a számítás?), vagy a többet mértek, mint amekkorát a Duna egyáltalán képes lebegésben tartani, (a mérés hibás, vagy intenzív leülepedési fázis volt méréskor?). Megvizsgáltuk, hogy ha a 'kisvízes' tartományra és a $Q > 3500$ m^3/s -os ($H_a \geq 320$ cm) tartományra külön $\Phi = f(\psi)$ kapcsolatot illesztünk (osztott $\Phi = f(\psi)$ kapcsolat), milyen eredményeket kapunk. Kismértékben javultak az összesített eredmények: $r_{\hat{a}tl} = 1,10$, $r_{sz\acute{o}r} = 0,52$, $r_{min} = 0,32$; $r_{max} = 3,05$.

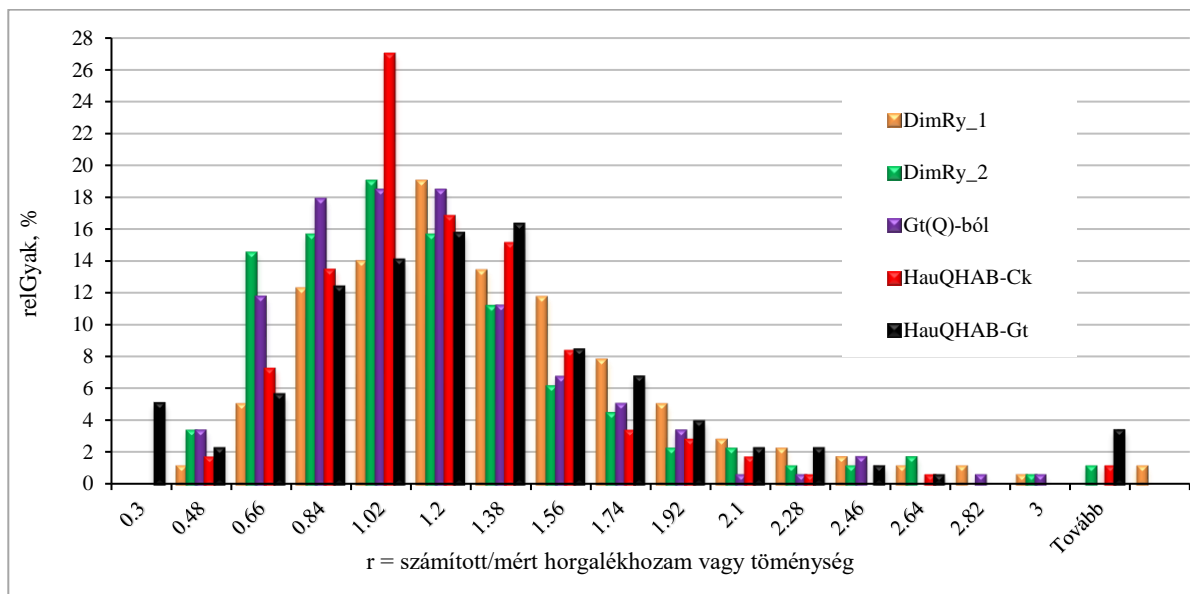
A 3. ábrán látható, hogy osztott $\Phi = f(\psi)$ kapcsolat alkalmazása esetén a nagyobb C_v tartományban a $C_{v,szám}$ értékek kisebb mértékben térnek el a $C_{v,m\acute{e}r}$ -től, mint nem osztott $\Phi = f(\psi)$ kapcsolatnál. (Pl. $C_{v,m\acute{e}r} = 4,5 \cdot 10^5$ m^3/m^3 -hez a számított C_v ha a teljes tartományra egy görbét illesztünk $C_{v,szám} = 2,38 \cdot 10^5$ m^3/m^3 , míg osztott $\Phi = f(\psi)$ kapcsolat esetén $C_{v,szám} = 3,97 \cdot 10^5$ m^3/m^3).

A 4. ábra hisztogramjai – többek között – a DimRy-módszerrel számított eredmények r eloszlásait is mutatja. A DimRy_1 jelű oszlopoknál az összes számított C_v -t egyetlen $\Phi = f(\psi)$ kapcsolatból, a DimRy_2 jelűeket 2 db legjobban illeszkedő $\Phi = f(\psi)$ függvénnyel közelítettük.

Jól látszik, hogy a két-függvényes közelítésnél a nagyobb r -értékek relatív gyakorisága (előfordulása) kisebb, mint az egy db függvény alkalmazása esetén. ($r \approx 1,2-2,46$ között a zöld oszlopok kisebbek, mint a barna oszlopok.) Tehát a két függvénnyel való számítás a 'nagyvizes' tartományokban ($Q > 3500 \text{ m}^3/\text{s}$), kisebb hibával közelíti a hordaléktöménységet, mint amikor egy db függvénnyel jellemezzük a teljes hozam tartományt. Az ábra azt is szemlélteti, hogy a különböző számítási módszereknél egy számításból hogyan oszlik meg $r = G_{t,\text{szám}}/G_{t,\text{mért}}$ relatív hiba. Az esetleg megegyező átlagos r paraméterek mellett nagyon különböző egy számításból az r eloszlása, relatív gyakorisága. Az ANN számítások eredményeinek egy részét (egy modell-tanítás) eredményét is mutatja a hisztogram (HauQHAB-Ck és HauQHAB-Gt jelű oszlopok).



3. ábra. DimRy-módszernél C_v , mért és C_v , szám
Figure 3. For the DimRy method, C_v , measured and C_v , number



4. ábra. Különböző módszerrel számított hordalékhözam vagy töménység r értékeinek eloszlása
Figure 4. Distribution of r values of sediment yield or concentration calculated by different methods

EGY ÉS KÉT $G_t(Q)$ FÜGGVÉNYKAPCSOLATTAL VALÓ KÖZELÍTÉS

Az adat-előkészítés fejezetben az adatok szűrésére már alkalmaztuk a $G_t(Q)$ kapcsolatot. Ebben a fejezetben azt nézzük meg, hogy a két függvénykapcsolat előrejelzésre alkalmazása esetén – az előbb bemutatott módszerek eredményeinek értékeléséhez használt – mutatók hogyan alakulnak. A 2. és 3. ábrán láthatjuk, hogy a 'nagyvizes' tartományokban általában a számításaink alábecsülnek, ezért megvizsgáltuk azt az esetet, amikor a teljes vízhozam tartományt két legjobban illeszkedő $G_t(Q)$ függvénnyel közelítjük. A Q - G_t grafikus ábráját tekintve, majd próbálgatás után $Q = 1030-3100 \text{ m}^3/\text{s}$ tartományban $G_t = 6,958 \cdot 10^{-6} \cdot Q^{2,074}$ (kg/s) hatványfüggvény, a $Q = 3110-8480 \text{ m}^3/\text{s}$ tartományban $G_t = 0,232 Q - 584,6$ (kg/s) lineáris regressziós függvény illeszkedése volt a legjobb (5. ábra, $R^2=0,725$ és $R^2=0,861$). Az ábrán a $Q = 1030-3100 \text{ m}^3/\text{s}$ tartományra illesztett trendvonal gyakorlatilag megegyezik a teljes tartományt egyként kezelő „Hatóanyag Gt, egybe, kg/s” jelű függvény e szakaszára simuló kék színű vonallal – az ábrán ebben a tartományban elkülöníthetetlenek a vonalak. A teljes adathalmazra az egy- (e_1 , $rG_t(Q)_1$) és két-függvényes (e_2 , $rG_t(Q)_2$) közelítések illeszkedését mutató e és r paramétereket a 3. táblázatban adtuk meg.

3. táblázat. Számított paraméterek egy és két $G_t(Q)$ függvényközelítésnél

Table 3. Calculated parameters for one and two $G_t(Q)$ function approximations

	$G_{t,\text{mért}}$ kg/s	e_1 kg/s	e_2 kg/s	$rG_t(Q)_1$	$rG_t(Q)_2$
maximum	1 340	991	219	2,82	2,86
minimum	8,32	-1 321	-484	0,31	0,31
átlag	110	-14,2	1,06	1,08	1,12
szórás	195	223	62,8	0,44	0,45
átlagos eltérés	94,7	105	28,9	0,33	0,34

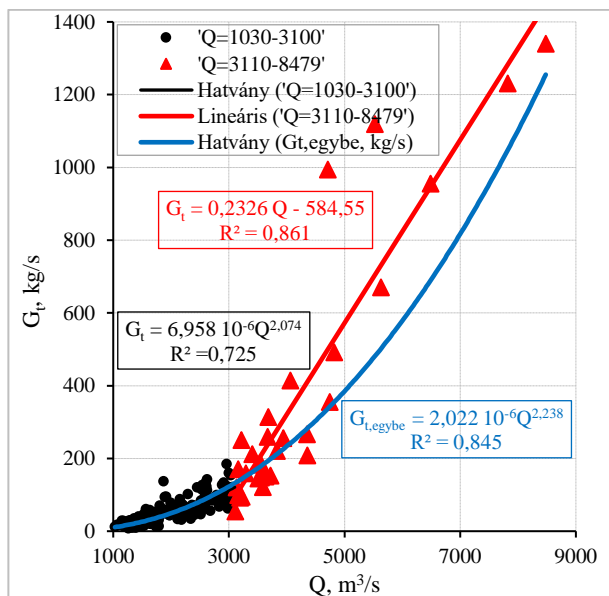
Az eredményeket összehasonlítva a mesterséges neurális háló alkalmazásával kapott eredményekkel, egy lényeges következtetés vonható le: $G_t(Q)$ függvény nem ad (nem adhat) negatív hordalék-tömegáramot. A másik, nem elhanyagolható előnye, hogy egy konkrét Q input esetén az előrejelzett, becsült eredmény (G_t) mindig ugyanaz, akárhányszor végezve el a számítást. Persze tudjuk azt, hogy a természetben egy konkrét Q -hoz különböző G_t tartozhat, de az lényeges, hogy ezt a természetben előforduló hatások változása és nem a modell véletlen generálása okozza. Ha az egy- és a két-függvény-kapcsolattal való közelítés paramétereit összehasonlítjuk meglepő, hogy alig van különbség a paraméterek között (4. táblázat $rG_t(Q)_1$ és $rG_t(Q)_2$ oszlopok). Ez már a DimRy_1 és DimRy_2

jelű változatoknál is így volt (4. ábra $rDimRy_1$ és $rDimRy_2$ oszlopok).

4. táblázat. Számított paraméterek egy és két $DimRy$ valamint $G_t(Q)$ függvény-közelítésekénél
Table 4. Calculated parameters for one and two $DimRy$ and $G_t(Q)$ function approximations

	$rDimRy_1$	$rDimRy_2$	$rG_t(Q)_1$	$rG_t(Q)_2$
maximum	3,45	3,05	2,82	2,86
minimum	0,29	0,32	0,31	0,31
átlag	1,11	1,10	1,08	1,12
szórás	0,53	0,52	0,44	0,45
átlagos eltérés	0,39	0,38	0,33	0,34

Az okot a 3. és a 5. ábrák alapján érthetjük meg: az illeszkedés a teljes adathalmaznak csak kis részénél (~5%-nál) javult. Ez arra is felhívja a figyelmet – ami természetesen –, hogy ezek a paraméterek csak átlagolva, általánosságban mutatják a becslés (előrejelzés) minőségét. Természetesen egy konkrét esetre az átlag nem mond semmit. Ugyanakkor e paraméterek arra kiválóan alkalmasak, hogy segítségükkel a különböző módszerek közül a legmegbízhatóbbat kiválasszuk, azt, amelyik az előrejelzések összességében (esetleg több száz előrejelzésnél) statisztikailag, átlagosan a legjobb eredményt adja. E mellett azt is megmutatják, hogy 'legrosszabb esetben' a számított hordalékhozam hányszorosa vagy hanyadrésze lehet – az előrejelzésnél nem ismert – a 'tényleges' értéknek (megint csak statisztikailag pl. $r_{max} = (G_{t,szám}/G_{t,mért})_{max}$ vagy r_{min}).



5. ábra. Lebegtetett hordalékhozam közelítése egy és két illesztett $G_t(Q)$ függvényvel

Figure 5. Approximation of suspended sediment load with one and two fitted $G_t(Q)$ functions

ÖSSZEFOGLALÓ

E tanulmányban elsődleges célunk az volt, hogy megvizsgáljuk nagyszámú, múltbeli expedíciós mérési adatainak felhasználásával a lebegtetett hordalékszállítás számításának lehetőségét mesterséges neurális hálózati-módszer alkalmazása segítségével. Az alkalmazhatóságot több szempont figyelembe vételével ítélni lehet meg, a legfontosabbak: a pontosság, az eredmények szórása (szóródása), az adatok beszerezhetősége, azok pontossága, mérésük nehézsége, költsége, számítási módszer egyszerűsége stb.

Ezek a jellemzők többsége csak relatívan, más módszerekkel összehasonlítva értékelhető. Ezért azonos méréssorozat adatait felhasználva három további módszerrel is elvégeztük a számítást. Az alkalmazott módszerek elvi alapjuk, származtatásuk tekintetében eltérőek voltak. Leegyszerűsítve, a módszerek leglényegesebb jellemzőjét hangsúlyozva:

- a *neurális háló*t alkalmazó módszer alapjait tekintve statisztikai gyökerű (fekete doboz),
- a *van Rijn* módszere elsősorban hidrodinamikai alapon közelít,
- a *DimRy* névvel említett módszert dimenzióelemzés segítségével származtattuk,
- $Q_t(Q)$ tapasztalati összefüggésen (szimptomatikus kapcsolaton) – hidrológiai/hidraulikai tényezők korrelációs kapcsolatán – alapul.

A vizsgálatainkat a dunaújrósi szelvényre, 1950-2008. években végzett geometriai, hidraulikai és lebegtetett hordalékhozam adataira végeztük el (összes 288 db méréssorozat). Elemzéseink alapján megerősítettük azt a már korábban is ismert jelenséget, hogy a lebegtetett hordalékhozam időben (10 éves időintervallumok tekintetében) csökkenő tendenciát mutat (1. ábra). Tekintve e tendenciát, ha az adatokból előrejelzést lehetővé tevő módszert akarunk származtatni, nem ésszerű figyelembe venni a több évtizeddel előbbi hidrológiai és morfológiai állapot által befolyásolt, (részben módszertanban is különböző) méréseket. Ezért a részletes elemzéseket az 1970-2008. évek 179 db méréssorozatának adataival végeztük el.

Vizsgálataink lényegét az alábbiakban összegezzük:

- Ritka, expedíciós, múltbeli méréseken tanuló mesterséges neurális háló alkalmazó (függvény közelítő, leképző) modellt a tényleges, pillanatnyi lebegtetett hordalékszállítás numerikus előrejelzésére nem ajánljuk. Még annak ismeretében sem, ha néha az ismételt számításoknál, esetleg más módszereknél kedvezőbb minősítő paramétereket is kaphatunk.
- *van Rijn* (1984b) módszere – az általa ajánlott kritikus Shields-paraméter felhasználva – a dunaújrósi szelvényben általában előforduló lebegtetett hordalék szemeloszlás (mértékadó szemátmérő) esetén nem alkalmazható.

A továbbiakban a *neurális* és a *van Rijn* módszerek eredményeit az összehasonlításnál, – mint számításra nem ajánlottakat – az elemzésekből kihagyjuk.

- A többi módszert minősítő paraméterértékei között nem sok különbség van, (4. ábra, 5. és 6. táblázat). Bár nem végeztünk pontos szignifikancia elemzést, a mintaszám és a szórás ismeretében ez jogosan feltehető.
- Lényeges, hogy ezek a paraméterek csak átlagolva, általánosságban mutatják a becslés (előrejelzés) minőségét. Több (esetünkben több, mint száz) előrejelzésnél összességében $r_{középtérték} = (G_{t,szám}/G_{t,mért})_{középtérték} = 1,00-1,12$ jellemzi a módszereket (5. táblázat). Természetesen egy konkrét esetre az átlag nem mond semmit.
- Az r értékek statisztikai jellemzői szemléletesen bizonyítják, hogy önmagában egy középtérték alapján

mennyire hibás következtetést lehetne levonni. Most az összes módszer esetében az átlagos 'számítási hiba' nagyon kicsi, $r_{középtérték} = 1,00-1,12$ között van (alig több mint 10% felülbecslés!), ez alapján az előrejelzést 'hordalékos berkekben' kiválóan minősíthetnénk. Ugyanakkor a szélső értékek $r_{max,max} = 3,45$ és $r_{min,min} = 0,29$ háromszoros eltéréseket is mutatnak. A számítások új-

ból bebizonyították, hogy *ma még a 2-3 szoros pontatlanságokat is kénytelenek vagyunk elfogadni* (esetleg „jónak” mondani). Tehát ugyanazon megállapításra jutottunk, amire már előttünk több szerző (pl. *van Rijn 1984b, Wu 2001, Baranya 2009*) és amit mi is a 2011. és 2013. évi vizsgálataink után megállapítottunk (*Rátky 2011, Rátky I. és Rátky É. 2013*).

5. táblázat. 179 db r =számított / mért hordalékszálítási paraméter leíró statisztikai mutatói
Table 5. 179 descriptive statistical indicators of r = calculated / measured sludge transport parameter

	$vRijn^*$	$DimRy_1$	$DimRy_2$	1. 2. 3.			1. 2. 3.			$G_r(Q)_1$	$G_r(Q)_2$
				$H_{auQHAB-q_s}$			$H_{auQHAB-G_t}$				
maximum	2,48	3,45	3,05	3,33	3,29	3,11	3,78	3,61	4,91	2,82	2,86
minimum	0,25	0,29	0,32	0,40	-2,29	0,36	0,42	-0,51	-1,88	0,31	0,31
középtérték	1,00	1,11	1,10	1,11	0,98	1,10	1,24	1,13	1,22	1,08	1,12
szórás	0,42	0,53	0,52	0,42	0,84	0,41	0,51	0,47	0,77	0,44	0,45
átl. eltérés	0,33	0,39	0,38	0,29	0,64	0,30	0,37	0,31	0,48	0,33	0,34

Megjegyzés: A táblázatban a sorszámok ugyanazon beállítások mellett ismételt számítások eredményeit mutatják.

6. táblázat. 179 db r =számított / mért hordalékszálítási paraméter eloszlásának jellemzői
Table 6. 179 distribution characteristics of r = calculated / measured sludge transport parameter

	$vRijn_{cikk}$	$vRijn^*$	$DimRy_1$	$DimRy_2$	1. 2. 3.			1. 2. 3.			$G_r(Q)_1$	$G_r(Q)_2$
					$H_{auQHAB-q_s}$			$H_{auQHAB-G_t}$				
$r < 0,75\%$		32	26	25	15	31	18	13	15	19	24	20
$0,75 \leq r \leq 1,5$	43	58	56	58	75	41	69	66	72	57	61	61
$0,5 \leq r \leq 2,0$	76	91	87	88	96	71	95	90	96	85	92	93
$0,33 \leq r \leq 3,0$	94	98	98	98	99	85	99	99	98	91	99	99

Megjegyzés: A táblázat feletti sorszámok ugyanazon beállítások mellett ismételt számítások eredményeit mutatják.

$vRijn_{cikk}$ jelű oszlopban az adatokat van Rijn (1984b) tanulmányából idézzük, mely $d \approx 0,1-0,5$ mm szemátmérő tartományban, összesen 783 db természetbeni és laboratóriumi, 'totál' hordalékszálítási mérés alapján lett meghatározva. Tehát az értékek legalább kétszer akkora (átlagos vagy közepes) szemátmérőre és sokkal szélesebb tartományú méréseken alapultak. A $vRijn^*$ jelű oszlopban az általunk 3,11 szorzóval növelt bearányosítási paraméterű számítás eredményeiből kapott értékeket mutatjuk. Az eredeti van Rijn módszeren alapuló saját számításaink r eredményei, az extrém nagy értékek miatt nem szerepelnek sem az 5. és sem a 6. táblázatban.

A fent említett alkalmasságot eldöntő jellemzők alapján értékelve a módszereket:

- **Pontosság, az eredmények szórása (szóródása) alapján:** két $G_r(Q)$ függvénykapcsolattal közelített számítási módszer adja a **legpontosabb eredményt** ($G_r(Q)_2$). Az egy- és két-függvénnyel való közelítés közül azért tartjuk ezt előnyösebbnek, mert elsősorban a 'nagyvízes' tartományokban ad jobb egyezést a mért értékekkel. Bár ez a paraméterértékekben nem tükröződik (6. táblázat), ez csak az 5. ábrán látható.
- **Az adatok beszerezhetősége, azok pontossága, mérésiük nehézsége, költsége alapján:** a **legelőnyösebb a $G_r(Q)$ függvénykapcsolattal történő közelítés**. A többi módszerhez több bemenő jellemző szükséges. Persze néhány változó (H_a , v , H , A és B) már a Q származtatásához is szükséges, de a többi módszer-nél az érdességet, szállítási ellenállást befolyásoló jellemezők – pl. k_s , k_{str} , és n_k – nem mérhetők, nehezen és csak közelítőleg határozhatók meg.
- **A számítási módszer egyszerűsége alapján:** egyértelműen $G_r(Q)$ függvénykapcsolattal történő közelítés (akár 1, akár 2 függvénnyel) ajánlható.

E tanulmány is megerősíti azt az ismert tény, hogy **jelentősen lebecsült hordalékszálítást csak nagy hibával lehet meghatározni, mind a mérés, mind az előrejelzés tekintetében.**

A mért geometriai, hidraulikai paraméterek (pl. v , H , Q stb.) nem egyértelműen határozzák meg a hordalékszálítást, ráadásul egyes paramétereket megfelelő pontossággal nem is tudunk mérni. Így nem meglepő, hogy a **célérték** (pl. G_r), **pontatlanul mérhető és hiányos paraméterek** (függő és független változók) esetén nem tudjuk az egyértelmű függvénykapcsolattal leírni, **nem ismerjük még elméletileg sem a $G_r = f(v, H, Q, d, \text{szemeloszlás, turbulencia, ...stb.})$ függvényt**. A 'hiányos' paraméter alatt azt értjük, hogy valami lényegeset nem veszünk figyelembe, esetleg túl nehéz, költséges mérni (pl. a turbulenciát), vagy nem is gondolunk rá.

Hangsúlyozni kell egy lényeges körülményt. A fenti módon meghatározott $G_r(Q)$ kapcsolat, ha feltételezzük, hogy 'pontos' (a gyakorlatban elfogatható pontosságú) adatokból származtatjuk, akkor **sem a hordalékszálító-képességet adja**. Tehát **továbbra is szükség van a geometriai, hidrológiai változók alapján meghatározható – a numerikus morfológiai számításokhoz nélkülözhetetlen – hidrodinamikai vagy dimenzióelemzésen alapuló hordalékszálító-képességet számító módszerekre.**

KITEKINTÉS

Bogárdi János több mint 40 éve ezt írta a görgetett hordalékhozamok természetben végzett mérések alapján való meghatározásával kapcsolatban: „... a hordalékhozam és

a vízfolyás hidraulikai sajátosságai között tapasztalt összefüggések..., ha a tényleges hordalékhozamot megfelelő pontossággal sikerült megmérni, talán a legjobb és legmegbízhatóbb módja a hozamok meghatározásának. Sajnos a hozamok értéke sok esetben, különösen a hordalékfogóval való méréseknél elég bizonytalan.” (Bogárdi 1971. 232. old., kiemelés a szerzőtől). Máshol a lebegtetett mintavevőkkel kapcsolatban: „...a vízmintavevők, ellenében a hordalékfogókkal, igen megbízható mérőeszközök.” (uo. 131. old.). Persze hangsúlyozni kell, hogy a lebegtetett hordalékmérő eszközök csak a görgetetthez viszonyítva ad megbízhatóbb eredményt. Hazánkban a közelmúltig ezek helytálló megállapítások voltak.

Nem lennének igazságosak e szűk szakterület művelőihez és a témához, ha csak a lebegtetett hordalék számítás e sikertelen próbálkozását említenénk meg. (Bár meg vagyunk arról győződve, hogy az is hasznos eredmény – és ebből a szempontból pozitív –, ha megmutatjuk azt, hogy mi az, amivel nem érdemes foglalkozni, ami zsákutca.) E szakterületre is kedvezően hatott az információs-technológia, a mérés-technika, a számítástechnika fejlődése. A közelmúltban (az elmúlt 10 évben) igen nagy lendületet kapott a hordalékkal foglalkozó tudomány. Ennek látványos megjelenését tapasztalhatjuk a hazai hordalék-gazdálkodás kutatása területén is. Talán csak a leglényegesebbet említve: folyik munka az EU-által finanszírozott SEDDON II (SEDimentforschung und -management an der DONau) határokon átnyúló projektben, amelyben két-két osztrák, magyar intézet működik közre, (Bécsi Agrártudományi Egyetem, BOKU, Vízi-, Légköri és Környezeti Tanszék Vízgazdálkodási, Hidrológiai és Vízépítési Intézete, IWHW; Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, BME, Építőmérnöki Kar Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéke; Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság ÉDUVÍZIG; és a Szövetségi Vízgazdálkodási Hivatal, Bécs, BAW, Vízépítési és Hidrometriai Intézet). A 2017-19. években futó program célja integrált szemlélettel vizsgálni a Felső- és Közép-Duna hordalékkal kapcsolatos problémáinak összességét így: a hordalékvándorlást, a hordalék-mérési és modellezési módszereket, a gyakorlati hordalék-gazdálkodási módszereket stb. A konkrét célok között szerepel a közös szemléletű mérési útmutatók elkészítése, meglévő laboratóriumi felszerelések és mérőrendszerek értékelése, egy 10 m³/s kapacitású, gravitációs levelezésű kísérleti csatorna megépítése (SEDDON 2019). Egy, a teljes Dunára kiterjedő nemzetközi együttműködés keretében pedig a Duna hordalékjárásnak vizsgálatával és többek között a jó hordalékmérési gyakorlat kidolgozásával is foglalkoznak (DanubeSediment projekt, <http://www.interregdanube.eu/approved-projects/danubesediment>). A végéhez közeledő munka részeredményei, írásos dokumentumai már mindenki számára hozzáférhetők (INTERREG 2019a, 2019b, 2019c). E szakterület látványos fejlődését mutatja az utóbbi időben a megsokszorozódott hazai irodalmi aktivitás, a teljesség igénye nélkül: Baranya és Józsa 2006, 2013, Nagy 2013, Kutai 2014, Ficsor 2015, Baranya és társai 2015, Csiti 2016, Pomázi 2017.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet illeti dr. Baranya Sándort, aki hasznos, támogató javaslatokkal, tanácsaival segítette e tanulmány megjelenését.

IRODALOMJEGYZÉK

- Ab. Ghani A. (1993). Sediment Transport in Sewers, PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne Department of Civil Engineering, England.
- ASCE Task Committee (2000a). Artificial neural networks in Hydrology I: Preliminary Concepts és II: Journal of Hydrologic Engineering, ASCE 5 (2), 115–123.
- ASCE Task Committee (2000b). Artificial neural networks in hydrology II: Hydrologic Applications Journal of Hydrologic Engineering, ASCE 5 (2), 124–132.
- Baranya S. (2009). Three-dimensional analysis of river hydrodynamics and morphology, Ph.D. thesis, Department of Hydraulic and Water Resources Engineering Budapest University of Technology and Economics, Budapest, November.
- Baranya S., Józsa J. (2013). Flow analysis in river Danube by field measurement and 3D CFD turbulence modelling. Department of Hydraulic and Water Resources Engineering, Budapest University of Technology and Economics Ser. Civ. Eng. Vol. 50, No. 1, pp. 57–68.
- Baranya S., Józsa J. (2013). Estimation of suspended sediment concentrations with ADCP in Danube River. Journal of Hydrology and Hydromechanics Vol. 61, No. 3, pp. 232–240.
- Baranya S., Józsa J., Török G.T., Kondor G., Ficsor J., Mohácsiné Simon G., Helmut H., Marlene H., Angelika R., Marcel L., Michael H. (2015). A Duna hordalék-vizsgálata a SEDDON osztrák-magyar együttműködési projekt keretében. Hidrológiai Közöny 2015. Évf. 95.
- Bogárdi J. (1971). Vízfolyások hordalékszállítás. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Cao Z., Pender P., Meng J. (2006). Explicit Formulation of the Shields Diagram for Incipient Motion of Sediment, Technical Notes, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132, No. 10, October. 2006. ASCE, pp. 1097-1099.
- Cigizoglu H. K., Kisi O. (2006). Methods to improve the neural network performance in suspended sediment estimation. Journal of Hydrology Vol. 317, Iss. 3-4, pp. 221–238.
- Csiti B. (2016). Investigation of direct and indirect suspended sediment measuring methods. Faculty of Civil Engineering Department of Hydraulic and Water Resources Engineering TDK Conference
- DREAM (2017). Danube River REsearch And Management <https://www.danube-navigation.eu/projects/dream-danube-river-research-and-management> Letöltve: 2018.07.23.
- Ebtehaj I., Bonakdari H. (2013). Evolution of Sediment Transport in Sewer Using Artificial Neural Network. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics Vol. 7, No. 3, pp. 382-392.
- Ficsor J. (2015). Lebegtetett hordalék vizsgálata a Felső-magyarországi Duna-szakaszon, Szakmérnöki dolgozat; Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék.
- Fazekas I.. Neurális hálózatok / Digitális Tankönyvtár.

https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0103_19_neuralis_halozatok/index.html. Letöltve: 2018.07.23.

Guo J. (2014). Hunter Rouse and Shields Diagram, Advances in Hydraulics and Water Engineering Proc. 13th IAHR-APD Congress, Vol. 2, pp. 1096-1098. World Scientific Singapore.

INTERREG (2019a) Danube Transnational Programme Danube Sediment. Analysis of Sediment Data Collected along the Danube.

http://www.interregdanube.eu/uploads/media/approved_project_output/0001/27/af1a5cf355224c606b709fd738ebbc96902beeda.pdf. Letöltve: 2018.07.23.

INTERREG (2019b). Danube Transnational Programme Danube Sediment. Handbook on Good Practices in Sediment Monitoring.

http://www.interregdanube.eu/uploads/media/approved_project_output/0001/27/c2280d98b61601620cadef5c591f7ea477d7fd8c.pdf. Letöltve: 2018.07.23.

INTERREG (2019c). Danube Transnational Programme Danube Sediment. Sediment Monitoring in the Danube River.

http://www.interregdanube.eu/uploads/media/approved_project_output/0001/27/659489792a6c2b58c4e322ac8c609943565c3095.pdf. Letöltve: 2018.07.23.

Kisi O. (2005). Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches. Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques. 50(4) pp. 683–696

Kutai R.D. (2014). Pontbeli zavarosság mérésén alapuló hordalékhozam becslő eljárás implementálása a Dunára, TDK Thesis; Department of Hydraulic and Water Resources Engineering, Budapest University of Technology and Economics <https://tdk.bme.hu/EMK/viz2/Pontbeli-zavarossag-meresen-alapulo> Letöltve: 2018.07.23.

Melesse A.M., Ahmad S., McClain M.E., Wang X., Lim Y.H. (2011). Suspended sediment load prediction of river systems: An artificial neural network approach. Agricultural Water Management. Vol. 98. Iss. 5, pp. 855–866.

Nagy K. (2013). Operatív folyami lebegtetett hordalék monitoring tudományos megalapozása korszerű mérési módszerekkel. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Tudományos Diákköri Konferencia.

Norvani V. (2009). Using artificial neural networks (ANNs) for sediment load forecasting of Talkherood river mouth. Journal of Urban and Environmental Engineering, Vol. 3, No. 1. pp. 1-6.

A SZERZŐ



RÁTKY ISTVÁN Okleveles mezőgazdasági gépészmérnök, okleveles építőmérnök, "IHE,Delft", NUFFIC ösztöndíjjal 10 hónapot töltött Delft, The International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, "Experimental and computational hydraulics" posztgraduális képzésen. PhD fokozatot 1998-ban szerzett. 1970-től a BME oktatója 2009-ig, egyetemi docensként nyugdíjba vonulásáig. Rektori Dicséret 2006, „A vizek kártételei elleni védekezésért ezüst érdemrend”, KvVM 2006. Nyugdíjazása után vendégelőadóként a Szent István Egyetem Mezőgazdaság Tudományi Kar, az Eötvös József Főiskola Műszaki Fakultás Szakmérnök képzésében és az ELTE Természettudományi Kar hidrológus szakirányú továbbképzésben előadóként vett részt. 1974-től tagja a Magyar Hidrológiai Társaságnak. Kiténtetése: Pro Aqua emlékérem (2001), Schafarzik Ferenc emlékérem (2016), négy alkalommal részesült Vitális Sándor szakirodalmi nívódíjban. A Hidrológiai Közlöny szerkesztőbizottságának tagja. 2000-től az MHT Hidraulikai és Műszaki Hidrológiai Szakosztály elnöke. Kutatási területe: árvízmentesítés, árvízvédelem, folyó és tószabályozás, sík- és dombvidéki vízrendezés, belvízvédelem.

Pomázi F. (2017). Comparative analysis of suspended sediment transport monitoring methods. Budapest University of Technology and Economics Faculty of Civil Engineering Department of Hydraulic and Water Resources Engineering, MSc Thesis.

Rátky I. (2011). A hordalékszallító-képességet számító összefüggések érzékenység vizsgálata. in. „Egydimenziós morfológiai folyamatok matematikai modellezése, hordalék-járási modell érzékenységvizsgálata és kalibrálása a rendelkezésre álló felszín görbe adatok és mederszelvények alapulvételével...” Negentróp Kft. Megrendelő VITUKI Nonprofit Kft. Előrehaladási jelentés, Budapest, 2011. június 26.

Rátky I. (2016). Csatornahálózatokban a lebegtetett hordalék mozgás-nyugvás határállapot vizsgálata. MHT XXXIV. Országos Vándorgyűlés, Debrecen, 2016. július 6-8. <http://www.hidrologia.hu/vandorgyules/34/dolgozatok/dolgozatok.html#2>.

Rátky I., Rátky É. (2013). Görgetett hordalék térfogat-áram felső-dunai mérések alapján. MHT XXXI. Országos Vándorgyűlés, Gödöllő, 2013. július. <http://apps.arcanum.hu/hidrologia>.

SEDDON (2019). SEDimentforschung und -management an der DONau.

<http://seddon.globalonline.org/index.php/hu/a-projekt/projekt-partnerek.html>. Letöltve: 2018.07.23.

Sziebert J. (2015). Az Alsó-Duna 2013. évi lebegtetett hordalékszallítása.

www.hidrologia.hu/vandorgyules/32/dolgozatok/word/1117_sziebert_janos.pdf. Letöltve: 2018.07.23.

Tayfur G., Guldal V. (2006). Artificial neural networks for estimating daily total suspended sediment in natural streams. Nordic Hydrology Vol. 37, No. 1, pp. 69-79.

van Rijn L.C. (1982). Equivalent roughness of alluvial bed. ASCE, Vol. 108, No. HY10, October, 1982.

van Rijn L.C. (1984a). Sediment Transport, Part I. Bed Load Transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 10, October, 1984. ASCE, pp. 1431-1456.

van Rijn L.C. (1984b). Sediment Transport, Part II. Suspended Load Transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 11, November. 1984. ASCE, pp. 1613-1641.

van Rijn L.C. (1984c). Sediment Transport, Part III. Bed Form and Alluvial Roughness, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 11, December. 1984. ASCE, pp. 1613-1641.

Wu W. (2001). CCHE2D Sediment Transport Model (Version 2.1) Technical Report No. NCCHE-TR-2001-3 School of Engineering the University of Mississippi University.

Horizontális és csápos kutak hidraulikai modellezése különböző számítási eljárások segítségével

Nyiri Gábor*, Székely Ferenc*, Zákányi Balázs*, Szűcs Péter**

* Miskolci Egyetem, Környezetgazdálkodási Intézet Miskolc, Egyetemváros, 3515, hgnyg@uni-miskolc.hu

** MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, Miskolci Egyetem, Környezetgazdálkodási Intézet

Kivonat

Magyarországon az ivóvízellátás nagyjából 35 %-ban parti szűrésű vízbázisokra épül, valamint távlati ivóvízbázisaink jelentős része is erre a felszín alatti víztípusra támaszkodik. Munkánkban a parti szűrésű vízbázisok jellemző víztermelő műtárgyával, a csápos kutakkal foglalkozunk, melyek a magyarországi parti szűrésű vízbázisok termelésének jelentős hányadát adják. Előnyük a függőleges kutakkal szemben, hogy a horizontális kialakítással, egy kút telepítése esetén megnövekszik a hasznos szűrőfelület. Ezen kúttípusok hidraulikai viszonyait vizsgáljuk különböző számítási módszerek segítségével. A parti szűrésű rendszerekről elmondható, hogy igen változatos földtani felépítéssel és összetett hidraulikai viszonyokkal rendelkeznek. Ezen bonyolult hidrogeológiai körülmények modellezési lehetőségeit tovább nehezíti a csápos kutak alkalmazása. Munkánkban ezen modellezési problémákra keresünk megoldási lehetőségeket. Tanulmányunkban egy fél-analitikus, valamint egy véges differencia módszert alkalmazunk a termelés hatására kialakult vízszintek meghatározására, permanens állapotban. Vizsgálatunk során két jellemző kútgeometriával dolgoztunk. Egyik esetben egy egyirányban, horizontálisan telepített kút, másik esetben pedig egy ötágú csáposkút környezetében számítottuk ki a kialakuló vízszinteket. A számítási eredmények összehasonlításával megbizonyosodhatunk a módszerek alkalmazásáról, és jobb képet kaphatunk a csápos kutak hidraulikai viszonyairól. A számított vízszinteket összevetettük független számítási eredményekkel. Ezen eredményeket felhasználva a továbbiakban célunk valós földtani viszonyokban telepített kutak komplex hidrodinamikai vizsgálata.

Kulcsszavak

Parti szűrés, csápos kút, kúthidraulika, hidraulikai modellezés, Multi-Node Well 2.

Hydraulic modelling of horizontal and radial collector wells using different calculation methods

Abstract

In Hungary, approximately 35% of drinking water supply is based on riverbank-filtrated water resources, and a significant part of our long-term drinking water bases rely on this type of groundwater. In our work, we are dealing with the typical water-producing structure of riverbank filtration systems, the radial collector wells, which produce a significant part of the water production in Hungary, especially in Budapest. Their advantage over vertical wells is that with the horizontal design, the installation of a well increases the effective filter surface. The hydraulic conditions of these types of wells are examined using different calculation methods. Riverbank filtrated systems are characterized by a wide variety of geological structures and complex hydraulic conditions. The modelling possibilities of these hydrogeologic conditions are further complicated by the use of Ranney collector wells. Recognizing this situation, we were looking for solutions to these modelling problems. In our study, we used a semi-analytical and a finite difference method to determine the water levels generated by production in steady state condition. Two typical well types were tested: a horizontally installed well, and a radial collector well with five arms. By comparing the results of the calculations, we can verify the suitability of the methods and get a better view of the hydraulic conditions of the radial collector wells. The calculated water levels were compared with independent calculation results. Using these results, we aim to further carry out complex investigation of the hydrodynamics of wells in real geological conditions.

Key words

Riverbank filtration system, horizontal collector well, Ranney well, well hydraulics, hydraulic modelling, Multi-Node Well 2.

BEVEZETÉS

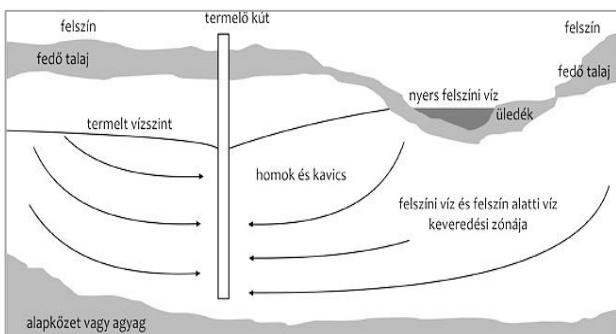
Hazánk ivóvízellátásának nagyjából 95 %-a felszín alatti vizekből ered (Ilyés és társai 2017), melyben fontos szerepet játszanak a parti szűrésű vízbázisok. Az egyre sűrűbben tapasztalható időjárási szélsőségek hatással lehetnek ezen vízbázisok után-pótlódására is (Ilyés és társai 2016). A parti szűrés jogszabályban foglalt definíciója a következő: „felszíni víz közelében lévő felszín alatti vízbázis, melyben a vízkivételi művek által termelt víz utánpótlódása 50%-ot meghaladó mértékben a felszíni vízből történő beszivárgásból származik” (123/1997. (VII. 18.) Korm. rendelet). Arányait tekintve az ivóvízellátás 35-40%-a parti szűrésű rendszerekre támaszkodik. Ezen vízbázisok jelentőségét fokozza, hogy távlati ivóvízbázisaink 70-75%-a ilyen folyóparti környezetben helyezked-

nek el (Kármán 2013). Jellemző továbbá ezen vízbázisokra, hogy előfordulásuk változatos, valamint összetett geológiai, hidrogeológiai viszonyokkal rendelkeznek. A vízkivételhez kapcsolódóan különböző műszaki megoldások ismeretesekek, melyek még összetettebbé teszik ezen vízbázisok hidraulikai modellezését. A víz kitermelését tekintve többfajta műtárgy használatos: galéria, függőleges kút, valamint a kutak egy speciális fajtája, a csápos kút. A változatos műszaki kialakítás és hidrogeológiai körülmények ellenére a modellezési gyakorlat jelentős egyszerűsítéseket használ (vertikális helyettesítő kutak, egyszerű peremfeltételek). Munkánkban ezen csápos kutak hidraulikai vizsgálatával foglalkozunk, több számítási módszert összehasonlítva. A numerikus modellezés során a MODFLOW MNW2 modulját használtuk, amely véges

differentia módszert alkalmaz. Az MNW2 (Multi-Node Well 2) modul alkalmas horizontális, valamint ferde kutak modellezésére (Konikow és társai 2009). Ezen modul használatával célunk ezen vízbázisok bonyolultságához illeszkedő numerikus modellezés gyakorlatának elősegítése, melynek első lépcsője, hogy az MNW2 modul csápos kutak hidraulikai vizsgálatára való alkalmazhatóságát megismerjük. A pontosabb hidraulikai viszonyokat megismerve további teendő, hogy valós földtani körülmények között teszteljük az MNW2 modult.

A PARTI SZŰRÉS FOLYAMATA

Parti szűrés során a felszíni víz közelében telepített víztermelő műtárgy segítségével a talajvizet termeljük. Ennek eredményeképpen a műtárgy környezetében depresszió és ezzel együtt hidraulikus gradiens csökkenés tapasztalható (Kármán 2013). A gradiens változásával szivárgás indul meg a folyó és a háttér felől is (1. ábra). Megfelelő mederkapcsolat esetén a folyó felől nagyobb arányban (több mint 50%-ban) történik az utánpótlódás, ekkor beszélhetünk parti szűrésről (Ray és társai 2002). Maga a szűrés a felszín alatti közegben bekövetkező természetes hidrodinamikai (hígulás), mechanikai (szűrés), biológiai (mikroorganizmusok tevékenysége), fizikai-kémiai (csapadékképződés, adszorpció, koaguláció stb.) tisztítási folyamat (Hiscock és Grischek 2002). Mindezen folyamatok eredményeképpen, megfelelő földtani és víztermelési körülmények esetén a termelt víz ivóvíz minőségűre is tisztulhat, ezzel elkerülve a költséges víztisztító technológiák telepítését.



1. ábra. A parti szűrés sematikus ábrája (Forrás: Kármán 2013)
Figure 1. The schematic cross section of riverbank filtration (Source: Kármán 2013)

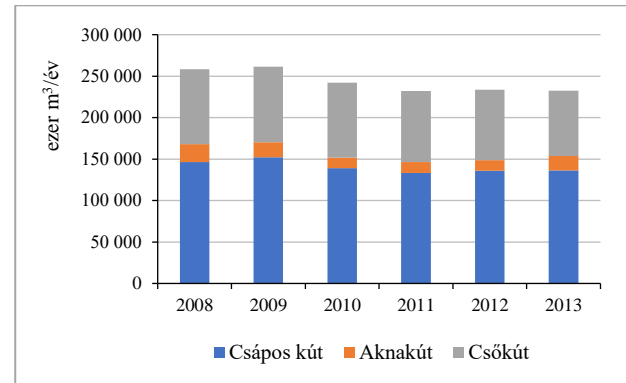
Magyarországon a Vízyűjtő-gazdálkodási Terv (OVF 2015) adatai szerint 15 db sekély porózus víztesten 91 db parti szűrésű vízbázis van, melyből 51 db üzemelő és 40 db távlati vízbázis. Ezen vízbázisok többnyire a Duna, a Sajó, a Hernád, a Rába, valamint a Mura mentén található. Budapest ivóvízellátása is nagymértékben a Szentendrei-sziget, valamint a Csepel-sziget parti szűrésű vízbázisaira épül.

PARTI SZŰRÉSŰ VÍZTERMELÉS

Parti szűrésű vízbázisok termelésére főként a következő kúttípusokat használjuk a magyar gyakorlatban: a „hagyományos” csökutak, aknakutak, valamint a csápos kutak. A csápos kutak előnye a csökutakkal szemben, hogy a vékony vízadók esetében a szűrők vízszintes elhelyezésével megnövekedik a hasznos szűrőfelület, ezáltal nagyobb hoz-

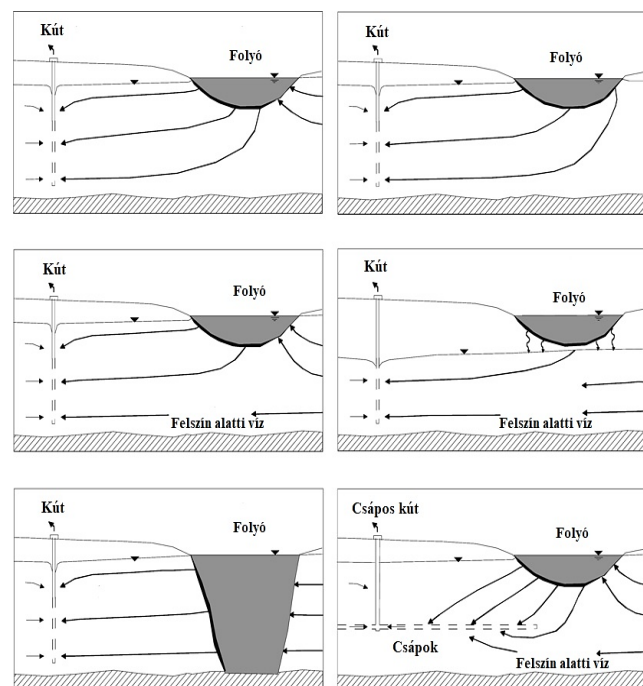
zamat érhetünk el egy kút telepítésével. Ezen hozamnövekmény jó példája a Varsóban található Gruba Kaska. A Varsó ivóvízellátását szolgáló, a Visztula közepén kialakított, 15 csáppal rendelkező csápos kút akár 150 000 m³/nap vízhozamot is tud szolgáltatni a városnak (Babac és társai 2009).

A Vízyűjtő-gazdálkodási Terv (OVF 2015) 2008 és 2013 közötti időszakra vonatkozó termelési adatokat is megad, melyek alapján látszik a csápos kutak víztermelésének nagy aránya. A különböző vízkivételi művek termelésének éves értékeit szemlélteti a 2. ábra.



2. ábra. Kúttípusok víztermelésének megoszlása (OVF 2015)
Figure 2. Yearly production of different type of wells (OVF 2015)

A hidraulikai viszonyokat tekintve, több paramétertől függően (mederkapcsolati hatások, termelt hozam, vízadó harántolásának mértéke, víztermelő létesítmény típusa stb.) különböző áramlási szituációk jöhetnek létre, melyeket a 3. ábra szemléltet (Hiscock, Grischek 2002). Az ábrán látható, hogy nem megfelelő mederkapcsolat esetén előállhat olyan helyzet is, amikor a túlpárt felől is történik utánpótlódás.



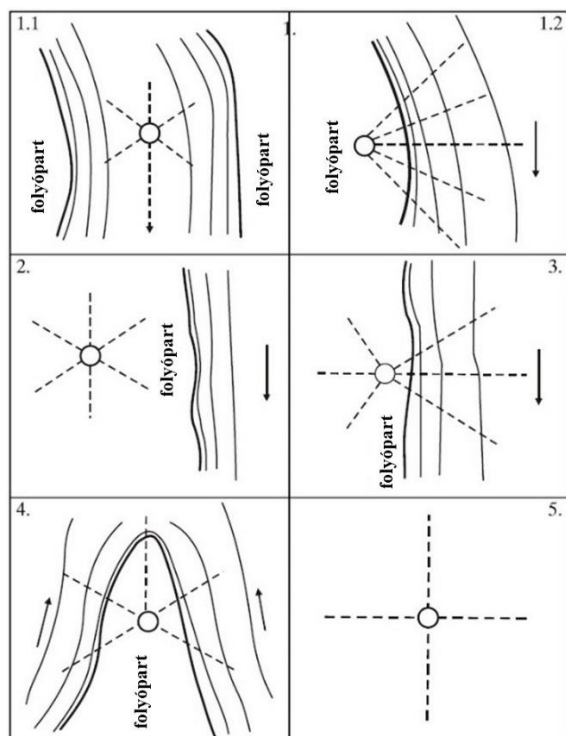
3. ábra. Különböző áramlási szituációk parti szűrésű rendszerekben

Figure 3. Different types of flow in riverbank filtration systems

A telepítési helyet, valamint az utánpótlódási viszonyokat tekintve több csoportba oszthatók a csápos kutak. *Anatolevsky és Galperin* a következő osztályozást adta meg (4. ábra) (*Babac és társai 2009*):

1. Folyami csápos kút típus
 - 1.1. A kútakna a folyóban van elhelyezve, és a csápok a folyó kavicssteraszába nyúlnak ki
 - 1.2. A kútakna a parton kerül kialakításra, és a csápok benyúlnak a folyómeder alá
2. Parti csápos kút típus (a csápok nem érnek be a folyómeder alá)
3. Kombinált kúttípus (a csápok egy része benyúlik a folyómeder alá, egy része pedig a háttér felé nyúlik ki)
4. Inter-fluviális típus (a kútakna folyókanyarulatban van elhelyezve, és a csápok benyúlnak a folyómeder alá)
5. Nyitott típus (a csápos kút telepítése nem kötődik folyómederhez).

A fentiek alapján megállapíthatjuk, hogy a parti szűrészű rendszerek rendkívül változatos hidraulikai viszonyokkal jellemezhetők, melyet tovább bonyolít a különböző típusú víztermelő létesítmények alkalmazása. Mindezek alapján látható, hogy ezen bonyolultsághoz megfelelő modellezési eszközökhöz kell nyúlnunk, hogy megfelelően szimulálni tudjuk a kialakuló áramlási viszonyokat.



4. ábra. Különböző kútelrendezési típusok
Figure 4. Different types of well layout

ALKALMAZOTT MÓDSZER

Egy adott kút tervezésénél fontos tudnunk azt, hogy a létesítendő kút mekkora hozamot tud termelni, és az adott hozam mellett milyen depresszió alakul ki a kút környezetében. Vertikális kialakítású kutaknál egyszerűbb földtani környezetben analitikus képletekkel is viszonylag könnyen meghatározható a kitermelhető hozam, valamint a

kút környezetében kialakuló vízszintek (*Kruseman és De Ridder 1994*). Csápos kutak esetében is léteznek ilyen összefüggések, amelyek a hozam meghatározásának problémáját visszavezetik a függőleges kutak hozammeghatározásának problémájára. A két kúttípus közötti kapcsolatot az egyenértékű kútsugár (R_e) adja meg. Az egyenértékű kútsugár az az elméleti, függőleges kút sugara, ami ugyanannyi vízhozam kitermelésére képes, mint a csápos kút (*Babac és társai 2009*). Az egyenértékű kútsugár meghatározására több szerző is kísérletet tett, melyeket az 1. táblázat szemléltet. Az 1. táblázatban szereplő összefüggésekből látható, hogy ezek tapasztalati vagy úgynevezett empirikus képletek, melyeket gyakran egy adott földtani környezetre és kútkialakításra használtak. A képletekben használt „ L ” a csáphosszat jelenti, míg az „ n ” a csápok számát.

1. táblázat. Az egyenértékű kútsugár számításának módszerei
Table 1. Calculation methods of the effective radius

Módszer	R_e számítása
Citrini (1951)	$R_e = L \cdot \sqrt[3]{0,25}$
Nering (1952)	$R_e = \frac{2 \cdot \sum L}{3 \cdot n}$
Wegenstein (1954)	$R_e = L$
Mikels & Klaer (1956)	$R_e = L \cdot (0,75 - 0,8)$
Mc Worther & Sunada (1977)	$R_e = L \cdot 0,61$

Manapság a különböző hidrodinamikai vizsgálatok szinte állandósult eszköze a számítógépes modellezés. Munkánk során mi a véges differencia módszert alkalmazó USGS fejlesztésű MODFLOW programot használtuk. A szakirodalom nagyrészt olyan hidraulikai szituációkat vizsgál, ahol a kutak függőleges helyzetben helyezkednek el. Habár a kutak nagyrészt ebben a helyzetben kerülnek kialakításra, a horizontálisan kialakított kutak használata egyre inkább előtérbe kerül (*Konikow és társai 2009*). Ezen kúttípusok javarészt az olajiparban és a víztermelésben használatosak.

A modellezéshez a Groundwater Modelling System 10.1-es verzióját alkalmaztuk, amelyben a MODFLOW programcsomag megtalálható. A MODFLOW szoftver egyik modulja a Multi Node Well 2 (MNW2), mely egy olyan véges differencia módszert alkalmazó program, amely egyaránt alkalmas több szinten szűrőzött kutak, horizontálisan elhelyezett, valamint ferdén fúrt kutak szivárgási viszonyainak szimulálására (*Konikow és társai 2009*). Munkánkban azt vizsgáljuk, hogy az MNW2 modul milyen modellezési körülmények között alkalmas a csápos kutak komplex hidraulikai, hidrodinamikai vizsgálatára.

MODELLEZÉSI EREDMÉNYEK

Munkánk során két kúttípust használtunk, melyet az 5. ábra szemléltet. Az 5. ábrán láthatjuk, hogy az egyik egy horizontálisan elhelyezett kút, mely felfogható egy kétágú csáposkútnak, a másik kúttípus pedig egy ötágú csáposkút. Ezen kúttípusokat alkalmazta Bakker és szerzőtársai (*Bakker és társai 2005*), melyek hidraulikai viszonyait analitikus elemek módszerével (AEM) szimulálták és a kapott eredményeket pedig összehasonlították egy rendelkezésre álló többréteges (multilayer) megoldással. Rendelkezésünkre állt egy korábbi modellezési eredmény is, melyben

a szerző a Bakker és szerzőtársai által használt kúttípusokat alkalmazta ugyanazon földtani körülmények között (Székely 2015), egy másik modellezési eljárással (CW). Ez utóbbi, pontosabbnak tekintett fél-analitikus megoldás fejlesztője egy független analitikus módszer eredményeihez (Morozov, 2018 2a, 2b ábrák) történő illesztéssel is verificálta. A két ábra a fajlagos beáramlás és a csápdepresszió arányának eloszlását dokumentálja a szűrők hossza mentén 4, illetve 8 csápos kutak esetében. Jelen cikkünkben a Bakker és szerzőtársai által elemzett modelleket vizsgáljuk. A modellek főbb paramétereit a 2. táblázat tartalmazza. Fontos körülmény az összehasonlítás szempontjából, hogy mindkét kúttípusnál körvonal menti utánpótlódással kell számolnunk, és a tápterület határa a kutak közepétől számított 100 m távolságban van. A szimuláció áramlástól mentes hidraulikai környezetben, vízszintes kezdeti nyomásszint mellett történik. Az MNW2 modul használatakor, annak érdekében, hogy a használt peremfeltételek hatása, valamint a csápok egyedi hatása ne legyen jelentős, megfelelő nagyságú modellméretet kellett alkalmaznunk. Van Tonder nyomán az utánpótlódási terület sugarát a csáphossz legalább ötszörösével kell felvenni ahhoz, hogy a csápok egyedi hatása ne jelentkezzen és körvonal menti utánpótlódással számolhassunk (Van Tonder és társai 2002).

A modellezés során az MNW2 modul használatakor meg kell adnunk azt, hogy milyen szivárgási veszteséggel számoljon a program a kútnál levő beépített vízszinteknél. A veszteségeket többféleképpen tudjuk számolni, melyeket legördülő listából tudunk kiválasztani. A veszteségek számítására az alábbi opciók választhatók:

- NONE: nincs veszteségi korrekció. A kútban lévő potenciálérték egyenlő a cellában lévő potenciálértékkel.

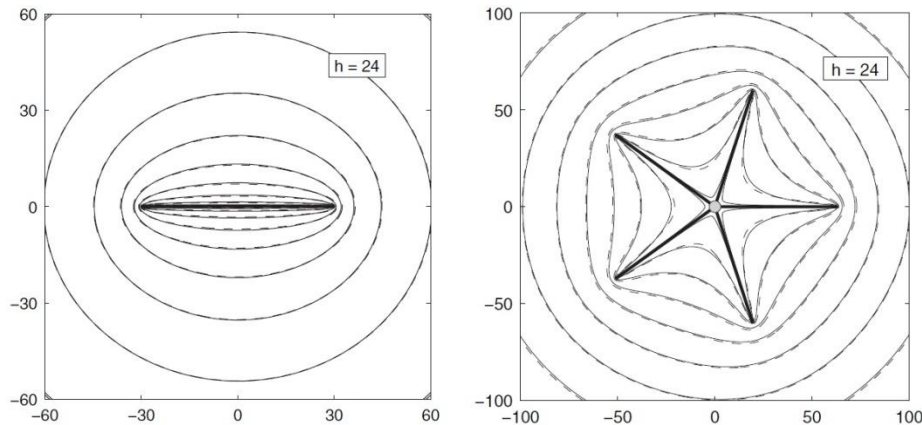
- THIEM: a kút-cella korrekciót a Thiem egyenlet alapján számolja a program (Thiem 1906). Ez esetben a kút sugarát kell megadnunk bemenő paraméternek.

- SKIN: Azt a hatást veszi figyelembe, amikor is a szűrők körül egy megváltozott, általában csökkent szivárgási tényezőjű zóna jön létre. Ez esetben bemenő paraméterként a skin zóna sugarát, és szivárgási tényezőjét kell megadnunk.

- GENERAL: az áramlási veszteség különböző együtthatókkal van figyelembe véve, melyeket a felhasználónak kell megadni input adatként.

- SPECIFYcwc: ebben az esetben bemenő paraméterként a kútgeometria mellett a kút-cella konduktancia érték (cell-to-well conductance) kézi megadása szükséges, amely érték a kút (jelen esetünkben a csáp), és a cella közötti hidraulikus vezetőképességet adja meg (Konikow és társai 2009).

Modellezésünk során két opciót választottunk annak érdekében, hogy az eredeti (Bakker és társai féle) modellezési körülményeknek megfelelőjünk. Az egyik esetben a THIEM, másik esetben a SPECIFYcwc opciót alkalmaztuk. A többi veszteségi számítási módszert nem alkalmaztuk, mert vagy nem volt információnk az input adatokról (GENERAL) vagy pedig egyáltalán nem számolt veszteséggel az adott módszer (NONE). A SKIN opció alkalmazásának hiánya azzal magyarázható, hogy az összehasonlítás alapjául szolgáló módszerek nem számolnak skin hatással. A számítási módszerek összehasonlítás alapja két ponton (a legfelső rétegben, valamint a csáp mélységében, a csápok kútaknába való csatlakozásánál) kialakult nyomásérték. A két eredmény különbségeit a kúttípusok eredményeinél részletezzük.



5. ábra. Horizontális kút, és ötágú csáposkút

Figure 5. Horizontal well, and radial collector well with five arms

2. táblázat. A modellekre vonatkozó fontosabb paraméterek
Table 2. Main parameters of the model

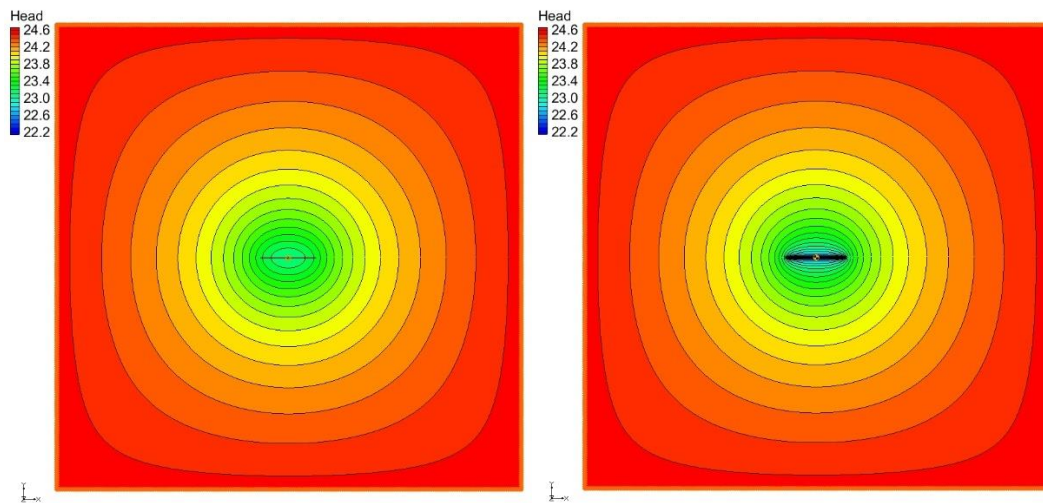
	Egyirányú vízszintes kút	Ötágú csápos kút
Szivárgási tényező (m/d)	150	150
Modell vastagsága (m)	24	24
Csápok mélysége (m)	21	21
Csápos kút hozama (m ³ /d)	12 000	60 000
Csáphossz (m)	30	60
Csápok belső sugara (m)	0,15	0,15

Egyirányú vízszintes kút

Ezen kúttípus vizsgálata során két módszerrel számítottuk a kialakuló vízszinteket. Korábban egy fél analitikus módszerrel (CW) (Székely 2015), amely az összehasonlítás alapot erősíti, majd pedig a véges differencia módszerrel (MODFLOW MNW2). A vízszintes helyzetben lévő kút 12 000 m³/nap hozammal termel. A rétegek felső szintje rendre 24; 16; 11; 7; 5; 4,05; 3,45; 3,15; 2,85; 2,55; 1,95, és 1 m (Bakker és társai 2005). Az 500x500 m területű modell permanens áramlásra vonatkozik. A kezdeti

vízszint 24 m. Az MNW2 által számított vízszinteket a 6. ábra mutatja. A kút hidraulikai veszteségeinek számításához két módszert használtunk az MNW2 alkalmazása során. A 3. táblázat mutatja a két számítási módszer eredmé-

nyei közötti különbséget. Láthatjuk, hogy a SPECIFYcwc opciót használva pontosabb eredményt kaptunk. Itt a cell-to-well conductance értéke 1 000-re lett megadva. Az adatok hasonlósága biztosítja a módszer alkalmazhatóságát.



6. ábra. Az MNW2 által számított vízszintek az első rétegben, valamint a csáp mélységében (egy vonalban létesített csápok)

Figure 6. Heads in the first layer, and in the depth of arms calculated by MNW2 (horizontal well)

3. táblázat. Vízszintek összehasonlítása (egy vonalban létesített csápok)

Table 3. Comparison of head values (horizontal well)

	MNW2 (THIEM)	MNW2 (SPECIFYcwc)	AEM	3D AEM	CW
Vízszint az első rétegben (m)	23,13	23,42	23,42	23,43	23,43
Vízszint a kút mélységében (m)	22,31	22,40	23,34	22,41	22,39

A 7. ábrán megfigyelhetjük, hogy három áramlási tartomány alakul ki a modellezett területen:

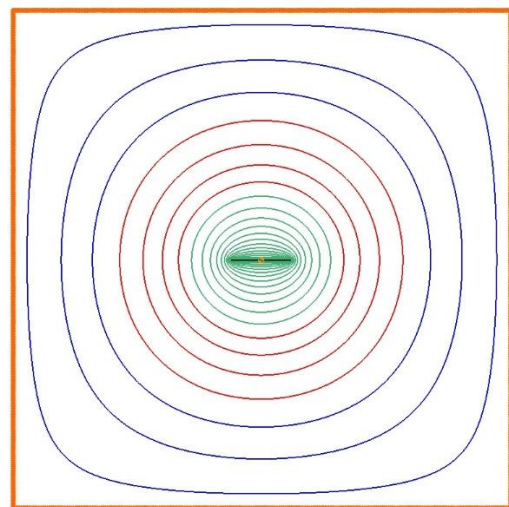
- ellipszis alakú 3D-s áramlási tartomány, melyet a csáp hatása okoz (zöld szintvonalak)
- radiális kör alakú áramlási tartomány (kör alakú piros szintvonalak)
- peremfeltétel által befolyásolt 2D-s áramlási tartomány (kék szintvonalak).

A középső, markánsan jelentkező radiális áramlási tartomány igazolja a modellek összehasonlíthatóságát, vagyis azt, hogy ezen esetben is körvonal menti utánpótlódási területtel számolhatunk.

Ötágú csáposkút

Ebben az esetben is a már említett két módszerrel számítottuk a kialakuló vízszinteket melyeket az 5. táblázatban CW (Szekely 2015) és MNW2 jelöléssel láthatunk. Az ötágú csáposkút hozama 60 000 m³/nap hozamot termel. Az alkalmazott rétegek felső szintje megegyezik az egyirányú vízszintes kútnál alkalmazottal. Ezen számítás is permanens esetre vonatkozik, egy permanens (steady-state) állapotot vizsgál. A kialakult vízszinteket a 8. ábra

mutatja, valamint a 4. táblázatban láthatjuk a kút közepénél kialakult vízszinteket. Megfigyelhető a 4. táblázatban, hogy a SPECIFYcwc opciót használva itt is pontosabb értéket kaptunk, mint a THIEM opciónál. A cell-to-well conductance értéke ebben az esetben 1 250 volt.



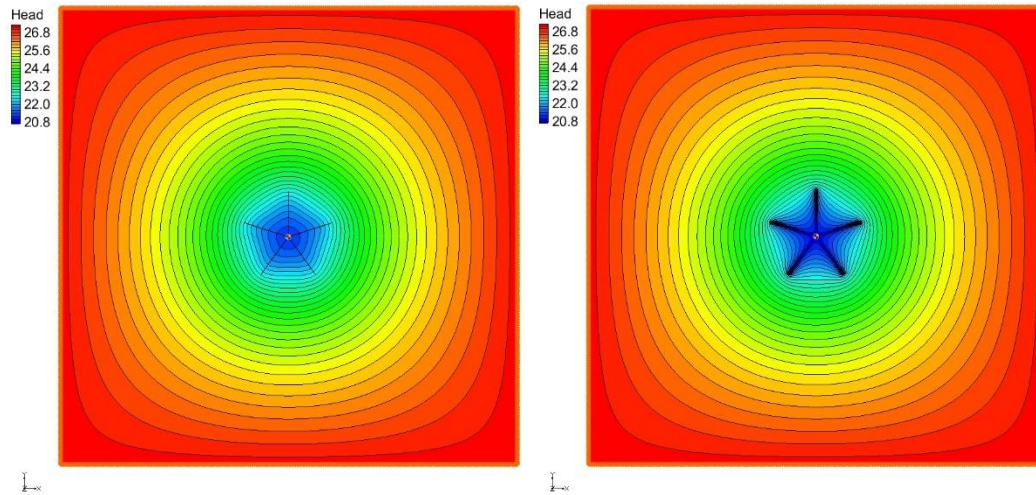
7. ábra. Az egyirányú vízszintes kútnál kialakuló áramlási tartományok

Figure 7. Different types of flow space at the horizontal well

4. táblázat. Vízszintek összehasonlítása (ötágú csáposkút)

Table 4. Comparison of head values (collector well with five arms)

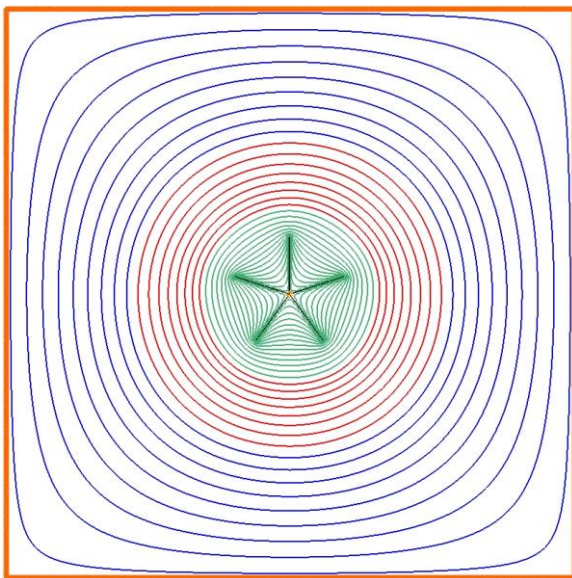
	MNW2 (THIEM)	MNW2 (SPECIFYcwc)	AEM	3D AEM	CW
Vízszint az első rétegben (m)	21,28	21,41	21,44	21,46	21,45
Vízszint a kút mélységében (m)	20,82	20,79	20,74	20,82	20,78



8. ábra. Vízsintek az első rétegben, valamint a csáp mélységében (ötágú csáposkút)

Figure 8. Heads in the first layer and in the depth of the arms calculated by MNW2 (collector well with five arms)

A kialakuló három markáns áramlási tartományt a 9. ábra mutatja. Megfigyelhetünk egy tengeri csillagra emlékeztető áramlási zónát, melyet a csápok hatása alakít ki. Jelen esetben is látható a markáns radiális áramlási zóna, valamint a peremek által befolyásolt áramlási tartomány.



9. ábra. Az ötágú csáposkútnál kialakuló áramlási tartományok
Figure 9. Different flow spaces at the radial collector well with five arms

ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott munka során a parti szűrésű vízbázisok egyik fontos víztermelő műtárgyával, a csápos kutakkal foglalkoztunk. Ezen vízbázisok jelentőségét mutatja, hogy a hazai ivóvíz termelés nagyjából 35 %-ban parti szűrésű vízbázisokra támaszkodik. Jellemzőjük a földtani és hidrogeológiai változékonyság, valamint a különböző hidraulikai folyamatok bonyolultsága. Különös tekintettel kell lennünk arra, hogy Budapest vízellátása nagy részben a Szentendrei-sziget, valamint a Csepel-sziget csápos kútjaiból történik. Munkánk célja volt, hogy ezen kutak hidraulikai viszonyait vizsgáljuk. Vizsgálatunk tárgya két kúttípus volt: egy horizontálisan kialakított kút, valamint egy ötágú csáposkút. Homogén, izotróp közegben, körvonal

menti utánpótlódás mellett azt modelleztük, hogy ezen kutak termelése során milyen vízszintek alakulnak ki. A modellezéshez egy fél-analitikus (CW), valamint egy véges differencia módszer alkalmazó programot (MODFLOW MNW2) használtunk. Az MNW2 használatakor, az áramlási veszteségeket kétféleképpen vettük figyelembe. Az egyik esetben a Thiem (1906) által javasolt számítást használta a program, míg a másik esetben egy úgynevezett cell-to-well conductance (CWC) érték kézi megadására volt szükség. A CWC értékeket megfelelően beállítva pontosabb eredményeket kaptunk. A számított eredményeket összehasonlítottuk Bakker és szerzőtársai által publikált eredményekkel (Bakker és társai 2005), amelyben a szerzők két másik független számítási módszert alkalmaztak. Az összehasonlítások során jó egyezést találtunk a számított vízszintek között. Ez az egyezés lehetővé teheti, hogy a jövőben valós földtani körülmények között szimuláljuk a csápos kutak hidraulikai viszonyait, valamint lehetőség nyílik különböző scenáriók vizsgálatára is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmányban ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALOMJEGYZÉK

123/1997. (VII. 18.) Korm. rendelet a vízbázisok, a távlati vízbázisok, valamint az ivóvízellátást szolgáló vízellátási intézmények védelméről.

Babac D., Babac P. (2009). Wells with horizontal drains, Theory, practice, calculation examples, Belgrade.

Bakker M., Kelson V. A., Luther H. K. (2005). Multi-layer analytic element modeling of radial collector wells, Ground Water, 43(6) 926-934.

Hiscock K.M., Grischek T. (2002). Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. Journal of Hydrology 266, pp. 139-144.

Ilyés Cs., Turai E., Szűcs P. (2016). 110 éves hosszúságú hidrometeorológiai adatsorok ciklikus paramétereinek vizsgálata, Hidrológiai közlöny, 96(1) 61-70.

Ilyés Cs., Turai E., Szűcs P., Zsuga J. (2017). Examination of cycle properties of 110-year-long precipitation time series, Acta Montanistica Slovaca, 22(1) 1-11.

Kármán K. (2013) A parti szűrésű vízbázisok, és jelentőségük, Magyar Tudomány, 174(2). 1300-1307.

Konikow, L.F., Hornberger, G.Z., Halford, K.J., and Hanson, R.T. (2009). Revised multi-node well (MNW2) package for MODFLOW ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A30, 67 p.

Kruseman, G. P., De Ridder N. A. (1994). Analysis and evaluation of pumping test data, Second edition (Completely revised), ILRI Publication, 107-108.

Morozov P. E. (2018). Steady fluid flow to a radial sys-

tem of horizontal wells, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 59(2) 1-8.

OVF (2015). A Duna-vízgyűjtő magyarországi része. Vízyűjtő-gazdálkodási Terv. 2016. április. http://www.vizugy.hu/vizstrategia/documents/E3E737A3-3EBC-4B6F-973C-5DD9B8A6DBAB/OVGT_foanyag_vegleges.pdf

Ray C., Melin G., Linsky R. B. (2002). Riverbank filtration, Improving source-water quality, Water Science and Technology Library, ISBN 1-4020-1133-4.

Székely F. (2015). Integrated well flow modeling, LAP LAMBERT Academic Publishing 104-115.

Thiem, G. (1906). Hydrologische Methoden; Gebhardt, Leipzig.

Van Tonder G., Bardenhagen I., Riemann K., Van Bosch J., Dzanga P., Xu Y. (2002). Manual on pumping test analysis in fractured-rock aquifers, WRC Report No 1116/1/02, ISBN No 1 86845861.

A SZERZŐK



NYIRI GÁBOR 2013-ban végzett a Miskolci Egyetemen környezetmérnök alapszakon, majd tanulmányait a Miskolci Egyetem hidrogeológus mérnöki mesterszakán folytatta, ahol 2015-ben szerzett okleveles hidrogeológus mérnök végzettséget. 2015-től 2016-ig az Északmagyarországi Regionális Vízművek Zrt. környezetvédelmi megbízottja. 2016-tól a Miskolci Egyetem Mikovinyi Sámuel Földtudományi Doktori Iskolájának PhD hallgatója. 2015-től a Magyar Hidrológiai Társaság tagja.

SZÉKELY FERENC Bányamérnök hidrogeológus, 1967-1970 között a Magyar Állami Földtani Intézetben, 1970 és 2005 között megszakítással a VITUKI-ban dolgozott. 1989 és 2000 között a Kuvaiti Tudományos Kutató Intézet kutatója. Kiemelt kutatási területei a felszín alatti vízáramlások, az oldat- és hőtranszport folyamatok numerikus modellezése, valamint a nem hagyományos, főként sokréteges kúthidraulikai problémák elemzése. Kutatási eredményei a kutas vízművek tervezése és védelme, felszín alatti édesvíz tározási, drénezési, talajvízből történő hőszivattyús fűtési projektekből, valamint a bátaapáti repedezett gránitformációban végzett egyedi és csoportos fűrészték értelmezésénél hasznosultak. Közel 90, fele részben angol nyelvű publikációt készített, közöttük 3 önálló kiadvány található. MTA doktor, címzetes egyetemi tanár, két ciklusban az MTA FTB Hidrogeológiai Albizottságának az elnöke. Kúthidraulikai témakörben az ELTE és a Miskolci Egyetem hallgatóit oktatja.

ZÁKÁNYI BALÁZS 2006-ban végzett okl. környezetmérnökként a Miskolci Egyetemen. 2009-től dolgozik Műszaki Földtudományi Kar Környezetgazdálkodási Intézetében, jelenleg egyetemi docens 2018-tól. Nemzeti Kiválóság Program - Jedlik Ányos doktorjelölti ösztöndíjas (2013). Fő kutatási területe a speciális felszín alatti szennyezőanyagok (DNAPL) vizsgálata, modellezése és kármentesítése, valamint árvízvédelmi gátak hidraulikai modellezése, az előbbiből PhD fokozatot szerzett 2014-ben. Tevékenységi és érdeklődési köre a környezetvédelem- hidrogeológia - kármentesítés területén sokirányú. Az International Association of Hydrogeologist Magyar Nemzeti Tagozatának elnökségi tagja. Publikációinak száma 91.

SZÚCS PÉTER a Nehézipari Műszaki Egyetem Bányamérnöki Karán szerzett kitüntetéses geofizikus-mérnöki oklevelet 1988-ban. Oktatói és kutatói pályájának elején először a Geofizikai Tanszéken, majd az MTA Bányászati Kémiai Kutatólaboratóriumában dolgozott. 1993-ban Dr. Univ. címet, majd 1996-ban PhD doktori oklevelet szerzett. 2009-ben megszerzi az MTA doktora tudományos címet, illetve sikeresen habilitált a Miskolci Egyetemen. 1998 óta a Miskolci Egyetem Hidrogeológiai – Mérnökgeológiai Tanszékén dolgozik. 2010-től a tanszék vezetője. 2010-ben egyetemi tanári kinevezést kapott. Az MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport vezetője 2012-től. Publikációinak száma több mint 450. 1998-tól a Magyar Hidrológiai Társaság tagja. A Hidrológiai Közölny szerkesztőbizottságának tagja.

Szivárgási tényező laboratóriumi meghatározása szemeloszlási görbe és kisminta-modell felhasználásával

Farkas Dávid*, Farkas-Karay Gyöngyi* és Hegedűs Noémi*

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. mf. 12. (E-mail: farkas.david@epito.bme.hu, karay.gyongyi@epito.bme.hu, hegedus.noemi@gmail.com)

Kivonat

A szivárgási tényező meghatározása rendkívül fontos számos mérnöki terület, így a talajmechanika, a szivárgáshidraulika és a mélyépítés számára is, ám a feladat sokszor igen időigényes és költséges vagy egyszerű ugyan, de pontatlan és/vagy pontszerű. Jelen munkánkban bemutatunk hat egyszerű és közismert egyenletet, melyek alkalmasak a szivárgási tényezőnek a szemeloszlási görbe eredményeiből való meghatározására. Ezen túl bemutatjuk a kutatásunk során felhasznált laboratóriumi kisminta-modellünket, amely próbaszivattyúzások ellenőrzött laboratóriumi keretek közötti vizsgálatára szolgál. Munkánkban összehasonlítjuk a közelítő egyenletekkel és a laboratóriumban végrehajtott próbaszivattyúzások kiértékelésével kapott szivárgási tényezőket. A permanens és nem-permanens körülmények között végrehajtott modellvizsgálatok és a bemutatott egyenletek eredményeit felhasználva értékeljük az egyes közelítő módszerek és a laboratóriumi kisminta használhatóságát a szivárgási tényező meghatározására.

Kulcsszavak

Próbaszivattyúzás, szivárgási tényező, kisminta modell, szemeloszlási görbe, Theis-módszer, Dupuit-módszer.

Laboratory determination of hydraulic conductivity using the grain-size distribution curve and a small-scale physical model

Abstract

The determination of the hydraulic conductivity, which is often a time- and resource-consuming or uncertain effort, is a very important task in the field of soil mechanics, seepage hydraulics and underground building. In our study some simple and frequently used equations are presented, which use the grain-size distribution data to estimate the hydraulic conductivity. In addition, a laboratory sandbox model is displayed, which was built for analysing of pumping tests in small scale and controlled environment. In this study some hydraulic conductivity values of coarse sand, calculated with different methods are compared to each other. The specific values of the grain-size distribution and pumping test data achieved in the laboratory model are used to estimate the hydraulic conductivity. Both steady-state and transient pumping tests were analysed in the sandbox model. The results of the analysis and the comparison help us to select the most accurate approximating equation and validate the use of the laboratory model for determining hydraulic parameters.

Keywords

Pumping test, hydraulic conductivity, sandbox model, grain-size distribution, Dupuit equation, Theis equation.

BEVEZETÉS

Mélyépítési mérnöki munkák elvégzéséhez nélkülözhetetlen az adott területre jellemző áteresztőképességi együttható ismerete, melyet terepi mérésekkel vagy laboratóriumi vizsgálattal határozhatunk meg.

A talajmintákon végzett laboratóriumi kísérletek főbb típusai az ödométeres, triaxiális vagy szemeloszlási vizsgálatok. Ezek előnye, hogy segítségükkel egyszerűen és olcsón meg tudjuk határozni a talaj áteresztőképességét, hátrányuk, hogy a mintavétel pontszerű, emiatt a vizsgálat csak egy kisebb területről nyújt releváns információt, illetve a minta zavart, ami tovább torzíthatja a vizsgált talajra meghatározott szivárgási tényezőt. A terepi vizsgálatok nagy előnye a laborvizsgálatokkal szemben, hogy in situ állapotban vizsgálhatók a talajfizikai paraméterek, így pontosabb eredményeket szolgáltatnak, végrehajthatásuk azonban idő-, felszerelés- és költségigényesebb.

A próbaszivattyúzás a mérnöki gyakorlatban széles körben elterjedt terepi vizsgálati mód. A BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék Laboratóriumában már 2011 óta folyik a próbaszivattyúzások során lezajló folyamatok kisminta-moddal való vizsgálata. A kifejezetten erre a célra készített modellel szivárgás- és kúthidraulikai para-

méterek mérését végezzük permanens, illetve nem permanens állapotra egyaránt, ismert szemeloszlású talajban. Jelen cikkben összegyűjtöttünk számos hazai és nemzetközi gyakorlatban elterjedt számítási módszert, melyek a szemeloszlási görbe egyes paramétereinek segítségével adják meg a szivárgási tényezőt, és bemutatjuk az elvégzett permanens és nem-permanens vizsgálatokat, valamint az azokból számítható vízáadó-paramétereket. Célunk, hogy a laboratóriumi körülmények adta előnyöket felhasználva a különféle módszerek eredményeit összehasonlítsuk és elemezzük, támpontokat adva a szivárgási tényező meghatározásához.

A KISMINTAVIZSGÁLATOK ELMÉLETI HÁTTERE

A hidromechanikai kisminta-vizsgálatok elméletének alapfogalma a rendszerek, folyamatok, jelenségek hasonlósága. Hasonlónak nevezzük azokat a hidromechanikai folyamatokat, amelyekben az egymásnak megfelelő jellemző mennyiségek viszonya állandó. Ez akkor teljesül, ha geometriai (C), kinematikai (C_i) és dinamikai (C_F) értelemben a valós és modell mennyiségek közötti arányok állandóak maradnak (Ivicsics 1968), ahol C a kétféle lépték közötti arányszámot jelöli.

A kisminta-törvényekkel kapcsolatosan jelen cikkben csak a legszükségesebb fogalmakat, levezetéseket mutatjuk be. További információ nyerhető *Mosonyi és Kovács (1952)*, *Öllös (1957, 1970)*, *Ivicsics (1968)*, *Klauder (2010)* szakirodalmakból, illetve az itt bemutatott kisminta-modellhez kapcsolódóan ajánljuk még a *Barta és társai (2012, 2013)*, *Szabó és társai (2012)*, *Víg és társai (2016)* cikkeket.

Mosonyi-Kovács modelltörvény

Mosonyi és Kovács (1952) az átszámítási tényezők meghatározása során a nehézségi és belső súrlódásból származó erők egyenlőségéből indult ki és a nagyméretű szivárgási folyamat (1. egyenlet), valamint kicsinyített megfelelője (2. egyenlet) esetére az

$$I' \gamma' l' z'^2 \pi = 2 \pi z' l' \frac{dv'}{dz'} \eta' \quad [1]$$

és az

$$I' \gamma'' l'' z''^2 \pi = 2 \pi z'' l'' \frac{dv''}{dz''} \eta'' \quad [2]$$

egyenleteket írták fel, ahol:

- I a hidraulikus gradiens [-]
- η a dinamikai viszkozitás [Ns/m²]
- γ a víz térfogatsúlya [N/m³]
- z a geodéziai magasság [m]
- l a szivárgási hossz [m]
- v a szivárgási sebesség [m]

Ebből levezethető a következő egyenlet:

$$\frac{v'}{v''} = 1 \quad [3]$$

Feltételezve, hogy a Darcy-törvény érvényes, felírható a

$$k' l' = k'' l'' \quad [4]$$

egyenlőség, ennek alapján pedig, feltételezve, hogy a kismintavizsgálatok esetén ugyanolyan a talaj, mint amelyben a nagyméretű szivárgási folyamat lejátszódik, és így

$$k' = k'' \quad [5]$$

végeredményül az

$$I' = I'' \quad [6]$$

egyenlőségre jutunk (*Ivicsics 1968*).

A hasonlóág feltételezése miatt a talaj szemcsenagyságát is az arányszámnak (C) megfelelően kicsinyíteni kellene. Azonban, ahogy azt a Mosonyi-Kovács törvény kimondja, mivel a modellben és a valóságban lezajló folyamatokat úgy tekintjük hasonlóknak, hogy feltételezzük a Darcy-törvény érvényességét, így ugyanazon szivárgási tényezővel jellemezhető talaj alkalmazása esetén a vízmozgás során a két léptékben megegyező hidraulikus gradiensek és szivárgási sebességek fognak kialakulni. Ebből következik, hogy ha a modellben és a valós méretben alkalmazott talaj szivárgási tényező értékei megegyeznek, akkor a talajjellemzők és a szemcseméret közötti összefügg-

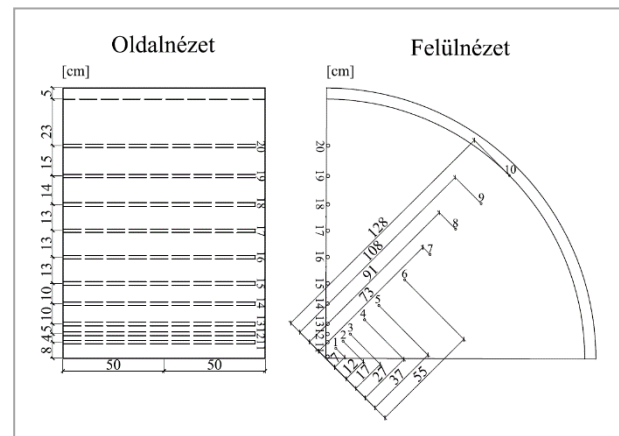
és miatt a két léptékben a szemcseméret is egyenlő lesz (*Darcy 1856, Mosonyi 1955*).

A KISMINTAMODELL PARAMÉTEREINEK ISMERTETÉSE

A vizsgálatok elvégzésére a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék laboratóriumában került sor.

Az alkalmazott kisminta-modell negyedköröcikk alaprajzú, két oldalfala által bezárt szöge 90°. A modell teljes sugara a termelőkút tengelyvonalától 133,5 cm, a felső vízbetápláló peremként szolgáló víztérig tartó sugár 128,0 cm. A modell teljes magassága 100,0 cm, szerkezetének tömege 100 kg, térfogata 1,4 m³ (1. ábra).

A valóságban a próbaszivattyúzások hengersizmetrikus leszívási folyamatot eredményeznek, a kisminta-modell ennek megfelelően negyed köröcikk alakú, és vizsgálati eredményeit a modell alakja nem torzítja (*Barta és társai 2012, Szabó és társai 2012*).



1. ábra. Kismintamodell oldal- és felülnézeti ábrája
Figure 1. Side and top view of the physical model

A mérések során kialakuló leszívási görbét 10 db fenéklemezen lévő és 10 db oldalfalon lévő piezométerrel regisztráltuk. Ezek mellett 10 db megfigyelő kutat is beépítettünk modellünkbe (1. kép). A 10 darab kút távolsága az oldalfaltól: 8, 12, 17, 27, 37, 50, 63, 76, 90 és 105 cm (1. ábra). Az érzékelő kutak perforált csövek, melyek szintén geotextília burkolatot kaptak, hogy megelőzzük a finom frakció bemosódását. A piezométerek és a megfigyelő kutak nyomásszintjeit piezotáblán olvastuk le. A betápláló vízteret geotextíliával burkolt rács választja el a talajjal megtöltött résztől. A fémrács a fizikai elhatárolást biztosítja, a geotextília az apró szemcsék szűrésére szolgál, hogy azok ne mosódjanak a víztérbe. A vízbevezetésnél, és a vízkivételnél is bukót alkalmaztunk, így a leszívást a két bukó szintkülönbsége generálta, ez a vizsgálatok során egyenletes hozamú vízkivételt eredményezett. A bukókban egy-egy laborhőmérő van annak érdekében, hogy a modellbe be- és kilépő víz hőmérsékletét regisztrálni tudjuk (2. kép).

Az anyakútban lévő nyomásmagasságot szintén piezocső kivezetéssel olvastuk le.



1. kép. A közepes homokmintával feltöltött modell a megfigyelő kutakkal
Photo 1. Sandbox model with medium sand sample with observation wells

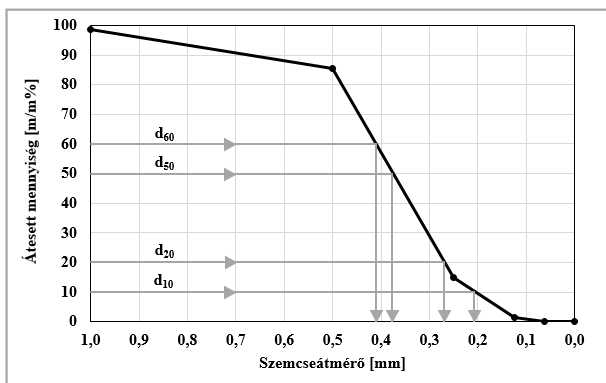


2. kép. Az alsó peremként szolgáló körbukó
Photo 2. Weir for control the pumping well

A vizsgált talajminta tulajdonságai

A kisminta-modellben lévő 0-1-es közepes homokot szabványos szitasorral értékeltük ki. A minta szemeloszlási görbéjét a 2. ábrán láthatjuk. A szemeloszlási görbe alapján leolvastuk és kiszámítottuk a legfontosabb jellemző értékeket, melyeket az 1. táblázatban foglaltuk össze, ahol:

- d_{60} átesett tömegmennyiség 60 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm],
- d_{50} átesett tömegmennyiség 50 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm],
- d_{20} átesett tömegmennyiség 20 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm],
- d_{10} átesett tömegmennyiség 10 %-ához tartozó szemcseátmérő (hatékony szemcseátmérő) [mm],
- U egyenlőtlenségi mutató [-].



2. ábra. A vizsgált talajminta szemeloszlási görbéje
Figure 2. Grain-size distribution of the medium sand sample

1. táblázat. Szemeloszlási vizsgálatból meghatározott paraméterek
Table 1. Results from the grain-size distribution

Paraméter	Érték
d_{60} [mm]	0,41
d_{50} [mm]	0,38
d_{20} [mm]	0,27
d_{10} [mm]	0,21
U [-]	1,95

SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSÁRA HASZNÁLT MÓDSZEREK

Szemeloszlási görbe alapján

A vizsgált talajminta szemeloszlási görbéjét több módszerrel is kiértékeltek annak érdekében, hogy pontos képet kaphassunk ezen összefüggések alkalmazhatóságáról és megbízhatóságáról.

Seelheim (1880) összefüggése volt az első, mely szemcseméret alapján határoz meg szivárgási tényezőt (*Fuchs 2010*). A 7. egyenletben szereplő „A” paramétert *Seelheim (1880)* 0,0037-re vette fel. Ezen paraméterre *Hagen (1869)* 0,0036, *Jáky (1944)* 0,01, *Kröber (Éliás és Juhász 1966)* 0,0041 értéket határoztak meg saját kutatásaik alapján. *Jordan és Weder (1995)* javasolták, hogy az összefüggést csak $U < 5$ egyenlőtlenségi mutatóval rendelkező talajmintáknál alkalmazzák.

$$k[m/s] = A * d_{50}^2[mm] \quad [7]$$

Hazen (1892) eredetileg vízkezelésnél használt homokszűrők töltetanyagát vizsgálta. Az általa felírt összefüggés (8. egyenlet) sajátossága, hogy a C_d dimenzió nélküli konstans függ az egyenlőtlenségi együtthatótól:

$$k[m/s] = C_d * d_{10}^2[mm] * (0,7 + 0,03 * T_{GW}[^{\circ}C]) \quad [8]$$

ahol:

- T_{GW} a felszín alatti víz hőmérséklete ($^{\circ}C$),
- $C_d = 0,0139$, ha $1,0 < U < 3,0$, és $C_d = 0,0116$ ha $3,0 < U < 5,0$ (*Skaballanowitsch 1954*).

A U.S. Bureau of Soil Classification által javasolt, szivárgási tényező meghatározására alkalmas egyenletet több szerző is idézi (*Lee (1938)*, *Mallet és Pacquant (1951)*, *Richter (1966)*, *Bialas és Kleczkowski (1970)*). Az egyenlet a szemeloszlási görbe alapján kapott 20%-os valószínűséghez tartozó értéket használja fel (d_{20}):

$$k[m/s] = 0,0036 * d_{20}^2[mm] \quad [9]$$

Az itt bemutatott módszerek segítségével meghatároztuk a modellben alkalmazott homok szivárgási tényezőjét. Ezeket az értékeket a jobb áttekinthetőség és összehasonlíthatóság kedvéért a laboratóriumi eredmények bemutatását követően, az ott kapott értékekkel együtt mutatjuk be (6. táblázat).

A vizsgálatokhoz használt elméleti módszerek mellett még számos olyan összefüggést ismerünk, melyek egyéb paraméterek (hézagtényező, hézagterefogat, szemcsealak, folyadék viszkozitás stb.) figyelembevételével alkalmasak szivárgási tényező meghatározására: *Schlichter (1899), Zauberei (1932), Fair és Hatch (1933), Koženy (1933), Lindquist (1933), Terzaghi (1943), Zamarin (1954), Fedorov (1956), Istomina (1957), Beyer (1967), Bear (1972), Kovács (1981), Juhász (1987)*. Mivel kísérleteink során ezeket a tulajdonságokat a talajmintára vonatkozóan nem tudtuk megmérni, így jelen cikkben ezeket az elméleti módszereket nem használtuk fel.

Próbaszivattyúzás alapján

A kismintán végzett permanens vizsgálatok eredményeinek kiértékeléséhez a Dupuit-képletet használtuk, mely a mérnöki gyakorlatban igen elterjedt módszer (*Dupuit 1863*):

$$k = \frac{Q}{\pi} * \frac{\ln \frac{x_1}{x_2}}{y_1^2 - y_2^2} \quad [10]$$

ahol:

- x_1 a távolabbi megfigyelőkút távolsága a szivott kúttól [m],
- x_2 a közelebbi megfigyelőkút távolsága a szivott kúttól [m],
- y_1 a távolabbi megfigyelőkútban a leszívást követő vízoszlopmagasság [m],
- y_2 a közelebbi megfigyelőkútban a leszívást követő vízoszlopmagasság [m].

Számos olyan módszer, ami a szivattyúzás nem permanens vízmozgással jellemezhető szakaszának kiértékelésére szolgál, a Theis-összefüggéssből indul ki. Munkánk során mi a szabadfelszíni vízádókra módosított változatot használtuk. Az egyenlet általános formája (*Theis 1935*):

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi * T} * \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi * T} * W(u) \quad [11]$$

ahol:

- Q a szivattyúzott hozam [m³/s],
- s a szivattyúzás hatására kialakuló vízszintsüllyedés [m],
- t a szivattyúzás kezdetétől eltelt idő [s],
- S a tárolási tényező [-],
- T a transzmisszivitás [m²/s],
- $W(u)$ a Theis-féle kútfüggvény, ahol:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Szabadfelszíni vízádók esetén a Theis-képletbe a mért leszívás helyett egy korrigált leszívást helyettesítünk be, amelyet a következőképpen számolhatunk:

$$s' = s - s^2/2b \quad [12]$$

ahol

- s a szivattyúzás hatására kialakuló vízszintsüllyedés [m],
- s' a korrigált vízszintsüllyedés értéke [m],
- b a telített rétegvastagság [m].

Ez az úgynevezett Jacob-féle korrekció lehetővé teszi a Theis-görbe illesztését a korrigált leszívás-idő értékpárokra (*Jacob 1944, Kruseman és de Ridder 1994*).

MÉRÉSI EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE

Permanens mérések

A kismintán végzett permanens vízmozgású mérések során az anyakútban különböző mértékű leszívást hoztunk létre az alsó bukó szintjének, és így a kitermelt hozamnak a változtatásával. A felső peremfeltétel, az állandó víztér, és az anyakútban kialakult vízszint közötti nyomáskülönbséget egységesen 3 cm-es lépcsőnként változtattuk. A bukók alkalmazása biztosította a felső és alsó peremfeltételek között az időben állandó nyomáskülönbséget, így a kitermelt vízhozam időben nem változott. A különböző peremfeltételek hatására kialakuló leszívási görbéket a piezométerekben és a megfigyelő kutakban kialakult nyomásszintek alapján rögzítettük. Adott peremfeltételek mellett elvégzett vizsgálatot abban az esetben tekintettük időben állandónak, ha két egymás után regisztrált mérésben ugyanazon értékeket kaptunk mind a vízhozamokban, mind a nyomásszintekben.

A mérési eredményeket a Dupuit-módszer segítségével értékeltük ki. A megfigyelő kutakat párokba rendeztük (1-2., 1-3., 1-4., ..., 10-9.), majd a kútpárokból észlelt nyomásszintek és az anyakútból kitermelt hozam alapján számoltuk a szivárgási tényezőket. Az így meglévő, mérésenkénti 45 darab adatból állítottunk elő átlagos szivárgási tényezőt, mely az adott mérés peremfeltételei mellett a teljes modellter talajmintáját jellemzi. A minimális és maximális leszívás között összesen 27 mérést végeztünk. Ez által 27 darab átlagos szivárgási tényező állt rendelkezésünkre, melyek $2,16 * 10^{-4}$ - $2,64 * 10^{-4}$ m/s közötti értékeket vettek fel (2. táblázat). Ezen szivárgási tényezők átlaga $2,25 * 10^{-4}$ m/s, szórása pedig egy nagyságrenddel kisebb, $1,05 * 10^{-5}$ m/s, ami a mérések pontosságát mutatja.

Nem permanens mérések

Az időben állandósult szintekkel elvégzett vizsgálatokon túl nem permanens méréseket is végeztünk, amelyek során megfigyeltük, hogy adott leszívásnál az idő függvényében hogyan változnak a modellter egyes pontjaiban a nyomásszintek. A mérésekhez egyidejű leolvasások szükségesek mindegyik megfigyelőkútról, ezért szükségesnek láttuk kép- vagy videórögzítő eszköz alkalmazását. Az FI9903P IP típusú kamerát (<https://foscam.hu/termek/fi9903p-ip-kamera>) a piezotábla elé egy állványhoz erősítettük, hogy a felvétel közben a kamera mozdulatlan maradjon. Az egyes méréseket így az interneten valós időben követhettük.

A mérés kezdeti időpontját a vízkitermelés elindítása jelentette, vagyis az alsó peremet szabályozó bukó előre meghatározott nyomásszintre történő beállítása. Ezt követően az alsó perem beállításával a piezotáblán láthatóvá

váltak az anyakútban, valamint a megfigyelőkutakban bekövetkező nyomásszint-változások. Az időben változó vízszintekről felvételeket készítettünk a vízkitermeléstől eltelt időtartamtól függő sűrűségben. Ezeket a lépésközöket több szakirodalom is tárgyalja, de ezek egymástól - részben - eltérnek. A szakirodalmak által javasolt időközöket a 3. táblázatban láthatjuk. Az időtartamokat össze-

vetve és a kisminta-modellezés méretcsökkentő hatását is figyelembe véve meghatároztuk, az általunk alkalmazandó időlépéseket, amivel a lehető legpontosabban és leghatékonyabban ki lehet mutatni a nyomásszintek időbeli változását. A 3. táblázatban megadott értékeket a kisminta méretei miatt C arányszámmal osztani kell, így jutunk el a modellünkben alkalmazható időlépésekhez (4. táblázat).

2. táblázat. A permanens mérések Dupuit-módszerrel feldolgozott eredményei
Table 2. Result of the steady-state measurements evaluated with Dupuit-method

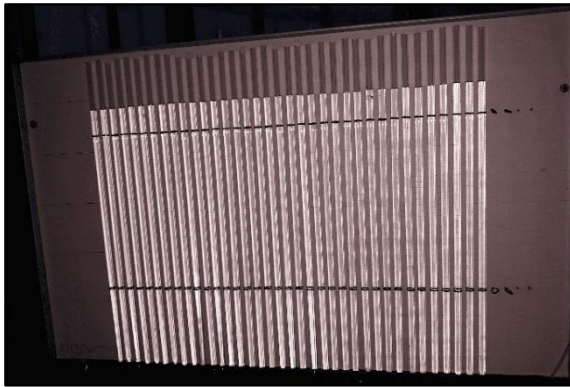
Mérés sorszáma	Leszívás [m]	Hozam [l/min]	Szivárgási tényező [m/s]
1.	0,03	0,36	2,64E-04
2.	0,04	0,46	2,17E-04
3.	0,06	0,68	2,39E-04
4.	0,07	0,84	2,37E-04
5.	0,09	0,95	2,38E-04
6.	0,10	1,04	2,32E-04
7.	0,11	1,14	2,30E-04
8.	0,13	1,28	2,31E-04
9.	0,14	1,36	2,24E-04
10.	0,15	1,44	2,21E-04
11.	0,17	1,52	2,21E-04
12.	0,18	1,60	2,21E-04
13.	0,19	1,70	2,21E-04
14.	0,21	1,76	2,16E-04
15.	0,22	1,84	2,19E-04
16.	0,22	1,84	2,17E-04
17.	0,23	1,94	2,20E-04
18.	0,25	2,00	2,20E-04
19.	0,27	2,08	2,17E-04
20.	0,28	2,12	2,19E-04
21.	0,29	2,16	2,16E-04
22.	0,31	2,24	2,19E-04
23.	0,33	2,28	2,15E-04
24.	0,33	2,32	2,20E-04
25.	0,35	2,38	2,22E-04
26.	0,36	2,44	2,25E-04
27.	0,38	2,46	2,25E-04

3. táblázat. Szakirodalmi ajánlások a próbaszivattyúzás alatti vízszintmérések gyakoriságára
Table 3. References to the frequency of water level measurements during pumping tests

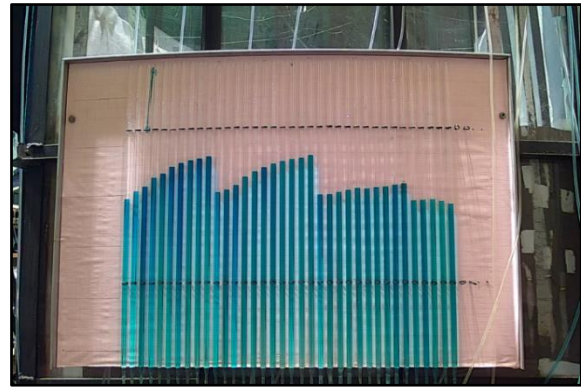
Szivattyúzás kezdete óta eltelt idő [min]		0-5	5-10	10-20	20-40	40-60	60-120	120-300
Vízszintmérés gyakorisága [min]	Newfoundland & Labrador DEC (2010)	1		2	5		10	-
	SERAS (1994)	0,5-1		1	5		30	
	Leonhardt, Andrä und Partner (2012)	0,5		1	2	5	10	-
	USA EPA (1994)	0,5		1	5		30	
	Ohio EPA (2006)	0,5	5			20		60
	Paul S Osborne (USA EPA) (1993)	0,5-1		1	5		10	30
	Maine EPA (2005)	1		5			30	
	New York DEC (2018)	1		5			10	30

4. táblázat. A mérések során alkalmazott vízszintmérések gyakorisága
Table 4. Used frequency of water level measurements during the pumping tests

Szivattyúzás kezdete óta eltelt idő [min]	Vízszintmérés gyakorisága [min]
0-1	1/60
1-5	1/12
5-10	1/6
10-20	1/3
20-30	1/2
30-60	1



3. kép: Piezométertábla eredeti színekben
Photo 3. Piezometers with original colours

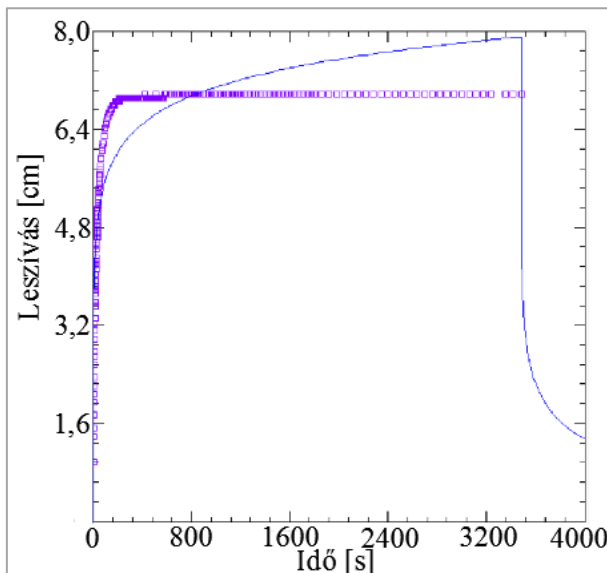


4. kép: Festett vízű piezométertábla
Photo 4. Tinted water in piezometers

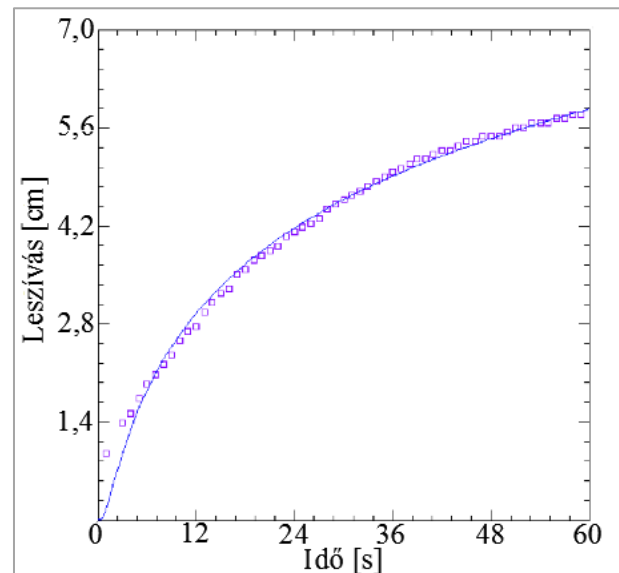
Az eredmények szoftveres feldolgozása során akadályt jelentett, hogy a fényképeken nem lehetett tisztán kivenni az egyes csövekben a pontos vízszintet (3. kép), amit a víz megfestésével orvosoltunk a további mérések során (4. kép).

A szoftveres kiértékelés eredményeként az anyakút, a piezométerek és a megfigyelő kutak idősorait pixelekben kifejező fájl állt elő, mely tartalmazta a képarány és a piezotáblán szereplő skálázás alapján átszámított valós méretet. A szabadfelszínű vízádóra módosított Theis-képlettel előállítottuk a tíz darab megfigyelőkút adatsoraira vonatkozó görbéket. A 3. ábrán láthatjuk, hogy a példaként bemutatott 1. megfigyelőkút idősorára nem illeszkedett jól a Theis-görbe. Ennek oka az volt, hogy a vizsgálat során körülbelül egy perc után beállt kvázi-permanens állapotban a megfigyelő kutak vízszintje még csökkent, de az egymáshoz viszonyított szintváltozások értéke már zérus volt. Újabb egy perc

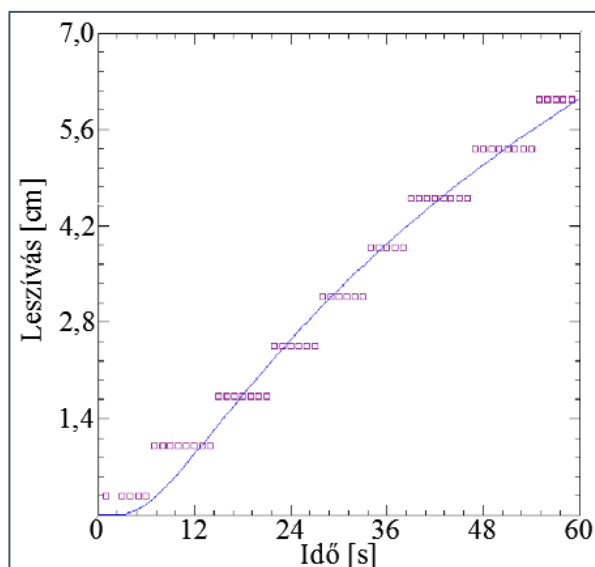
után pedig a leszívás már teljesen permanenssé vált. A Theis-módszer viszont csak a tisztán nem permanens vizsgálatokra alkalmazható. Emiatt az adatsorból csak az első egy perc adatait használtuk fel a kiértékelésnél. A 4. ábra a nem permanens vizsgálat első percében rögzített leszívás-idő adatsorait mutatja be az 1. megfigyelőkút esetében. Azaz a 3. ábrának a nem-permanens szakaszát. Látható, hogy az elméleti Theis-görbe jól illeszkedik az általunk mért adatsorra. A 9-10. megfigyelő kutak vízszintjei az idő függvényében a termelő-kúthoz közelebbi kutak szintjeihez képest lassan változtak. Ez az anyakúttól való nagyobb távolsággal, valamint a felső peremfeltétel közelségével magyarázható. A 5. ábrán a 9. megfigyelőkút leszívás-idősorát láthatjuk, mely szemlélteti az időben lefolyó lassabb változást. Ezen adatsorokat az illesztés bizonytalanságából eredő esetleges pontatlanságok miatt a kiértékelés során azonban nem vettük figyelembe.



3. ábra. Az 1. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel a teljes mérési időre
Figure 3. Fitting Theis-curve to the full drawdown-time series of the 1. observation well



4. ábra. Az 1. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel az 1. egy percre vonatkozóan
Figure 4. Fitting Theis-curve to the transient part of drawdown-time series of the 1. observation well



5. ábra. A 9. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel

Figure 5. Fitting Theis-curve to the transient part of drawdown-time series of the 9. observation well

A különböző leszívási és hozamértékekkel végzett, összesen 4 darab nem-permanens vizsgálat Theis-módszerrel történő kiértékeléséből – megfigyelő kutanként – szivárgási

tényező és tárolási tényező értékeket kaptunk. A megfigyelő kutakra kapott értékeket mérésenként átlagoltuk. Az eredményeket az 5. táblázatban foglaltuk össze.

5. táblázat. A nem-permanens mérések Theis-módszerrel feldolgozott eredményei

Table 5. Result from the transient conditioned measurements with Theis-method

Megfigyelőkút száma	1. mérés (s=7,2 cm; Q=0,76 l/min)		2. mérés (s=10,0 cm; Q=1,00 l/min)		3. mérés (s=14,8 cm; Q=1,40 l/min)		4. mérés (s=21,5 cm; Q=1,80 l/min)	
	Szivárgási tényező [m/s]	Tárolási tényező [-]	Szivárgási tényező [m/s]	Tárolási tényező [-]	Szivárgási tényező [m/s]	Tárolási tényező [-]	Szivárgási tényező [m/s]	Tárolási tényező [-]
1.	9,98E-05	1,15E-01	1,44E-04	6,40E-02	1,12E-04	1,04E-01	8,37E-05	1,57E-01
2.	8,62E-05	7,57E-02	1,14E-04	5,52E-02	9,25E-05	7,57E-02	7,23E-05	9,71E-02
3.	8,01E-05	4,98E-02	1,14E-04	3,65E-02	9,95E-05	4,69E-02	7,78E-05	6,02E-02
4.	9,80E-05	3,28E-02	1,19E-04	2,77E-02	1,07E-04	3,28E-02	9,01E-05	3,96E-02
5.	9,27E-05	2,58E-02	1,44E-04	2,20E-02	1,24E-04	2,58E-02	1,04E-04	2,94E-02
6.	1,67E-04	2,16E-02	1,89E-04	1,67E-02	1,44E-04	2,03E-02	1,40E-04	2,31E-02
7.	1,67E-04	2,03E-02	2,28E-04	1,59E-02	1,79E-04	1,80E-02	1,74E-04	2,18E-02
8.	3,00E-04	1,91E-02	3,00E-04	1,59E-02	2,99E-04	1,70E-02	2,34E-04	1,93E-02
Átlag	1,36E-04	3,99E-02	1,69E-04	2,89E-02	1,45E-04	3,77E-02	1,22E-04	4,89E-02

Amennyiben a 4 darab nem-permanens mérés alapján kapott eredményeket átlagoljuk, úgy a szivárgási tényezőre $1,43 \cdot 10^{-4}$ m/s, a tárolási tényezőre $4,38 \cdot 10^{-2}$ érték adódott. Az adatsorok szórása a szivárgási tényezőre $1,05 \cdot 10^{-5}$ m/s, ami megfelel az elvárható pontosságnak. A tárolási tényező szórása $3,33 \cdot 10^{-2}$ [-] azonban nagyságrendileg azonos a paraméter értékével, tehát a pontossága nem kielégítő. A tárolási tényező pontosítására vagy a paraméterszámítás nagyfokú bizonytalanságának leírására tehát további vizsgálatok szükségesek (Farkas-Karay és társai 2018).

A különböző módszerekkel számított szivárgási tényező értékek összevetése

A szemeloszlási görbe, illetve a kisminta kísérletekben előállított szivárgási tényező értékeket a 6. táblázatban foglaltuk össze. Az így kapott értékek mindegyike a durva homoktalajokra jellemző $9 \cdot 10^{-7}$ - $6 \cdot 10^{-3}$ m/s tartományba esik (Domenico és Schwartz 1990). Látható, hogy a vizsgált talaj szemeloszlási görbéjét felhasználó összefüggések eredményei közül a Jáky-módszerrel számítottak adják a legnagyobb szivárgási tényezőt. Az ezzel a módszerrel

meghatározott érték oly mértékben tér el a többi eredménytől, hogy további vizsgálatokkal akár az érvényesége is megkérdőjelezhető.

6. táblázat. A különböző módszerekkel kapott szivárgási tényező értékek

Table 6. Hydraulic conductivities determined with various methods

Vizsgálat fajtája	Kiértékelés módszere	Szivárgási tényező [m/s]
Szemeloszlási görbe	Seelheim	5,16E-04
	Jáky	1,44E-03
	Kröber	5,92E-04
	Hagen	5,20E-04
	Hazen	7,97E-04
	Bialas és Kleczkowski	1,77E-04
Kisminta-kísérlet	Dupuit	2,25E-04
	Theis	1,43E-04

A Seelheim-, Kröber- és Hagen-összefüggésekkel közel azonos szivárgási tényező értékeket kaptunk, mely az egyenletek hasonlóságával magyarázható. A Hazen (1892) által megállapított egyenlet eredménye ($7,97 \cdot 10^{-4}$ m/s) ugyanebben a nagyságrendben van, de a többinél nagyobb értéket ad meg. A szemeloszlási görbét jellemző, külön-

böző szemcseméreteken alapuló módszerek közötti eltéréseket okozhatja a legnagyobb és a legkisebb szemcseméreteket közötti kis különbség, vagyis az, hogy a d_{60} közel egyenlő a d_{10} -zel. Ez a talajminta szemeloszlási görbéjén jól látható. A bemutatott módszerek közül egyedül a Hazen-egyenletben szerepel a talajvíz hőmérséklete, melyet a modellben lévő víz hőmérsékletével adtunk meg. Ez is okozhatja annak a többi szemeloszlási görbét felhasználó módszertől való eltérését. A szemeloszlási görbét felhasználó egyenletek közül a *Bialas és Kleczkowski (1970)* kísérleteiben használt U.S.-Bureau of Soil Classification (*Bialas és Kleczkowski 1970*) által javasolt módszer eredményezte a legkisebb szivárgási tényező értéket. Az összes szemeloszlásból megállapítható érték közül ez áll a legközelebb a modellkísérletekből meghatározott értékekhez. A kisminta kísérleteknél közel azonos eredményeket kaptunk a permanens, a Dupuit-módszerrel kiértékelt és a nem-permanens Theis-képlettel kiértékelt vizsgálatokból. A vizsgálati módszerek eltérő volta mellett a piezométerekben kialakuló nyomásszintek különböző leolvasása is eredményezhette ezt az eltérést: a szinteket a permanens mérések esetén szabad szemmel, míg a nem-permanens vizsgálatok esetén automatizált képfeldolgozással állapítottuk meg. A képfeldolgozásnál szükséges korrekciók (vízfestés, halszem-effektus, pixelből való átszámítás) miatt az automatizált eljárás pontosabb volta nem garantálható. Ehhez további, összehasonlító vizsgálatok végzésére van szükség. A kétféle laborvizsgálati eredményei közötti eltérést az is okozhatja, hogy a Theis-módszer alapvetése, a végtelen kiterjedésű víztartó a modell esetében nem teljesült, de azzal, hogy csupán a nem-permanens szakaszt vizsgáltuk, ez az eltérés elvileg kiküszöbölhető lenne. Ennek a feltételezésnek az alátámasztására további – lehetőség szerint eltérő méretű – kismintán végzett kísérlet lenne célszerű.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a szemeloszlási görbét felhasználó összefüggésekkel – a *Bialas és Kleczkowski (1970)* által idézett módszer kivételével – akár egy nagyságrenddel nagyobb szivárgási tényezőt kaptunk, mint a kismintával történő vizsgálatokkal. A csak szemeloszlási görbét felhasználó módszerekkel kapott átteresztőképességi értékek között is megfigyelhető a közel egy nagyságrendbeli különbség. Ez rámutat a szivárgási tényezőt a jellemző szemérmérből számító összefüggések bizonytalanságaira. Látható ugyanakkor, hogy a mérési eredményekhez nem a szemeloszlás ismeretében számított leggyakoribb $5 \cdot 10^{-4}$ m/s körüli érték állt a legközelebb, hanem az ezeknél kisebb, az U.S. Bureau of Soil Classification (*Bialas és Kleczkowski 1970*) által ajánlott egyenlet eredménye. Fontos megjegyezni, hogy vizsgálatainkat jelenleg egyféle talajmintán végeztük, de a kísérleti elrendezés és a használt módszerek lehetőséget biztosítanak a bemutatott és a további, a gyakorlatban elterjedt közelítő összefüggések értékelésére, validálására. Ez elősegíti a különféle talajfélésekre az optimális közelítő képlet kiválasztását vagy esetleg újabb közelítő képlet bevezetését. A permanens és nem-permanens mérések egyazon mintán kivitelezése lehetővé teszi a próbaszivattyúzás-kiértékelési módszerek alapfeltevéseitől az eltérések szivárgási tényező számítására gyakorolt hatását. A téma jelen-

tősége, a rendelkezésre álló ismereteink és eszközök szűk-ségessé és lehetségessé teszik a további kutatásokat a szivárgási tényező minél jobb meghatározása érdekében.

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen munkánkban a mérnöki életben fontos vízföldtani paraméter, a szivárgási tényező meghatározási módjait mutattuk be szemeloszlási görbe és laboratóriumi modellezés segítségével. A szakirodalomban fellelhető egyszerű közelítő összefüggésekkel, a durva homoktalaj szemeloszlásának ismeretében meghatározott értékeket laboratóriumi mérési eredményekkel vetettük össze, melyeket a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének szivárgáshidraulikai vizsgálatokra készült kisminta-modelljén végeztünk el. A 2011-ben készült modellen számos olyan változtatásra volt szükség, amely lehetővé tette a kismintát permanens és nem-permanens próbaszivattyúzások laboratóriumi körülmények közötti vizsgálatára. A termelőkútból való egyenletes vízkivétel hatását tíz megfigyelőkút segítségével vizsgáltuk, nagyjából permanens vizsgálati körülmények között, de kis számban lehetőségünk nyílt a nem-permanens leszívási szakasz elemzésére is. A vízszint adatok kiértékelésére a Dupuit- illetve Theis módszereket használtuk. A kapott szivárgási tényező értékeket a szakirodalomban fellelhető egyszerű közelítő képletek eredményeivel vetettük össze. A szivárgáshidraulikai modellből kapott átlagok és a szemeloszlási görbével meghatározott értékek $1,43 \cdot 10^{-4}$ és $1,44 \cdot 10^{-3}$ m/s között voltak, amelyek mindegyike benne marad a szakirodalomban a durva homokra fellelhető tartományban. A vizsgálatainkban a Jáky-féle közelítés (*Jáky 1944*) tért el a leginkább a többi eredménytől, ez kérdésessé teszi az egyenlet használhatóságát, az általánosításhoz azonban további mérések szükségesek. A szivárgási tényező meghatározására előállított kisminta modell használhatóságát a szakirodalmi és szemeloszlási görbékből számított értékek alátámasztják, így alkalmas eszköznek tartjuk további vizsgálatok elvégzésére, melyek segítségével a szivárgási tényező meghatározása könnyebbé, a közelítő összefüggések pontosabbá válhatnak több talajfélése esetén is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A vizsgálatok a „FIKP VIZ4: Hazai karsztos vízádók készletgazdálkodási állapotértékelése” projekt keretein belül készültek. Köszönjük Hajnal Géának és Tolnai Sándornak a modell létrehozásában nyújtott segítségét, Havasi-Tóth Baláznak, Lükő Gabriellának és Baranya Sándornak a nem-permanens mérések kiértékelésénél, Ermilov Alexander Anatolnak a talajminta szitálásánál nyújtott segítségüket.

IRODALOM

Barta E., Hajnal G., Veczán É., Vasvári V. (2012). Bestimmung des durchlässigkeitsbeiwertes mithilfe von modellversuchen. In: Zenz G. (ed.): Wasserbausymposium 2012: Global denken - lokal handeln. 672 p. Graz: Verlag der Technischen Universität, Graz, 2012. Pp. 307-314. ISBN:978-3-85125-230-9.

Barta E., Hajnal G., Karay Gy., Vasvári V. (2013). Determination of the coefficient of permeability by physical model test and numerical modelling. In: IAHR (ed.): Proceedings of the 35th IAHR Congress, Beijing Tsinghua University Press, Paper cd. 11 p. ISBN:978-7-89414-588-8.

- Bear, J.* (1972). *Dinamics on Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York, London, Amsterdam.
- Beyer, W.* (1967). Zur Analyse der Grundwasserfließgeschwindigkeit, *Wiss, Zeitschr. d. TU, Dresden*, Heft 4.
- Bialas, Z., Kleczkowski, A.S.* (1970). O przydatno' sci niektórych wzorów empirycznych dla okre'slenia współczynnika filtracji k. Über den praktischen Gebrauch von einigen empirischen Formeln zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten k. *Arch. Hydrotech.(Warschau)* 17(3), 405–417 (1970) in poln. Sprache mit russischer (S. 416) und englischer (S. 417) Zusammenfassung.
- Darcy, H.* (1856). *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. p. 647, Paris
- Domenico, P.A. and F.W. Schwartz* (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons, New York, 824 p. ISBN 0 471 50744 X.
- Dupuit, J. E. J.* (1863). *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux dé-couverts et à travers les terrains perméables*. Paris: Dunod.
- Éliás, E., Juhász, J.* (1966). Az anizotrópia tényező meghatározása, MTA Szivárgási és Kúthidraulikai Anket, Budapest, I.A.-5.
- Fair, G., Hatch, L.* (1933). Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand, *American Water Works Association*, 25.11:1557-1565, 1933.
- Farkas-Karay, Gy.; Hajnal, G.; Birk, S., Vasvári, V.* (2018). Nemlineáris áramlás próbaszivattyúzásokban jelentkező hatásának numerikus vizsgálata, *Hidrologiai Közlöny* 98. évf. 1. szám, pp. 40-49.
- Fedorov, Sz. F. átvéve: Ürtüvajev, V. A.* (1956). Ekszperimentalnue gidrologicszeszkije isszedovanija na Valde. Izd. Nauka, Moskva.
- Fuchs, S.* (2010). Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (2010) 15: 177–189, DOI 10.1007/s00767-010-0143-8.
- Hagen G.* (1869). *Handbook of Hydraulics Structures* (in German), Berlin.
- Hazen, A.* (1892). Some physical properties of sands and gravels with special reverence to their use in filtration. 24th Annual Report, Massachusetts State Bureau of Health, Boston, Pub. Doc. 34, S. 539–556.
- Istomina, V. S.* (1957). *Filtration stability of soils*, Moscow, 1957.
- Ivicsics L.* (1968). Hidromechanikai modellkísérletek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, pp. 1-30.
- Jacob, C. E.* (1944). Notes on determining permeability by pumping tests under water-table conditions, U.S. Geological Survey, 25p.
- Jáky J.* (1944). *Talajmechanika*, Egyetemi Nyomda, Budapest.
- Jordan, H., Weder, H.-J.* (1995). *Hydrogeologie – Grundlagen und Methoden*, 2 Aufl., 603 S. Enke Verlag, Stuttgart.
- Juhász, J.* (1987). *Hidrogeológia*, Akadémia Kiadó, Budapest. p. 972. ISBN: 963-05-4381-8.
- Klauder W. S.* (2010). Experimentelle untersuchung der anströmung von vertikalfilterbrunnen, Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation, pp. 15-17.
- Kovács Gy.* (1981). *Seepage Hydraulics*, Akadémia Kiadó, Budapest.
- Koženy, J.* (1933). *Theorie und Berechnung der Brunnen*. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Nr. 8-10.
- Kruseman G. P., de Ridder N. A.* (1994). Analysis and evaluation of pumping test data, international institute for land reclamation and improvement. International Institute for Land Reclamation and Improvement, P.O. Box 45,6700 AA Wageningen, The Netherlands, 1994.
- Lee, C.H.* (1938). Selection of materials for rolled-filled earth dams. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 103, 12–61.
- Lindquist, E.* (1933). On the Flow of Water through Porous Soil, 1.st Congress of ICOLD, Stockholm, 1933.
- Mallet, C., Pacquant, J.* (1951). Erdstaudämme. Orig. Titel: Les Barrages en Terre. Übersetzt aus dem Franz.: H. Ferchland. VEB Verlag Technik, Berlin.
- Mosonyi E.* (1955). Hidraulikai hasonlóság a kismintatörvények és a kísérletek értékelése, a várható eredmények, Kézirat, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest. pp. 41-44.
- Mosonyi E., Kovács Gy.* (1952). Kismintatörvények a nehézségi és súrlódóerő együttes figyelembevételével, *Hidrologiai Közlöny* 32. évf. 7-8. szám, pp. 274-277.
- Öllös G.* (1957). A kútpaláston kialakuló vízmozgásnak és a kút vízhozamának vizsgálata, *Hidrologiai Közlöny* 37. évf. 1. szám, pp. 26-33.
- Öllös G.* (1970). Kúthidraulika, Kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, pp. 21-25.
- Richter, L.* (1966). Aufgaben der hydrogeologischen Erkundung und Nacherkundung in der Braunkohlenindustrie. *Z. Angew. Geol.* 12(6), 288–297.
- Schlichter, C. S.* (1899). Theoretical investigation of the motion of groundwater. Annual Report of the U.S. Geological Survey.
- Seelheim, F.* (1880). Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens. *Z. Anal. Chem.* 19, 387–418
- Skaballanowitsch, J.A.* (1954). Hydrogeologische Berechnungen über die Dynamik des Unterirdischen Wassers. Vlg. UgleTechIsdat, Moskau.
- Szabó G., Hajnal G., Vasvári V.* (2012). Inverse numerische modellierung zur bestimmung des durchlässigkeitsbeiwertes, in: zenz g (ed.): *Wasserbau symposium 2012: Global denken - lokal handeln*. 672 p. Graz: verlag der technischen universität graz, 2012. Pp. 233-240. ISBN:978-3-85125-230-9.
- Terzaghi, K.* (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley, New York, London.
- Theis, C. V.* (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 16, pp. 5 19-524.

Víg, T., Farkas, D., Hajnal, G. (2016). Szivárgási tényező vizsgálata kisminta kísérlet és numerikus modell segítségével In: Török, Á; Görög, P; Vásárhelyi, B (szerk.), Mérnökgeológia - Kőzetmechanika 2016 Budapest, Magyarország, Hantken Kiadó, pp. 43-54.

Zamarin, I. A. (1954). Projektírovanyije gidrotehniceszkih szooruzsenyij. Moszkva.

Zauberei, I. I. (1932). On the Problem and Determination of the Permeability Coefficient, Izvestia VNIIG, Leningrad, No. 3-5.

Internetes hivatkozások

Newfoundland and Labrador DEC (2010). Aquifer Testing Guidelines, (2018.10.20.). https://www.mae.gov.nl.ca/waterres/regulations/appforms/Aquifer_Testing_Final.pdf

SERAS (1994). Standard Operating Procedures, Control Pumping Test (2018.10.20.). <https://clu-in.org/download/ert/2045-R00.pdf>

Leonhardt, Andrä und Partner (2012). Queensferry cutting, Constant rate pumping test (2018.09.13.). <https://www.transport.gov.scot/media/2270/a4335535.pdf>

USA EPA (1994). Controlled pumping test (2018.07.25.).

<http://www.dem.ri.gov/pubs/sops/wmsr2045.pdf>

OHIO EPA (2006). Technical guidance manual for ground water investigations chapter (2018.08.14.).

https://www.epa.state.oh.us/Portals/28/documents/TGM-04_final1206W.pdf

Paul S Osborne, USA EPA (1993). Suggested Operating Procedures for Aquifer Pumping Tests (2018.07.25.).

<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/sopaqu.pdf>

Maine EPA (2005). Pump Test and Delineation Plan Guidance New Well Sources for Large (2018. 07.30.).

<https://www.maine.gov/dhhs/mecdc/environmental-health/dwp/fit/documents/PumpTestDelineationPlan-Guidance.pdf>

New York DEC (2018). Pumping test procedures for water withdrawal applications (2018.09.24.).

https://www.dec.ny.gov/docs/water_pdf/pumptest.pdf

<https://foscam.hu/termek/fi9903p-ip-kamera/> (2019.09.18).

A SZERZŐK



FARKAS DÁVID 2015-ben szerzett építőmérnöki diplomát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Ezt követően 2015-2018-ig ugyanitt a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéken doktorandusz hallgató, 2018-tól tudományos segédmunkatárs. Doktori kutatási témája szivárgási tényező meghatározása terepi mérésekkel. 2009 óta a Magyar Hidrológiai Társaság tagja.

FARKAS-KARAY GYÖNGYI 2013-ban szerzett építőmérnöki diplomát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. 2018-ban ugyanitt PhD fokozatot szerzett, jelenleg a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék adjunktusa. Fő kutatási területe a repedezett és karsztos kőzetek szivárgáshidraulikai vizsgálata. 2015 óta tagja a Magyar Hidrológiai Társaságnak.

HEGEDŰS NOÉMI Felsőfokú tanulmányait 2017-ben kezdte a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karán, melyet jelenleg vízmérnöki specializáción folytat.

Légi felvételezés alkalmazhatósága sekély tavi növényzetfoltok hidrodinamikai hatásainak meghatározására

Szilágyi Mariann*, Zsugyel Márton** és Krámer Tamás*

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. (Email: szilagyi.mariann@epito.bme.hu; kramer.tamas@epito.bme.hu)

** MTA-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. (Email: zsugyel.marton@epito.bme.hu)

Kivonat

A tavi növényzetfoltok és a hidrodinamikai folyamatok egymásra gyakorolt hatásának vizsgálata hosszú ideje foglalkoztatja a kutatókat. A kölcsönhatás terepi kiméréséhez elengedhetetlen, hogy feltárjuk a térbeli áramlási struktúrákat. A hagyományos *in situ* áramlásmérő berendezések adatainak területi kiterjesztésére egy tavakban még kevésbé alkalmazott légi felmérési és részecskekövető módszert teszteltünk, mégpedig a Fertő tó egy kákafoltokkal tarkított területén. Ezzel az ún. LSPTV technológiával Lagrange-i megközelítésben vizsgálható a vízfelszínen úszó nyomjelzők mozgása, ami a felszíni sebességmező lenyomatát adja. Jelen cikkben a módszer alkalmazhatóságát vizsgáljuk. Célunk, hogy meghatározzuk a mérés érzékeny paramétereit, az időbeli felbontás változtatásának hatását, illetve drón által vízfelszín felett rögzített képek tájékoztatásának pontosságát.

Kulcsszavak

Képkövetésen alapuló nagyléptékű részecske-sebesség mérés, légi LSPTV, terepi áramlástan felmérés, vízfelszíni áramkép

Application of airborne surveys to determine hydrodynamic impact of vegetation patches in shallow lakes

Abstract

The interaction between lake macrophytes and hydrodynamic processes has been long investigated. It was necessary to explore spatial flow structures to measure this interaction. The information obtained by classical *in situ* current meters spatially using an airborne video survey coupled with particle tracking in a vegetated part of Lake Fertő was extended. This LSPTV technology allows us to investigate the Lagrangian motion of tracers on the water surface, characterising the surface flow field. The applicability of the method was studied in this paper. Namely, our goal was to identify the sensitive parameters of the survey, determine the impact of the temporal resolution and the accuracy of orthorectification during the post-processing.

Keywords

Large-scale particle image velocimetry, airborne LSPTV, hydrodynamic field survey, surface flow field.

BEVEZETÉS

A Fertő, a Velencei-tó, a Kis-Balaton és sok más sekély tó nádborítottága nemcsak a partközeli sávra korlátozódik, hanem a teljes területén meghatározó a víztest vízgazdálkodására és ökológiai viszonyaira. A nádas és egyéb, vízfelszín fölé emelkedő vízi növényzet áramlástan hatása egy nemzetközileg is sokat kutatott téma. Tudvalevő, hogy a vízből kiemelkedő, porózus közegeként jellemezhető növényzetfoltok mind a szélviszonyokat, mind a tó hidrodinamikai jelenségeit – a hullámzást, az áramlást és a hordaléktranszportot – közvetlenül befolyásolják. A csoportosan előforduló növényzetfoltok együttes hidrodinamikai hatását számos laboratóriumi, terepi és numerikus vizsgálat kutatta. Többek között *Folkard (2005)* numerikus úton vizsgálta a növényzetfoltok uralkodó áramlási iránytal szemben mutatott hatását, *Kondziolka és Nepf (2014)* pedig kör alakú növényzetfoltok egyedi és kollektív hatásának visszacsatolását a növényzet növekedésére. *Meire és társai (2014)* emellett laboratóriumi kísérletek segítségével is elemezte a kör alakú foltok együttes tulajdonságait. Minden folt leárványkolt alvízi oldalán a lebegtetett üledék lerakódása dominál, sőt, bizonyos foltűrűség esetén az egyedi lerakódások alvízen egy egyesült, másodlagos lerakódási zóna is kialakul. A növényzet végül ezekre a sekélyebbé váló területekre tovább terjeszkedik. Az idézett vizsgálatok mellett továbbiak is fontos megállapítá-

sokat tettek a növényzetfoltok körül kialakuló áramlástan folyamatokról, azonban ezek túlnyomó többsége gravitációs eredetű, egyirányú és permanens peremfeltételekre vonatkozik.

Az átfolyásos vízi élőhelyekkel szemben a tavi áramlásokat elsősorban a szél kelti, és ehhez kötődve a hullámzás is megjelenik, mint az üledéket lebegésben tartó turbulenciaforrás és a növényzetet időnként romboló erőhatás. További alapvető különbség, hogy a háttéráramlás és a hullámzás iránya a helyi széljárásnak megfelelően változókéony. Mivel a növényzet és az áramlástan közötti kölcsönhatás hosszú időskálán zajlik és nehezen paraméterezhető, ezért a folyamatok elemzésének különösen fontos eleme a terepi megfigyelés. A folyamatok gyakorlati jellemzéshez a meghatározó változók – a szél, a tavi áramlások, a hullámzás és a turbulencia – hosszú idejű idősorára és azok statisztikai feldolgozására van szükség. Ezen változók térbeli, de legalább síkbeli eloszlásának folyamatos követésére egyelőre nem állnak rendelkezésünkre kellően finom felbontású távérzékelési módszerek, így egyidejű *in situ* mérésekre kell hagyatkoznunk. Egy ilyen, alsó légrétegben és vízben működő mérőhálózat elemeinek számát márpedig erősen korlátozza a kutatók költségvetési kerete, így igény van a pontbeli mérések területi kiterjesztésére.

Jelen tanulmányban egy légi felvételezésen alapuló Lagrange-i részecskekövető eljárás terepi tesztelését mutatjuk be annak feltárására, hogy milyen áramlástani mintázatok fejlődnek ki a növényfoltok alvízi (áramlás alatti) oldalán. Sekély tavi környezetben ez a mérési módszer messze nem elterjedt, ezért célunk a módszerben rejlő lehetőségek és az esetleges alkalmazási korlátok feltérképezése volt.

VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

LSPTV technológia

A távérzékeléssel történő felmérések napjainkban egyre gyakrabban használatosak a vízmérnöki területen is. Egyre több tudást és tapasztalatot szereznek a kutatók a videó-alapú sebességmérésekben. A terepi körülmények között használt módszerek két fajtája ismeretes: az LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry) és az LSPTV (Large-Scale Particle Tracking Velocimetry), mely betűszavakban az LS a terepi körülményekre vonatkozik a kamera nagy látószöge miatt (Muste és társai 2008). A PIV egy széles körben elterjedt áramlási vizualizációs eszköz folyadékdinamikai alkalmazásokhoz, mely során digitális képek rögzítése és elemzése történik sűrű részecskefelhők mozgásáról a folyadékközegben (Fujita és társai 1998). A sebességvektorokat az egymást követő képeken részecske-mintázatok párosításával határozzák meg, de az egyes részecskéket nem követi a PIV (Tauro és társai 2017). A PTV ezzel szemben egy Lagrange-i megközelítést ad, ahol a sebességvektorok az egymást követő képkockákon megtalált és követett egyes nyomjelzők elmozdulása alapján határozhatók meg. Mivel az egyes részecskék sebessége külön-külön levezethető, így gyakran alkalmazzák nempermanens áramlások vizsgálatánál (Lloyd és társai 1995). A PTV-ban jellemzően sokkal kevesebb nyomjelzőt eresztenek el, mint a PIV-ben.

A PTV mind laboratóriumi (Sokoray-Varga és Józsa 2008, Lloyd és társai 1995), mind terepi (pl. Thumser és társai 2017) viszonyok között gyakran alkalmazott sebességmérési módszer. A kamera célszerűen legyen minél magasabban és merőlegesebben a mozgás síkjára, ami úszó nyomjelző esetén maga a vízfelszín. Az álló oszlopokra helyezett kamerákkal szemben elérhetővé váltak a drónokra szerelt, lefelé néző kamerák, melyek előnye,

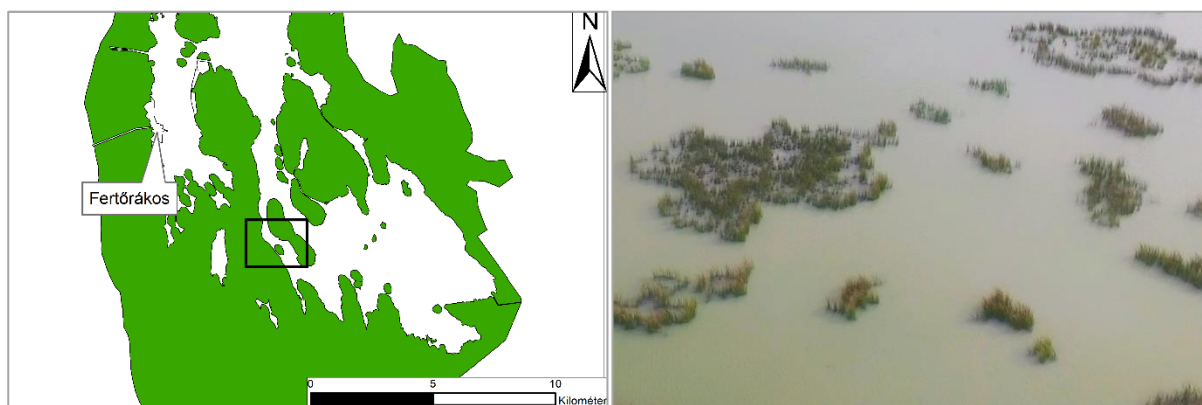
hogy nagy magasságuknál fogva kiterjesztik a felvételezési területet. Ezzel egy könnyen bevezethető mérési módszer jelent meg (Detert és társai 2017), amelyet már hazánkban is alkalmaznak és kutatnak (Lükő és Zsugyel 2018, Szilágyi és társai 2019).

Jelen kutatás következesképpen a terepi körülmények között végrehajtott LSPTV-re irányul. Növényzetfoltok hatásának terepi vizsgálatánál eddig jellemzően az LSPIV technológiát alkalmazták (Creëlle és társai 2018), a PTV-t pedig főleg jól szabályozható laboratóriumi kísérletekben.

Terepi vizsgálatok

Kísérleti méréseink elvégzéséhez a Fertő tó magyarországi területének az 1. ábrán látható részét választottuk. Mivel itt a vízfelszín túlnyomó részét növényzet borítja, illetve vízmélysége a nyíltvízi részen sem nagyobb 1,5 méternél (Pannonhalmi és Sütő 2017), ez megfelelő mintaterületnek bizonyult. A tó sekélységének köszönhetően a felszíni sebességek elég szoros kapcsolatban vannak a mélységátlagolt sebességmezővel, így a víznél könnyebb jelzőrészecskék elmozdulásával a víztér vízszintes anyagtranszportját is jellemezhetjük. A Műegyetem kutatói korábbi vizsgálataikhoz is választották már ezt a területet a fenti megfontolások miatt: Kiss és Józsa (2014) feltárta a nádasszigetek mögötti mikrometeorológiai jellemzőket; Homoródi és társai (2012) pedig a nyíltvízi részen vizsgálta a sekély-tavi hullámok spektrális tulajdonságait.

A kísérleti terület egy természetes csatornában helyezkedik el, amely összeköti a nagy északi tómedencét a déli Madárvárta-öböllel. Az uralkodó szélirány az ÉÉNy, de a DDK is gyakran előfordul. A csatornát nád (*Phragmites australis*) határolja. Emellett a csatornát néhány 10 méter átmérőjű kákaszigetek (*Schoenoplectus lacustris*) tarkítják. A kaka az utóbbi két évtizedben erősödött meg, azaz valószínűleg egy viszonylag gyors szukcessziós folyamatnak vagyunk itt tanúi. Jelen vizsgálatainkhoz egy nagyjából 20 méter átmérőjű, különálló kákaszigetet választottunk a kákamező közepe tájáról. Fontos még megjegyezni, hogy a kákaszigetek körvonala jellemzően egy gyűrű mentén összefüggő, de a belsejük ligetes, ami ott heterogén átáramlási körülményeket okoz.



1. ábra. Átészeti térkép a vizsgált területről és egy növényzetfolt a vizsgált területen (Fertő tó)
Figure 1. Map of study site and small vegetation patches (Lake Fertő)

A terepi mérésekhez egy megfelelő nyomjelzőt kellett találni, amellyel szemben több kritériumot is szabtuk:

- Színe legyen különböző a víztől (a legjobb a fehér).
- Sűrűsége legyen kisebb a víznél, de ne sokkal kisebb, mert akkor a vízből kiálló részre megerősödik a vitorlahatás.
- Legyen elég ellenálló a hullámnak és a növényzettel való ütközésnek.
- A mérési terület kiterjedéséhez célszerűen igazodó repülési magasság miatt a nyomjelző legyen legalább 8 centiméter átmérőjű.
- Mivel a mérési terület fokozottan védett, a nyomjelző anyaga ne legyen veszélyes a környezetre, sem a mérés alatt, sem akkor, ha a szándékunk ellenére nem mindet tudjuk összegyűjteni a mérés után.

E követelményeket figyelembe véve a számos próbatétel közül az olvasztott méhviaszból készült korongok feleltek meg legjobban céljainknak (2. ábra). Fontos megemlítenünk azt is, hogy a méhviasz lebomlási ideje alig 28 nap (Tauro 2016), és veszélytelen az élővilágra. E megfontolások alapján 9 centiméter átmérőjű méhviasz korongokat készítettünk. E korongok vastagsága nagyjából 3 mm, ami már ellenállóvá teszi őket a mérsékelt hullámmal szemben, erősebb hullámmal pedig magát a megfigyelést is ellehetetlenítené.



2. ábra. Méhviasz korongok
Figure 2. Beeswax disks

A mérés során a választott növényzetfolt körül rögzített illesztőpontokat helyeztünk el a képkockák későbbi georeferáláshoz. E illesztőpontok habosított műanyag korongok 50 centiméter átmérővel, a felszínüket fekete-fehér negyedekkel láttuk el. Függőleges, 2 méter hosszú alumínium csövekre helyeztük, mindegyiket azonos távolságra a vízfelszíntől. Ez azért volt fontos, mert ezek így egy közös síkba kerültek és georeferálásuk kevesebb paramétert igényel. A pontok koordinátáit RTK-GPS-szel mértük meg.

A mérés során a növényzetfoltnak az áramlás nagyságára és irányára gyakorolt hatását terveztük vizsgálni úgy, hogy a felvízen nyomjelzőket eresztünk el és ezek továbbsodródását követjük a folt alvizén. Ahhoz, hogy megállapítsuk az alapáramlás pillanatnyi irányát, néhány korongot próbaképpen eleresztettünk anélkül, hogy mozgásukat videón rögzítettük volna. Amint a kiszemelt kákasziget felvízi oldalát ily módon azonosítottuk, a drónt a levegőbe küldve a vízbe helyeztük

a nyomjelzőket, törekedve az egyenletes sűrűségű kiosztásra. A drón és a rászerezelt kamera (3. ábra) adatai az 1. táblázat olvashatók. A kamera lencséjére a mérés közben még egy polárszűrőt is tettünk, amely későbbiekben csökkentette a vízfelszín csillogása okozta hibás detektálásokat. A repülési magasság átlaga 40 méter volt, így lefelé néző kamerával a látóterület 74,8 x 42 méter körül alakult, a nyomjelző korongok pedig 3 képpont (px) átmérőjűek voltak. A drónt csónakból irányítottuk és figyeltük a kamera által valós időben továbbított képet. Ha a nyomjelzők elhagyták a látóterületet, a drón vízszintes mozgásával azokat ismét a látóterületbe hoztuk. Sem ez a mozgás, sem az adott napon átlagosan 5 m/s alatt maradó szélsősebesség nem okozott számottevő rezgést a kamera képében és később pontatlanságot a feldolgozás során. A nyomjelzőket igyekeztünk utána maradéktalanul összegyűjteni a következő eregetéshez, annak ellenére, hogy bomlásuk során nem károsítják a környezetet.



3. ábra. Az alkalmazott DJI Phantom 3 Standard drón
Figure 3. The DJI Phantom 3 Standard drone used in the experiment

1. táblázat. A mérések során használt drón adatai
Table 1. Configuration of the drone

A drón típusa	DJI Phantom 3 Standard
Átlós mérete (a légszárakkal együtt)	350 milliméter
Teljes tömege (a kamerával együtt)	1216 g
Akkumulátor típusa	LiPo 4S (4480 mAh, 15,2 V)
Repülési idő egy töltéssel	25 perc
Kamera kép- és időfelbontása	2704 x 1520 px, 30 fps
Kamera fókusz távolsága	2,9 milliméter

Képelemzés

Az objektumok észleléséhez egy MATLAB környezetben fejlesztett egyedi célprogramot használtunk (Szilágyi és társai 2019). A program három fő lépésből áll, amelyek a következők:

1. Pontok azonosítása: a nyomjelzők és az illesztőpontok középpontjának automatikus leveztése képi raszterkoordinátával.

2. Tájékozás: az azonosított nyomjelzők képi koordinátáinak átszámítása EOVS (Egységes Országos Vektori) koordinátarendszerbe. E transzformációt a következő szakaszban részletesebben leírjuk.
3. A pontok párosítása: e lépés során az azonosított pontokat követjük végig a képkockák között, mégpedig egyszerűen úgy, hogy az adott képen lévő ponthoz a következő képen lévő legközelebbi pontot rendeljük hozzá.

Az 1. lépésben a képeken a nyomjelzők és az illesztőpontok középpontját az úgynevezett Laplace-Gauss-szűrővel (LoG) (Gonzalez és társai 2004, MathWorks 2019) detektáljuk. Ehhez egy Laplace-Gauss-i függvény létrehozása szükséges a kép raszterfelbontásában, ami két paramétert igényel. E függvény alkalmazása során azt a tulajdonságot használjuk ki, hogy a nyomjelzőkről készült felvétel színeloszlása az általunk definiált függvényhez hasonló. A szűrő futtatása előtt egy HSV-maszkkal szűkítettük a keresési területet, amellyel a színárnyalat, a színtelítettség és a világosság értékekre szabható meg határérték. Amellett, hogy a maszk a számítási időt is csökkentette, hatására a hibás találatok száma is kevesebb lett.

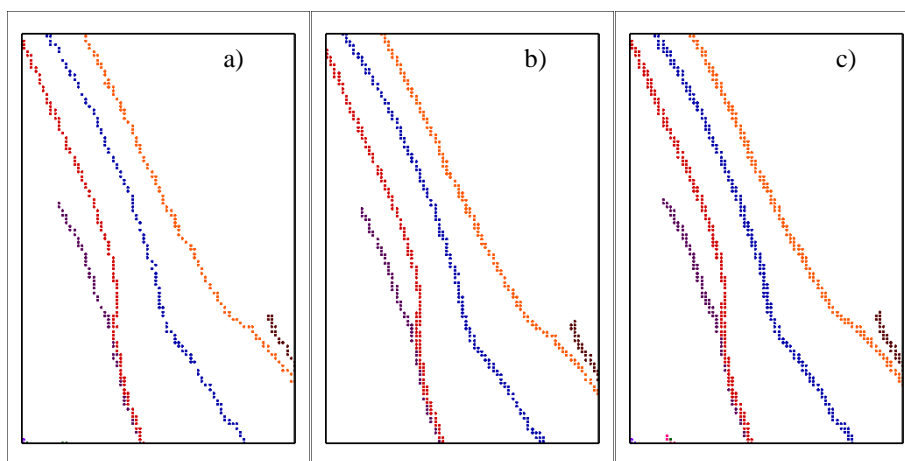
ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT

A képfeldolgozásnak több olyan paramétere volt, amely értékét előzetesen, iteratív teszteléssel állapítottuk meg: az időbeli felbontás, az algoritmus 1. lépésében a LoG-szűrő paraméterei, a 2. lépésben figyelembe vett illesztőpontok száma, végül a 3. lépésben a maximális keresési távolság. Az alábbiakban ezek közül az időbeli felbontás, illetve a kép \rightarrow EOVS transzformáció hatásának érzékenységvizsgálatát ismertetjük.

Az időbeli felbontás hatása

A kamera másodpercenként 30 képet rögzített, de a feldolgozás ezzel a képfrekvenciával elfogadhatatlanul számításiigényes lett volna. Ennél a tavi alkalmazásnál nem is igényeltünk ilyen részletes felbontást. Kérdés, hogy mennyire ritkítható a feldolgozott képkockák időközé ahhoz, hogy ez a nyomvonalak részletességét és pontosságát még ne rontsa el számottevően. Ennek megválaszolására három időfelbontásra (1, 4 ill. 10 fps) végeztünk érzékenységvizsgálatot.

Az 1. lépést végrehajtó algoritmus történetesen olyan, hogy a nyomjelzők középpontját egész raszterkoordinátákkal határozza meg. Ez a diszkretizáció a transzformáció után végül megjelenik a földi koordinátákban is, és így korlátozza a síkbeli felbontóképességet, ami a 4. ábraán jól tetten érhető. A 10 fps-sel meghatározott nyomvonalak 2 px szélességéből következik, hogy a helyzetmeghatározást a feldolgozás időfelbontásától függetlenül mintegy 1 px amplitúdójú, gyorsan ingadozó zaj terheli. A c) panel alapján megállapítható, hogy a vizsgált legsűrűbb, 10 fps feldolgozással a nyomjelzők egy képpontnál kisebb utat tesznek meg két kép között. Mindennek az a következménye, hogy a nyomjelzőkkel a néhány cm-es amplitúdójú elmozdulásokat nem lehet leképezni. A 10 fps vagy ennél sűrűbb időfelbontás tehát nem tár fel arányosan több részletet a 4 és 1 fps időközű feldolgozásnál, de megfelelő hibakiegyenlítő eljárással kombinálva alkalmas lehet a lomhább mozgásösszetevők képpont alatti térfelbontására.



4. ábra. Öt nyomjelző egymást követő helyzeteinek helyszínrajzi részlete EOVS koordinátarendszerben, három különböző időfelbontás alkalmazásával: a) 1 fps, b) 4 fps, c) 10 fps. A panelek mérete 7 x 10,5 méter

Figure 4. Plan view of the subsequent positions of five tracer particles in EOVS coordinate system, derived using different frame rates: a) 1 fps, b) 4 fps, c) 10 fps. Size of panels is 7 x 10,5 metres

A minimális időfelbontást a nyomvonalak kívánt részletessége mellett a pontok párosítása is korlátozza. Nevezetesen, ha nagy az elmozdulás az egymás utáni képeken, akkor az egymáshoz közel érő pontokat a párosító lépés nagyobb arányban azonosítja helytelenül, ezáltal sok esetben a nyomvonalak egymással kereszteződve folytatódhatnak. A vizsgáltak közül ez a jelenség az 1 fps időfelbontás mellett már hangsúlyossá vált. A 4. ábra a) panelén a két bal oldali nyomvonal például olyan közel került egymáshoz, hogy fennállt a veszélye a felcserélésnek (persze ahhoz az is kell, hogy ugyanakkor legyenek a nyomvonalak találkozási helyén a jelzőpontok).

A 4 fps időfelbontás elfogadható kompromisszumnak bizonyult a tesztelés során, így a későbbiekben is ezt használtuk. Ez az optimum azonban más alkalmazásoknál egyedileg vizsgálandó, hiszen függ a mérés körülményeitől és a mért áramlási mező frekvenciaspektrumától. Kellően finom felbontású és pontosságú helymeghatározás esetén akár a szél keltette rövid hullámzúhoz köthető, tavainkban 0,5-1 Hz-es frekvenciájú mozgás is detektálható lenne. A Shannon-Nyquist-féle mintavételezési elv szerint ebben az esetben legalább kétszeres sűrűségű, azaz éppen 4 fps vagy ennél finomabb időfelbontással kell feldolgozni

a videofelvételt. Azt tapasztaltuk, hogy a felszíni hullámzás nem volt kivethető a nyomvonalak zajában.

A tájékoztató pontossága

A drónnal történő légi felvételezés megjelenése óta több tanulmány is született arról, hogy hogyan lehetne ezeknek a kis járműveknek a légi felvételeit az országos koordinátarendszerbe transzformálni, azaz tájékoztatni (Babinec és Apeltauer 2016; Padró és társai 2019). Ez egy fotogrammetriai alapfeladat. Az egyik esetben közvetlenül a kép nagy pontossággal mért külső tájékoztatói elemeit (azaz a vetítési középpont koordinátáit és a képtengely irányvektorát) használják (Rabah és társai 2018), a másik esetben pedig ismert geodéziai helyzetű illesztőpontokkal tájékoztatók a képkockákat. Az általunk alkalmazott berendezés pontossága nem tette lehetővé a közvetlen tájékoztatást, ezért kellett a korong alakú illesztőpontokat előzetesen elhelyezni a felvételezni kívánt területen. Az illesztőpontok távolsága néhány tíz méter volt, de míg a DJI_1 jelű változatban szabálytalan mintázat szerint lettek kiosztva, a DJI_2 változatban szabályos raszterben.

A képeken megtalálható illesztőpontok kis száma miatt két transzformációs módszer jöhetett szóba.

- 1) *Affin transzformációval* párhuzamos vetítést feltételezünk, ami közel függőleges képtengely esetén lehet elfogadható. Ez a transzformáció a párhuzamos egyeneseket párhuzamos egyenesekké képezi le és a visszaszámolásához egy képen minimum három illesztőponttal kell rendelkezni.
- 2) *Ferde képtengely és különböző szintű tárgyak* esetén általánosabb megoldás a *centrális vetítés* (amit GIS szoftverekben *projektív transzformáció*nak is hívnak). A távolsággal való rövidülést is leírjuk. Az egyeneseket ez a vetítés is egyenessé transzformálja, a párhuzamosság azonban általában nem marad meg. E módszerhez legalább négy illesztőpontra van szükség (Kraus és Waldhäusl 1998).

Affin transzformáció esetében a transzformációs mátrix az (1) alakban számítható:

$$\underline{T}_{affin} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A mátrixban az a_{11} , a_{12} , a_{21} és a_{22} paraméterek összességében a nyújtást, a döntést és a forgatást írják le, az a_{31} és a_{32} paraméterek pedig az eltolást. A centrális transzformáció mátrixa a fentihez képest két további elemmel egészül ki (2):

$$\underline{T}_{proj} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Az a_{13} és a_{23} paraméterek a billentés esetében befolyásolják az enyészpont helyzetét.

E transzformációk pontosságának meghatározásához a szakirodalomban többféle módszer áll rendelkezésünkre.

Ezek közül a leggyakrabban használt módszer a „kihagyásos igazolás” (hold-out validation – HOV). E módszer során a képen látható, ismert koordinátájú pontokat (*látható pontokat*) két nem átfedő halmazra osztjuk. Az egyik halmazt illesztőpontokként használjuk, melyekből a transzformációs mátrixot számítjuk. A másik halmaz alkotja majd az ellenőrzőpontokat, amelyekkel a transzformáció minőségét számítjuk (Brovelli és Minghini 2012).

A képpalkotást, az illesztőpont képi azonosítását és a geodéziai koordinátáit is egyaránt hiba terheli, ami együttesen rontja a transzformáció minőségét. A transzformációs hiba mértékét a mért és a számított helyzet átlagos négyzetes távolságának gyökével (RMSE, Root-Mean-Square-Error) mérjük (3):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2}{n}}, \quad (3)$$

ahol az $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ jelöli az egyes ellenőrző pontok mért és számított helyzetének euklideszi távolságát, az n pedig az ellenőrzőpontok számát (Lea és Legleiter 2016). Az RMSE-t érte kritika is; Hughes és társai (2006) szerint ez nem a legrepresentatívabb mutató, ennek ellenére mégis sok szoftver ezt alkalmazza könnyű számíthatósága miatt.

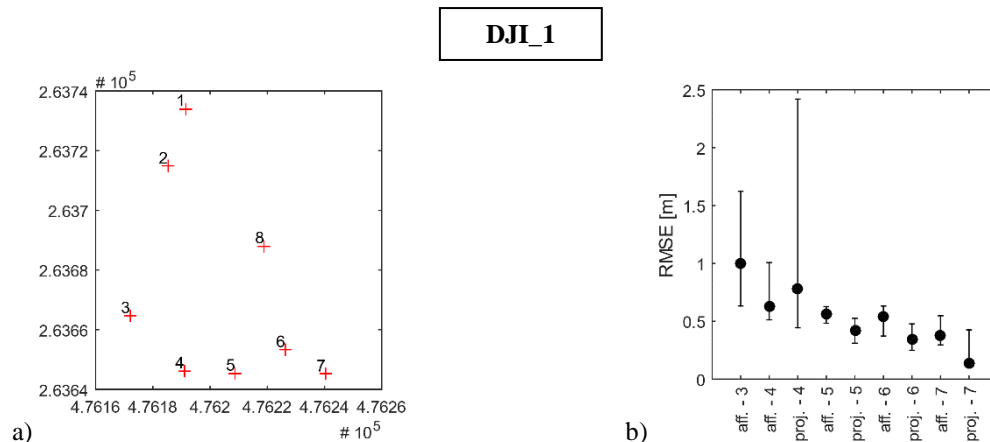
Vizsgálataink során két képet elemeztünk, melyeken különböző számú és elhelyezkedésű látható pont található. E képek adatai a 2. táblázatban olvashatók.

2. táblázat. A vizsgálati képek adatai
Table 2. Specification of the used frames

ID	Képfelbontás (px)	Látható pontok száma	Látható pontok elrendezése	Vizsgált változatok száma	
				Affin	Centrális
DJI_1	2704 x 1520	7	véletlenszerű	218	162
DJI_2	2704 x 1520	6	raszter	98	60

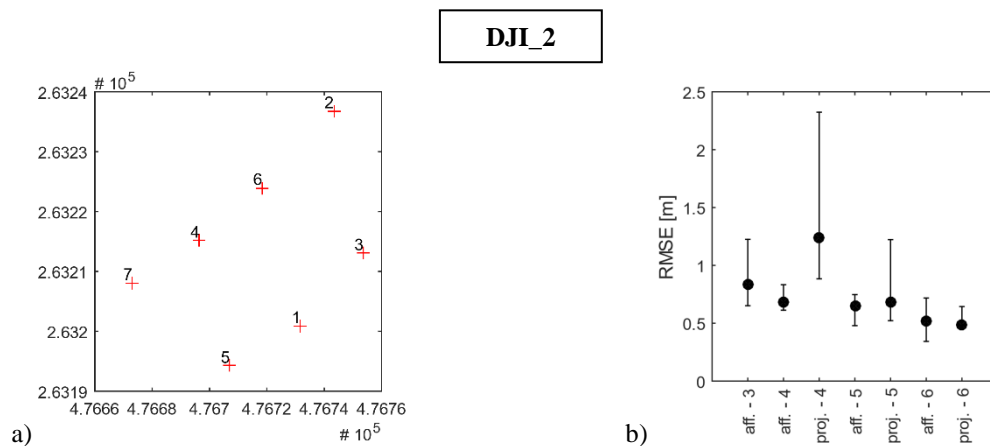
A vizsgálatokat az illesztő és az ellenőrző pontok kiválasztásának minden egyes lehetséges kombinációjára elvégeztük, mind az affin, mind a centrális transzformáció esetében (2. táblázat). Az RMSE értékeket a számított és a mért országos koordináták vízszintes távolsága alapján összegeztük az ellenőrző pontokra. Látható, hogy az affin transzformáció esetén több vizsgálati elrendezést vettünk figyelembe, mivel ehhez már három illesztőpont is elégséges, míg a centrálishoz eggyel több. Ha az illesztőpontok száma meghaladja ezt a minimumot, akkor a transzformáció a legkisebb négyzetek elve alapján minimalizálja (azaz kiegyenlíti) a hibát.

Az 5. és 6. ábra szemlélteti a kapott eredményeket. Ez alapján megállapítható, hogy az átlagos hibaösszeg tekintetében a látható pontok raszteres elrendezése (DJI_2) nem adott pontosabb tájékoztatást, mint a szabálytalan (DJI_1). Ennek egy lehetséges oka, hogy a DJI_2 jelű elrendezés esetében nagyobb az olyan kiválasztás esélye, ahol a látható pontok viszonylag közel vannak egymáshoz. Az is megállapítható az 5.b és 6.b ábrarészek alapján, hogy 5 illesztőpont bevonása esetén 0,5 méter körüli közepes hibával tudjuk tájékoztatni a videofelvételt, ami még éppen megfelel a célnak.



5. ábra. A számított eredmények a DJI_1 jelű kép esetében: a) a nyolc látható pont helyszínrajzi elrendezése, b) a számított RMSE értékek, ahol a fekete kör az átlagos értéket, a függőleges szakaszok pedig a 25 és a 75%-os kvantilis közötti értéktartományt jelölik (Jelmagyarázat: aff.: affín transzformáció; proj.: centrális vetítés adott számú illesztőponttal)

Figure 5. Results of the DJI_1 frame: a) horizontal position of the eight visible points, b) RMSE values where black points are the mean values, vertical lines indicate 25th and the 75th percentile (Legend: aff.: affine transformation; proj.: projective transformation with the given number of ground control points)



6. ábra. A számított eredmények a DJI_2 jelű kép esetében (A leírás az 5. ábra szerint.)

Figure 6. Results of the DJI_2 frame (For the description see Figure 5.)

A mérések során a képeken kevés esetben volt látható ötnél több pont, sőt, a tájékozást sok esetben három vagy négy illesztőponttal kellett elvégezni. Az 5. és 6. ábrából látszik, hogy a bevonható illesztőpontok számának csökkenésével hogyan növekszik a hiba átlagos értéke és szórása. Különösen a három pontból számított affín és a négy pontból számított centrális transzformáció eredményez magas hibát. Ez abból adódik, hogy ezekben az esetekben az illesztőpontok számával csak a transzformációhoz szükséges minimumkövetelményeket elégítjük ki. Kevesebb illesztőpont esetén az affín transzformáció átlagosan pontosabbnak és a körülményekre kevésbé érzékenynek bizonyult, mint az eggyel nagyobb szabadságfokú centrális vetítés. Tapasztalataink szerint tehát az utóbbit akkor célszerű alkalmazni, ha legalább öt illesztőpont látszik.

A szórás arra utal, hogy az RMSE értékek nagymértékben érzékenyek voltak a pontok elhelyezkedésére. Statisztikai összefüggést találtunk a transzformációba bevont illesztőpontok által kifizetett konvex sokszög területe és a tájékozás hibája között (7. ábra). Amennyiben a sokszög területe megközelíti a kép területét, az illesztőpontoknál fellépő hiba korrekciója a kép nagy részén interpolációt eredményez. Alacsony területarány mellett – azaz amikor

a pontok a kép egy kis részére terjednek ki vagy egy közös egyenes közelébe esnek – a korrekció a kép nagy részén extrapolációval történik. Ez utóbbi esetben akár többszörös hibát tapasztaltunk az egyenletesen megoszló pontokhoz képest.

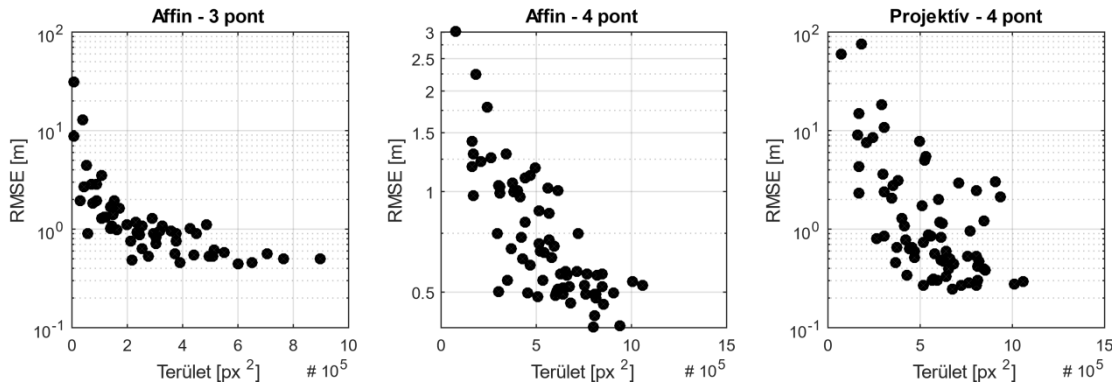
A képkockákat egymástól függetlenül tájékoztuk. Fotogrammetriában ismert az ún. sugárnyaláb-kiegyenlítési eljárás, amely a képek sokaságának külső tájékozási paramétereit és az illesztőpontok kiegyenlített koordinátáit egy „csomagban” számítja, az ellentmondásokat a legkisebb négyzetek módszerével minimalizálva (Kraus és Waldhäusl 1998). Ennek a módszernek a használatát itt nem teszteltük.

A MÉRÉSEK KIÉRTÉKELÉSE

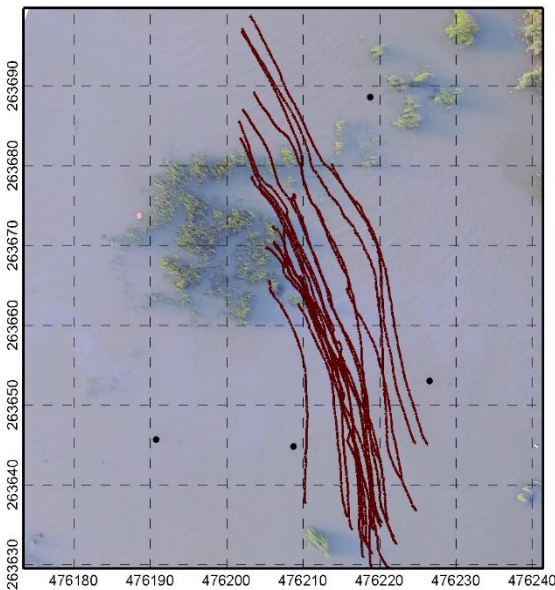
A mérési adatok felhasználásával egy 12 perc hosszú videóból előállított trajektória-sereget szemlélte a 8. ábra. E nyomvonalak előállításához 4 fps felbontást használtunk, mely a korábbi megállapításainkon alapul. A képek EOV koordináta-rendszerbe való transzformálásához az ábrán fekete körökkel jelölt pontokat használtuk. A részecskék beszórása felhő alakban történt, ezen alakzatot útjuk során is megtartották, bár e felhő némileg megnyúlt, mely az áramlási mező változékonyságára enged következtetni. E

trajektória-sereg csupán a mozgás egy lagrange-i lenyomata, hiszen az ábrán látható mozgások nem egy időben

mentek végbe. E tény a vizsgálatunk korlátja is, mivel a részecskék adagolása nem volt folyamatos.



7. ábra. A felhasznált illesztőpontokat határoló konvex sokszögek területe és az RMSE értékek kapcsolata
Figure 7. Connection between area of the convex hull of the GCPs and RMSE values



8. ábra. A meghatározott trajektóriák: barna színnel a részecskék útvonala, fekete körrel a használt illesztőpontok
Figure 8. Reconstructed trajectories: brown lines are the tracked tracers, black points show the identified reference markers

Néhány részecske elérte a növényzetfolt alvizét, a legtöbb viszont csapdázódott a növényzet szálai között. E megfigyelés szintén a mérési módszer korlátja, hiszen a részecskék nem képesek a növényzetfolt belsejében haladni. Tetten érhető a sodródási sebességmező időbeli változása is azon, hogy vannak egymást metsző nyomvonalak, hiszen a metszéspontokban a sebességvektor eltérő időpontokban különböző irányt vett fel. Korábbi cikkünkben példát mutattunk az elmozdulásvektorokból szerkeszthető lagrange-i sebességmezőre is (Szilágyi és társai, 2019).

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikkünkben bemutattuk a légi videofelvételre alapuló jelzőanyag-követés (LSPTV) alkalmazását tavak felszíni áramképeinek feltérképezésére. A vizsgálatunk eredményeképp meghatároztunk egy olyan mérési eljárást, amelynek eredményeként végül országos vetületi rendszerben kinyerhető a felszínen elmozduló jelzőrészecskék sebességvektora.

Növényfoltokkal tagolt vízterben a jelzőanyagok idővel sodródni és szétszóródnak, és így nemcsak a pontfelhő súlypontját kell követni a drón vízszintes elmozgatásával, de egyre nagyobb területet kell átfogni a drón emelésével. A magasságnak márpedig a megerősödő szél mellett korlátot szab a képfelbontás is: a korongokat az algoritmus csak akkor azonosította megbízhatóan, ha azok legalább három képpont szélességűek voltak. Emellett az akkumulátor kapacitása egyhuzamban 20-30 perces repülést engedett meg, a szélességtől függően. A kísérleteink során a leghosszabb dokumentált esemény 20 perces volt.

A jelzőanyagként használt méhviasz korongok könnyen felismerhetők a képen. Vízfelszín fölött természetesen figyelembe kell venni a felszín csillogását, amely polárszűrő segítségével részben kiszűrhető. A korongok nagy számban szükségesek a kampányokhoz, nemcsak a finom térfelbontás érdekében, hanem azért is, mert a korongok megtalálása és begyűjtése hosszadalmas. Ennek kapcsán fontos megjegyezni, hogy azért is esett a méhviaszra a választás, mert egyáltalán nem káros a környezetre, így elvesztése sem okoz problémát.

A technológia sekély tavi tesztelése során több olyan paramétert és bizonytalansági forrást azonosítottunk, amelyektől a mérések pontossága nagyban függ. Az algoritmushoz szükséges paraméterek közül végül meghatároztunk egy olyan együttest, amellyel az megbízhatóan észleli a részecskéket és az illesztőpontokat, valamint biztonságosan felelteti meg egymásnak az egyes részecskéket a videofelvétel egymást követő képkockáin. A feldolgozáshoz a 4 fps képfrekvenciát kiegyensúlyozott választásnak találtuk a céljainkra, mind a detektálási, mind a megfeleltetési szakaszban.

Számításaink megmutatták, hogy a mérés pontosságát nagyban befolyásolja a részecskék pozíciójának EOVS rendszerbe transzformálása. Az örökké változó, hullámzó és megcsillanó tófelszínen illesztőpontokat kell elhelyezni. A transzformáció elvégzéséhez minimum három illesztőpontot kell látnunk minden képen. Ez egy szükséges, de nem elégséges feltétele a transzformációnak, hiszen három illesztőpont esetén előfordulhat olyan rosszul kondicionált eset, amikor a pontok közel egy vonalban helyezkednek el, vagy a képeknek csak egy kisebb részét fogják

csak át (pl. annak következtében, hogy a felvételekkel a távol sodródott jelzőanyagot kell követni). E probléma csökkentésére az illesztőpontok sűrű és szabályos rácsalójú elrendezése egy kézenfekvő megoldás, de körülményes is. Alternatívaként, professzionálisabb GNSS eszközök alkalmazásával kellő pontosság elérhető illesztőpontok nélkül is, közvetlenül a drón külső tájékozási elemeinek felhasználásával. Ez a mérés előkészületeit minimálisra csökkenti és így gyorsan bevezethetővé teszi a légi LSPTV-t az olyan rövid ideig fennálló érdekes jelenségek dokumentálására, mint amilyen az erős szél elálltával visszalendülő tó.

Az olcsó, drónalapú légi felmérés más természettudományi és műszaki szakterületekhez hasonlóan a tavi hidrodinamikába is egy rendkívül hasznos mérési eljárást hozott be. Terepi kísérleteink és az utólagos elemzéseink megerősítették, hogy érdemes az LSPTV-t tavi környezetre specializálva továbbfejleszteni. Fontos megérteni, hogy a jelzőrészecskék sodródásában milyen szerepet játszik a szél, a hullámzás és a vízfelszín áramlása. Itt be nem mutatott eredményeink azt mutatják, hogy a hullámzás Stokes-sodrása domináns.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen tanulmány elkészült az Emberi Erőforrások Minisztériuma BME FIKP-VÍZ tématerületi programja, az Új Nemzeti Kiválóság Program ÚNKP-18-3-1 pályázata, valamint a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal NKFIH-K 120551 programja által támogatott kutatás segítetté.

IRODALOMJEGYZÉK

Babinec, A., Apeltauer, J. (2016). On accuracy of position estimation from aerial imagery captured by low-flying UAVs. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 5(3), 152-166.

Brovelli, M.A., Minghini, M. (2012). Georeferencing old maps: a polynomial-based approach for Como historical cadastres. *e-Perimetron*, 7(3), 97-110.

Creëlle, S., Roldan, R., Herremans, A., Meire, D., Buis, K., Meire, P., Troch, P. (2018). Validation of large-scale particle image velocimetry to acquire free-surface flow fields in vegetated rivers. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 6(3), 171-182.

Detert, M., Johnson, E., Weitbrecht, V. (2017). Proof of concept for low cost and non contact synoptic airborne river flow measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2780-2807.

Folkard, A.M. (2005). Hydrodynamics of model *Posidonia oceanica* patches in shallow water. *Limnology and oceanography*, 50(5), 1592-1600.

Fujita, I., Muste, M., Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397-414.

Gonzalez, C., Woods, R., Eddins, S. (2004). *Digital Image Processing using MATLAB*. London: Pearson-PrenticeHall, Inc., 2004, ISBN81-7758-898-2.

Homoródi, K., Józsa, J., Krámer, T., Ciralo, G., Nasello, C. (2012). Identifying wave and turbulence

components in wind-driven shallow basins. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 56(1), 87-95.

Hughes, M.L., McDowell, P.F., Marcus, W.A. (2006). Accuracy assessment of georectified aerial photographs: implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74(1-4), 1-16.

Kiss, M., Józsa, J. (2014). Measurement-based hydrodynamic characterisation of reed-open water interface zones in shallow lake environment. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 58(3), 229-241.

Kondziolka, J.M., Nepf, H. M. (2014). Vegetation wakes and wake interaction shaping aquatic landscape evolution. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environment*, 4, 106-119.

Kraus, K., Waldhäusl, P. (1998). *Fotogrammetria*. Tertia Kiadó, Budapest.

Lea, D.M., Legleiter, C. J. (2016). Refining measurements of lateral channel movement from image time series by quantifying spatial variations in registration error. *Geomorphology*, 258, 11-20.

Lloyd, P. M., Stansby, P. K., Ball, D. J. (1995). Unsteady surface-velocity field measurement using particle tracking velocimetry. *Journal of Hydraulic Research*, 33(4), 519-534.

Lükő, G., Zsugyel, M. (2018). Lagrangian Analysis of River Flow from UAV Videos to Characterize Mixing. *10th Eastern European Young Water Professionals Conference IWA YWP*, 85-91.

MathWorks (2019). *MATLAB Image Processing Toolbox: User's Guide*. The MathWorks Inc.

Meire, D., Kondziolka, J., Nepf, H. (2014). Interaction between neighboring vegetation patches: Impact on flow and deposition. *Water Resources Research*, 50(5), 3809-3825.

Muste, M., Fujita, I., Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, 44(4), 1-14.

Padró, J. C., Muñoz, F. J., Planas, J., Pons, X. (2019). Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75, 130-140.

Pannonhalmi, M., Sütthő, L. (2007). *A Fertő-tó múltja, jelene és jövőre*. ÉDUKÖVIZIG.

Rabah, M., Basiouny, M., Ghanem, E., Elhadary, A. (2018). Using RTK and VRS in direct geo-referencing of the UAV imagery. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 7(2), 220-226.

Sokoray-Varga, B., Józsa, J. (2008). Particle tracking velocimetry (PTV) and its application to analyse free surface flows in laboratory scale models. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 52(2), 63-71.

Szilágyi, M., Zsugyel, M., Krámer, T., Rehák, A., Baranya, S. (2019). Mapping the hydraulic impact of emergent lake vegetation patches using UAVs. *2nd International Symposium and Exhibition on Hydro-*

Environment Sensors and Software (old.: 1-10). Madrid, Spanyolország: IAHR.

Tauro, F. (2016). Particle tracers and image analysis for surface flow observations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(1), 25-39.

Tauro, F., Piscopia, R., Grimaldi, S. (2017). Streamflow Observations From Cameras: Large Scale

Particle Image Velocimetry or Particle Tracking Velocimetry? *Water Resources Research*, 53(12), 10374-10394.

Thumser, P., Haas, C., Tuhtan, J. A., Fuentes Pérez, J. F., Toming, G. (2017). RAPTOR UAV: Real time particle tracking in rivers using an unmanned aerial vehicle. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(14), 2439-2446.

A SZERZŐK



SZILÁGYI MARIANN 2017-ben szerzett okleveles infrastruktúra-építőmérnök diplomát a BME Építőmérnöki Karán. Jelenleg ugyanitt harmadéves doktorandusz hallgató, doktori kutatásában a sekély tavi egyedi és csoportos vízínövényzet-foltok hidrodinamikai hatásaival foglalkozik.

ZSUGYEL MÁRTON okleveles meteorológus-hidrológus, jelenleg tudományos munkatársként dolgozik az MTA-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoportjában. Fő kutatási területe a folyóvizek elkeveredési folyamatainak vizsgálata Lagrange-i módszerek használatával. Az elmúlt években a dróntechnológia terepi alkalmazásának lehetőségeit kutatja vízi környezetekben.

KRÁMER TAMÁS a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének egyetemi docense, szakterülete a felszíni vizek áramlásana. Sekély tavak szél keltette vízmozgásaival hallgató kora óta foglalkozik. PhD dolgozatát is ebben a témában szerezte 2007-ben. Aktuális kutatásai a tófelszín fölötti légköri és a vízi folyamatok összekapcsolt leírására irányulnak.

Mezőgazdasági aszály monitoring és aszály előrejelzés távérzékelte adatok alapján a Tisza vízgyűjtőn

Nagy Attila*, Tamás János*, Szabó Andrea*, Gálya Bernadett* és Fehér János*

* Debreceni Egyetem, Víz- és Környezetgazdálkodási Intézet, 4032 Debrecen, Böszörményi út 138. (email: attilanyag@agr.unideb.hu)

Kivonat

Napjainkban az aszályindexeket három fő csoportba sorolják: meteorológiai, hidrológiai és mezőgazdasági, amelyek között szoros összefüggés mutatható ki. Azonban a meteorológiai aszályindexek használatakor, például a Standardizált Csapadék Index (Standardized Precipitation Index - SPI) értékekkel nem határozható meg egy adott aszályos időszak során termelt kultúrművény (pl. kukorica) termésvesztesége. Emiatt a kutatásunk elsődleges célja egy olyan módszertan kidolgozása, amely információt szolgáltat a releváns aszálymutatók és az aszályos időszakban végbemenő hozamveszteségek hatékonyabb becslésére távérzékelte és spektrális adatok alapján. A cikk egy új számítási módszertant mutat be, amely az aszály kockázati szintjeinek fizikai meghatározásával korai információt biztosít a termésveszteség meghatározására. A kidolgozott módszer javíthatja a komplex aszálymonitoring rendszer kialakítását, amely segítséget nyújthat a gazdálkodóknak a termésveszteség előrejelzésében és annak pontosabb meghatározásában.

Kulcsszavak

Biomassza monitoring, távérzékelés, aszály hatásai és kockázatai, NDVI, vízgyűjtő.

Monitoring and prediction of agricultural drought in the Tisza River Basin based on remote sensing data

Abstract

Nowadays, drought indices are divided into three main groups: meteorological, hydrological and agricultural, with a close correlation between them. However, when using meteorological drought indices, such as e.g. the Standardized Precipitation Index (SPI) values, yields of a crop (e.g. corn) produced during a specific drought period cannot be determined. For this reason, the primary objective of our research was to develop a methodology that can provide information for a more accurate estimation of relevant drought indicators and yield losses during droughts based on remote sensed and spectral data. The paper presents a new computational methodology that provides early information on crop yields by determining the risk levels of drought. The developed method can improve the design of a complex drought monitoring system, which can assist hydrologists, meteorologists and farmers in predicting yield loss and determining it more accurately.

Keywords

Biomass monitoring, remote sensing, drought effects and risks, NDVI, river basin.

BEVEZETÉS

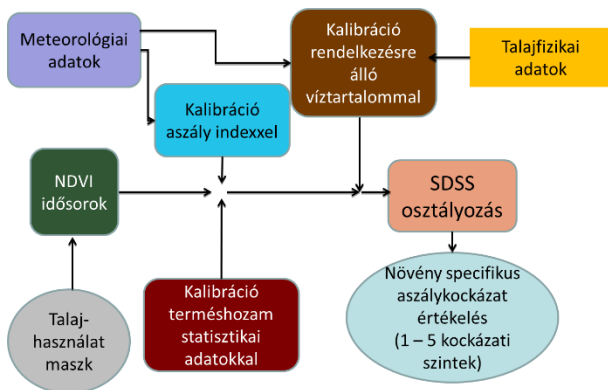
A talajfelszín biomassza mennyisége, aktivitása, valamint tér- és időbeli mintázata jelentős szerepet játszik a vízgyűjtő hidrológiai körforgásában. A biomassza nem csak az evapotranszpiráción keresztül hat a vízkészletekre, hanem az intercepcióval is. Az intercepció csökkenti a talajt érő csapadék intenzitását, befolyásolja a lefolyást, a beszivárgást és az eróziót is. Emellett egyes növénykultúrák, eltérő mezőgazdasági gyakorlatok, vetésforgó, valamint agrotechnika (növénytaplálás, művelés, növényvédelem, öntözés, gépesítés) befolyással vannak egy adott terület vízforgalmára. A meteorológiai aszályindexek az időjárás (leggyakrabban a csapadék és hőmérséklet) aszályintenzitásra gyakorolt hatását mutatják. A hidrológiai aszály a vízkészletek rendkívüli csökkenésével áll kapcsolatban, míg a mezőgazdasági aszály a termésveszteséggel vagy a növényzet víz-stressz állapotával (Niemeyer 2008). A fennálló körülményektől függetlenül, a három típusú aszályindex között szoros összefüggések vannak, a közöttük lévő kapcsolatokat viszont nem lehet egyértelműen számszerűsíteni. Így a különböző területeket vagy az ugyanazon területeken jelen lévő aszály különböző formáit nem lehet összehasonlítani (Tamás 2016, Tamás 2017). A meteorológiai aszály kiértékeléséből egy víz-

gyűjtő SPI értékeit felhasználva, egy adott aszályos időszak során bekövetkező termésveszteséget nagy bizonytalansággal lehet meghatározni (McKee és társai 1993). A terméscsökkenés várható mértéke azonban nagyon fontos adat lenne a tervezett beavatkozások tervezése során. A meteorológiai és hidrológiai aszály paraméterek (hőmérséklet, csapadék, páratartalom stb.) jól mérhetőek és kiértékelhetőek, valamint széles körben tesztelt statisztikai módszereken alapulnak (Dai és társai 2004, Sivakumar és társai 2011, Choi és társai 2013). Ezekből eltérően a mezőgazdasági aszályt több összetett tényezővel lehet számszerűsíteni, amelyek meghatározása bonyolult idő- és erőforrásigényes méréseket igényelnek. A növénytermesztési gyakorlatban jelenleg csak laboratóriumi körülmények között lehetséges a víz-stressz tünetek, mint a sztómaellenállás, hőmérsékleti sokk, pigment degradáció és a hozzáférhető talaj víztartalma, valamint a hidraulikus vezetőképesség, szántóföldi vízkapacitás, pF érték közötti kapcsolatok pontos mérése. Ezekből az adatokból és összefüggésekből a termés minőségi és mennyiségi degradációjának meghatározása is lehetséges. A beavatkozási idő mellett a probléma megjelenésének és térbeli kiterjedésének ismerete kritikus a gazdálkodók és döntéshozók számára, a kár csökkentése és annak megelőzése érdekében.

Az elmúlt két évtizedben a távérzékelés a mezőgazdasági aszály megfigyelésére és a termés hozam becslésére hasznos eszközként jelent meg, amely több hagyományos megoldást, mint például a szántóföldi kísérleteket vagy szimulációs modelleket egészíti ki. Elsősorban a repülőgépekre vagy műholdakra szerelt távérzékelésre használható szenzorokkal történik a felvétel, melyekkel egy régió minden egyes területének minden egyes pontja, minden termeszési évben potenciálisan detektálható (Lobell 2013). A távérzékeléssel történő termés hozam becslésére számos módszer ismert (Moulin és társai 1998, Gallego és társai 2010). A korai próbálkozások főleg az egyszerű vegetációs indexekre (VI) épültek, amelyeket a vörös (RED) és közeli infravörös (NIR) hullámhosszakon számítottak ki (Tucker 1979, Sellers 1987), a spektrum többi részét inkább a kifinomultabb mérésekre használták fel (Gitelson és társai 2003). A búza és a kukorica esetében a vegetációs indexek segítségével 80%-os biztonsággal megbecsülhető a termésvesztés (Wiegand és Richardson 1990, Shanahan és társai 2001, Nagy és társai 2018). Kutatások igazolják, hogy a termés hozam becslése nagy pontossággal lehetséges távérzékelési technikákkal (Tamás és Bozán 2009, Nagy és Tamás 2013, Tamás és társai 2015b, Becker-Reshef és társai 2010, Lobell és társai 2010).

Vizsgálatunk célja egy olyan modellfolyamat kidolgozása volt, amely információt szolgáltat a releváns aszályindexek és termésvesztések hatékonyabb becslésére. Jelen tanulmányban az aszály hatásait távérzékelési módszerrel vizsgáltuk vízgyűjtő szinten. A modellfolyamat azonosítja azokat a rendelkezésre álló és legalkalmasabb távérzékelési adatokat és földrajzi információs rendszerek (GIS) transzformációs kalibrációs eszközeit, amelyekkel a távérzékelésre alapozott mezőgazdasági aszály megfigyelése és prognózisa megvalósítható. A kutatás során a földhasználati, talajfizikai, meteorológiai és a műholdas adatokat integráltuk be egy olyan modellbe, amelynek alkalmazásával lehetővé válik egy növény-specifikus aszálykockázat elemzés.

A modellkészítés lépései az alábbiak voltak: adatgyűjtés és feldolgozás; biomassza adatok és aszálykockázati szintek azonosítása és kalibrációja, valamint aszály kockázatelemzés és térképezés (1. ábra).



1. ábra. Az alkalmazott modell fő lépései (NDVI: Normalizált Vegetációs Index, SDSS: térbeli döntéstámogató rendszer)

Figure 1. The main steps of the applied model (NDVI: Normalized Vegetation Index, SDSS: spatial decision support system)

Kutatás során vizsgált terület a Tisza vízgyűjtőterületén elhelyezkedő Békés, Borsod-Abaúj-Zemplén, Csongrád, Hajdú-Bihar, Heves, Jász-Nagykun-Szolnok és Szabolcs-Szatmár-Bereg megyék szántóterületei voltak. Hidrológiailag a Kárpát-medence egyike a Föld legzártabb medencéinek, a vizsgált alföldi régió pedig mérsékelten száraz, arid jellegű. A terület 72%-a szántóterület, emiatt jellemző rá az intenzív mezőgazdasági tevékenység.

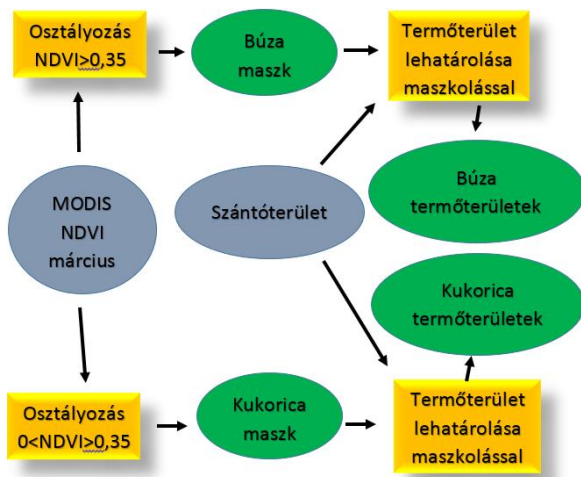
AZ ADATOK GYŰJTÉSE ÉS FELDOLGOZÁSA

A Landsat (és a hozzá hasonló multispektrális műholdak, mint pl. SPOT) a legtöbb mezőgazdasági területről megfelelő térbeli felbontással szolgáltatott adatokat, azonban a 16 naponként készült felvételek között gyakori a felhőborítottság megjelenése, amely nehezebb teszi egy vegetációs időszakon belül a felvételek megfelelő értékelését (Lobel 2013). Másik probléma a hozam detektálásának pontosságában a térbeli felbontás. Reeves és társai (2005) 1 km-es MODIS adatokat használtak fel arra, hogy a búza hozamát Észak-Dakotában és Montanában megbecsüljék, viszont az átlagos farmméret (amely körülbelül 14-15 ha) kisebb a kelet-közép-európai régiókban, mint az USA-ban. Emiatt a mezőgazdasági termelés aszálymonitorozására, hozamsökkenés megállapítására közvetlenül olyan adatsorok nem alkalmasak, mint a faPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation – Fotoszintetikusan aktív sugárzás elnyelési aránya) vagy az AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer - speciális igen nagy felbontású radiométer) adatok, kicsi térbeli felbontásuk miatt (>1km) (Gobron és társai 2009). Ebben a tanulmányban a távérzékelési adatok forrása a MODIS NDVI (MOD13 16-napos) adatai voltak. A képeken 16 napos klorofill intenzitás és biomassza mennyiség eredményei figyelhető meg a felhőtlen, tiszta felvételeken. Ezenkívül a MODIS NDVI felvételeknek 250 m-es térbeli felbontása van, ami 6,25 ha/pixel-t jelent, ez az érték már elégséges lehet a kelet-közép-európai régióban a szántóföldi és regionális léptékű hozam monitorozására.

Az NDVI kalibrációjára öt fő lépést hajtottunk végre:

1. MODIS adatok átszámítása,
2. adatsorok kiemeléséhez maszkolás kialakítása,
3. a MODIS NDVI idősorok kialakítása maszkokkal,
4. adat mátrixok kialakítása az NDVI képsorokból,
5. az NDVI adatmátrixok és a hozam adatok normalizálása.

Az ArcGIS 10.2 szoftvert használtuk az NDVI felvételek feldolgozására és a modellek létrehozására. Először elkészítettük azokat a Boolean maszk rétegeket, amelyekkel a MODIS adatok kivághatóak. A nemzetközileg elérhető földhasználati CORINE Landcover (CLC) 2012. évi adatbázisa és a USGS Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digitális domborzati modellek adatai alapján leválogattuk az alföldi szántóterületeket (200 m tengerszint feletti magasságig). Ezután az NDVI adatok osztályozásával a lehetséges búza és kukorica termőterületek kerültek leválogatásra (2. ábra). A búza és a kukorica termőterületek szántó területekből való leválogatásához az adott év február végi (vagy márciusi, hótakaró függvényében) és július közepi MODIS NDVI adatait használtuk.



2. ábra. ArcGIS modell, amellyel létrehozuk a maszkot, valamint a búza és kukorica területeknek a kivonását
Figure 2. ArcGIS model to create a mask and extract wheat and corn fields

A február végi, márciusi, valamint a júliusi adatok alapján vegetáció borítottsági Boolean térképeket hoztunk létre (2 maszk/év). A maszkok segítségével lehatároltuk az adott évben a búza, valamint a kukorica vegetációs periódusában a növényzettel borított helyeket. A márciusi növényzettel fedett és a júliusi fedetlen területek a potenciálisan búza, míg a márciusi, növényzettel nem fedett és a júliusi vegetációval borított területek a potenciálisan kukorica termőterületek. Ezzel a módszerrel búza esetében minden állandó borítottsággal jellemezhető növény pl. lucerna, vagy egyéb tavaszi vetésű növény (kukorica, napraforgó stb.) termőterülete zárható ki. Kukorica esetében pedig az őszi vetésű növények, állandó talajborítással bíró növények (lucerna stb.) potenciális termőterületei. A maszkok megbízhatóságát búza esetében egyéb őszi vetésűk, kukorica esetében pedig egyes ipari növények rontják. Ugyanakkor ezek vetésterületi aránya jóval alacsonyabb az őszi búza és a kukorica vetésterületéhez képest. Az így előállított vegetációs maszkokat integrálva a szántóterületekkel, egy adott növény termőhelyeinek kivágására alkalmas maszk rétegeket hoztunk létre az adott évre.

A maszkok segítségével minden egyes év adott növényi vegetációs periódusa összes adatából megyei szintű átlag NDVI értékeket nyertünk ki. A megyei kivágatokat indokolta, hogy csak megyei szintű termésadatok (KSH) álltak rendelkezésre az NDVI adatok kalibrációjához. Ezek alapján az átlag NDVI értékek adatmátrixát hoztuk létre a megyékre. Az adatmátrix megyei átlag NDVI értékei szolgálták az NDVI adatok kalibrációjának alapját. A következő lépésben az NDVI és a hozam adatokat (t/ha) vizsgáltuk, amelyet az adatkészletek normalizációjával végeztünk. Így a két adatállomány értéke 0 és 1 közé esett, ezáltal statisztikailag ki tudtuk értékelni.

A normalizálást a következőképpen végeztük el:

$$\text{Normalizált érték} = (\text{Érték} - \text{Érték}_{\min}) / (\text{Érték}_{\max} - \text{Érték}_{\min})$$

ahol, a *max* és *min* értékek a sűrű vegetációra és a legacsonyabb vegetációs fedésre vonatkozó értéket jelenti. A normalizálás során a maximum és minimum értékeket a

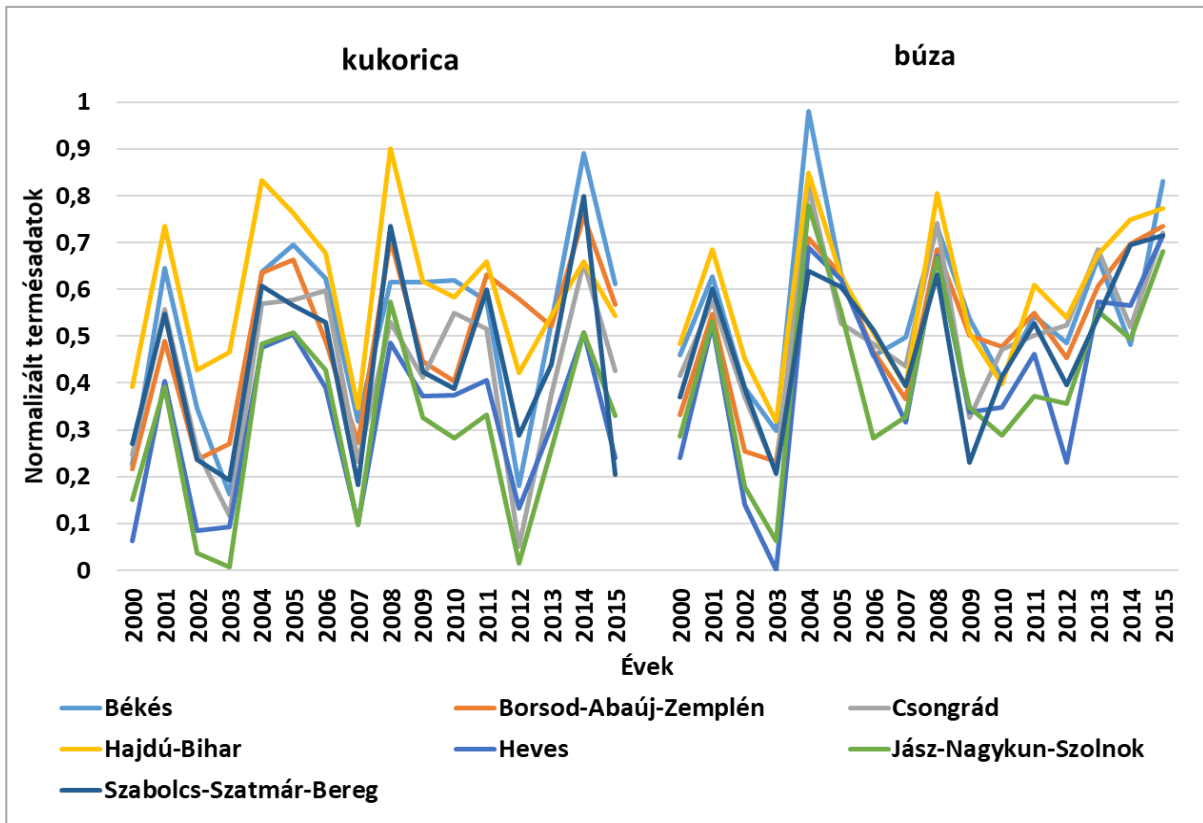
teljes NDVI adatállományból határoztuk meg.

AZ ASZÁLY KOCKÁZATI SZINTEK AZONOSÍTÁSA ÉS KALIBRÁLÁSA

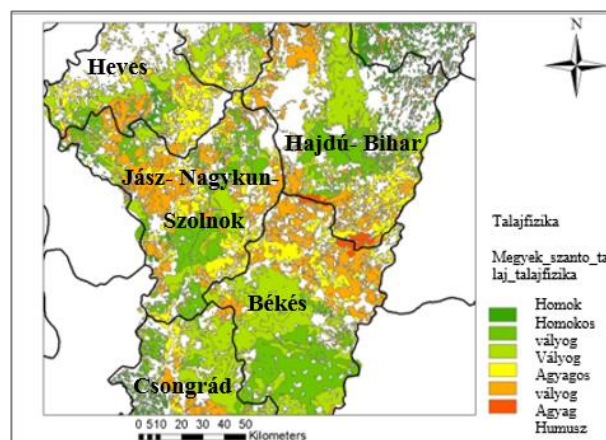
Az NDVI értékekre alapozott aszálykockázati szinteket a hozam- és meteorológiai adatokkal kalibráltuk. A MODIS NDVI idősoros adatok és hozam adatok 2000-tól 2016-ig álltak rendelkezésünkre. A hozam adatokra vonatkozólag, mind a kukorica mind pedig a búza esetében súlyos hozamvesztéseket észleltünk 2000, 2002, 2003, 2007 és 2012-ben. 2001, 2005 és 2006-ban figyelemre méltó hozamokat mutattunk ki, 2010 és 2011-ben átlagos hozamértékeket figyelhettünk meg (3. ábra). Ezek a megállapítások szoros összefüggésben vannak az SPI értékekkel és a meteorológiai adatokkal, kivéve a 2010-es évet, amikor extrém mennyiségű csapadékot (900-1300 mm/év) figyelhettünk meg a Tisza vízgyűjtőjének területén. Ennek következtében hosszú ideig a belvízborítás és a növénybetegségek megjelenése volt jellemző a szántóföldeken, ami miatt a terméshozamok mennyisége átlagos maradt.

A hozamok alakulása megyénként eltérő volt. Az aszályhelyzet ellenére a legnagyobb kukorica és búza terméshozam értékeket Hajdú-Bihar és Békés megyékben figyelhettük meg. Ezzel szemben, a legrosszabb terméshozam értékek Jász-Nagykun-Szolnok és Heves megyékben voltak jellemzőek. Ennek oka feltehetően a különféle talaj jellemzők hatása volt (konkrét vizsgálatokat ennek megválaszolására nem folytattunk). Hajdú-Bihar és Békés megyékben nagyon jó vízgazdálkodási jellemzőkkel rendelkező csernozjom talajok találhatóak, Jász-Nagykun-Szolnok és Heves megyékben viszonylag több agyagos és agyagos-vályog talaj található, amelyek nagyon érzékenyek a szárazság megjelenésére (Várallyay és társai 1994) (4. ábra).

Az NDVI adatokat hozam adatokkal kalibráltuk. Mivel a terméshozam adatok az adott év megyei bontásban rendelkezésre álló hozamadatait tükrözik, míg MODIS NDVI felvételtől a teljes vegetációs periódusból rendelkezésre állnak az adatok, először az összegyűjtött és normalizált NDVI adatokat csoportosítottuk. A 16 év adatait felhasználva a csoportosítás alapját az egy éven belüli időpontok adták, majd az összes adatot egy mátrixba rendeztük. A mátrix a normalizált NDVI adatok változóit tartalmazta, egy meghatározott időpontban (a változók száma különbözött minden növényfaj esetén a meghatározott növény vegetációs időszak alapján), valamint változóként jelent meg a hozam érték. Az adatbázis alapján lineáris regresszióval vizsgáltuk a hozam adatok és az egyes időpontokban mért átlag NDVI adatok közötti összefüggéseket. Az eredmények alapján szignifikáns összefüggés mutatható ki a kukorica hozam és azon NDVI adatok között, amelyek június közepétől augusztus végéig tartó intervallumból származnak. Ez a tartomány lefedi a kukorica leginkább szárazságérzékeny virágzási időszakát a júliust is. A regresszió analízis alapján, a búza esetében, kizárólag júniusra tudtunk megbízható hozamelőrejelzést számítani (1. táblázat). Az eredményekből arra következtethetünk, hogy a talaj hatása a hozamokra az NDVI értékek alapján kimutatható. Ellenkező esetben nem kaptunk szignifikáns korrelációt. A mérsékelt korrelációt a talaj hatásával is magyarázhatjuk, mivel csak a megyékre vonatkozó hozam adatok álltak rendelkezésre, azonban a vízgyűjtők vagy a talajtípusok poligonjai nem.



3. ábra. A kukorica és búza terméshozamának változásai 2000-2015 között (KSH és INSSE adatok alapján)
Figure 3. Changes in yield of maize and wheat between 2000 and 2015 (based on KSH and INSSE data)



4. ábra. Az érintett megyék talajfizikai jellemzői a Tisza vízgyűjtő területén (Magyarország agrotopográfiai térképe alapján)
Figure 4. Soil physics indicators of the affected counties in the catchment area of the Tisza (based on an agrotopographic map of Hungary)

1. táblázat. A normalizált NDVI értékek és a hozam közötti korreláció búza és kukorica esetén
Table 1. Correlation between normalized NDVI values and yield for wheat and maize

	9-Jún.	25-Jún.	11-Júl.	27-Júl.	12-Aug.	28-Aug.
Kukorica		0.65*	0.70*	0.69*	0.68*	0.54*
Búza	0.51*	0.63*				

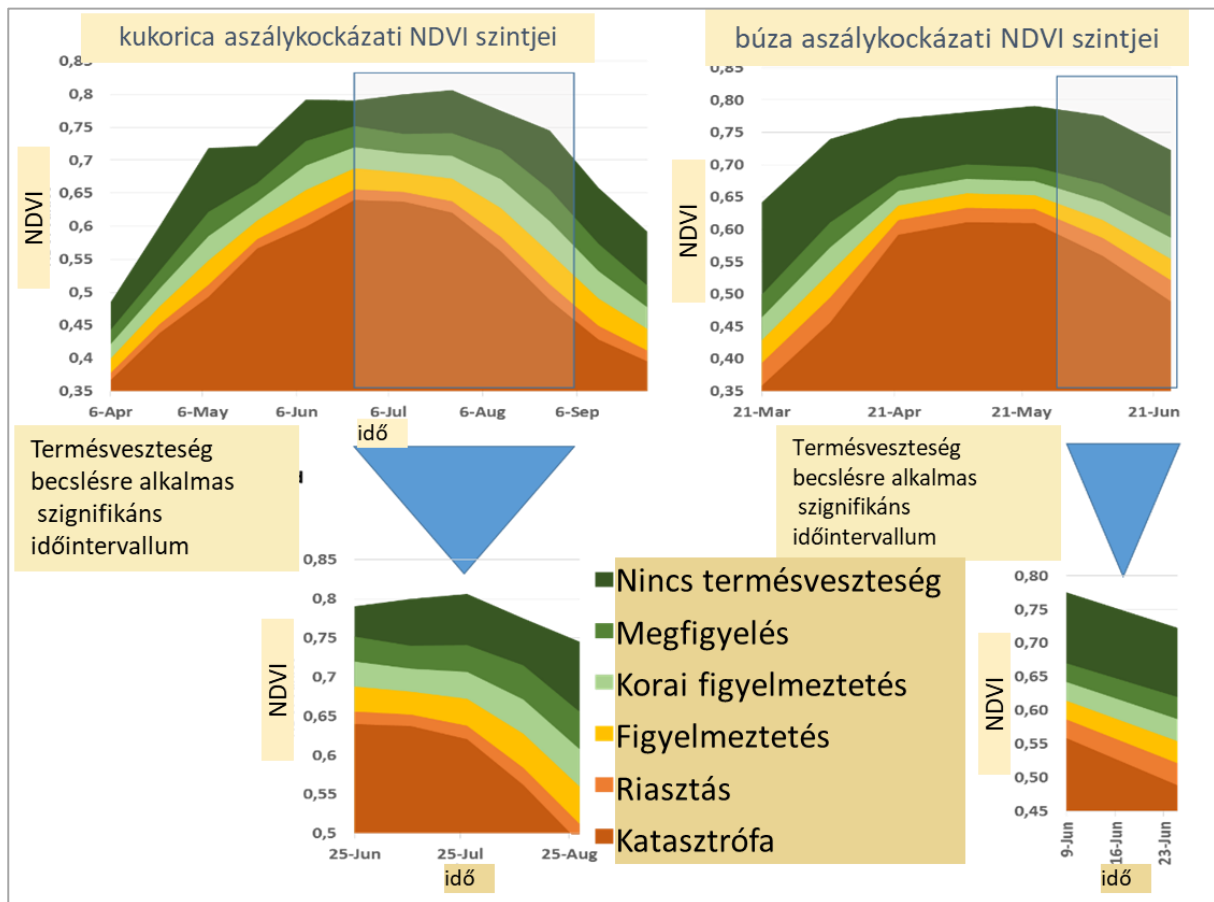
*szignifikáns ($p < 0.05$)

A modellverifikációt normalizált átlagos négyzetes eltérés (Normalized Root Means Square Error – NRMSE) alapján végeztük. Búza esetén átlagosan 13,9-14%, míg kukorica esetén 15%-os volt. Emellett számítottuk az NDVI alapján becsült és a valós termésmennyiségek közötti abszolút eltéréseket. A búza esetében az előrejelzett hozam értékek becsült hibataromány 0,819-19,08% között alakult, míg kukoricánál 0,299-17,14% között.

A lineáris regresszió eredményei, a hozam és a normalizált NDVI leíró statisztikája alapján referencia spektrum görbéket állítottunk elő, hogy meghatározzuk az egyes aszálykockázati szinteket, úgy mint a megfigyelés, korai figyelmeztetés, figyelmeztetés, riasztás és a katasztrófa (5. ábra). Az aszálykockázati szintekhez tartozó termésvesztesség mértékét a búza és a kukorica termesztés jövedelmezősége határozta meg, amely átlagosan 40 % körüli volt a

vizsgált időszakban (Salamon és társai 2011, Buzás 2018). Ettől nagyobb mértékű termésvesztés, amely a

termelési érték hasonló csökkenésével jár veszélyezteteti a jövedelmezőséget, azaz katasztrófális mértékű.



5. ábra. Aszálykockázat és NDVI jelzőszintek kukoricára és búzára
Figure 5. Drought risk and NDVI indicator levels for corn and wheat

Megfigyelés (Watch): Növényi víz - stressz érzékeny fenológiai fázisokban megfigyelhető.

Korai figyelmeztetés (Early Warning): Jelentős növényi víz-stressz figyelhető meg. A rendelkezésre álló víztartalom közel kritikus szintű és a gazdálkodók számára javasolt a beavatkozások előkészítésének a megkezdése. A várható potenciális veszteség elérheti a 10%-ot.

Figyelmeztetés (Warning): Növényi stressz szignifikáns biomasza károsodást okoz, el kell kezdeni a beavatkozást. A várható potenciális veszteség elérheti a 20%-ot.

Riasztás (Alert): A gazdálkodónak visszafordíthatatlan vegetációs károsodása alakul ki, ami profit veszteséggel jár. A várható potenciális veszteség elérheti a 30%-ot.

Katasztrófális (Catastrophe): Komoly károsodás és profit veszteség várható. A várható potenciális veszteség elérheti a 40%-ot.

Konkrét NDVI szinteket és küszöbértékeket lehetett kiszámolni a hozamokra és a termésvesztésekre. Meg kell említenünk, hogy a különböző fajok, fajták vagy hibridek nagymértékben befolyásolhatják a termés hozamokat. A kukorica korai fajtái kevesebb hozamot érnek el, mint az őszi fajták. A FAO éréscsoport 100-as hibridjei átlagosan 1 t/ha-ral képesek többet termelni ebben a régióban, mint más területeken. Azonban azt is figyelembe kell venni, hogy a később aratott fajták vagy hibridek növelik

a termésnövekedés kockázatát, mivel a virágzási időszak közvetlenül a leginkább aszályos nyári hónapok közepére esik. Lényeges kérdés, hogy miért csak a növények középső és utolsó fenológiai fázisában tudunk szignifikáns korrelációt kimutatni. A válasz a növények regenerációs képességében van. Például, ha a búza megjelenése gyenge, vagy egy aszályos időszak volt korábban tavasszal, de előtte nedves az őszi vagy a tavasz második fele, akkor valószínűsíthető, hogy jó lesz a búza termése. Az NDVI értékek hozam általi kalibrálása után a validálást meteorológiai adatok alapján végeztük el. Ugyanakkor magasabb éves átlaghőmérséklet és a kevesebb csapadék rövidebb vegetációs ciklust eredményez. Ezt és a klímaváltozást figyelembe véve a jövőben a Tisza vízgyűjtőjére alacsonyabb éves átlagos NDVI értékek várhatóak. A magas NDVI értékek jellemzően csapadékos körülmények között fordulnak elő, míg az alacsony NDVI értékek meleg és száraz éghajlati körülményeknél jellemzőek. Ez az NDVI értékekkel kapcsolatos jelenség főleg augusztusban figyelhető meg átlagos években és a többlet víz és/vagy aszálykockázat által veszélyeztetett szélsőséges években.

A termésvesztés szempontjából lényeges és számos aszályindex, például SPI bemeneti adata, a talaj nedvességtartalom. Ezért az Európai Aszálymegfigyelő Központ (European Drought Observatory (EDO) talajnedvesség eltérés (soil moisture anomaly) adatait is összevetettük az

NDVI-adatokkal. Az összefüggésvizsgálat alapján mérsékelt szignifikáns korreláció ($r^2 = 0,62$, $p = 0,008$) mutatható ki a talajnedvesség eltérés és az NDVI értékek között. Az eredmény igazolja, hogy az NDVI adatok nemcsak a hozam adatokkal, de a növényi vízellátottság egyik fontos paraméterével, a talajnedvességgel is összefügg, megerősítve az NDVI adatok mezőgazdasági aszálymonitoringban való alkalmazhatóságát.

AZ ASZÁLY KOCKÁZATÉRTÉKELÉSE ÉS TÉRKÉPEZÉSE

Az aszályhoz kapcsolódó terméseszközök jelzőszintjeinek azonosítása után a Mezőgazdasági Aszály Monitorozó és Hozamvesztés Előrejelzési Módszer kidolgozására került sor. A specifikus aszálykockázati területek termésvesztésének értékelése a MODIS NDVI képek osztályozásával, térképezésével és a különböző aszályossági kockázati szintek számításával történt a legszárabb régió azonosítására. Az aszály kockázatértékelési és térképezési vizsgálatok során kapott eredmények alkalmasak az aszály által érintett területek azonosítására területek meghatározására. Az adatok hozzásegítenek az aszályos területeken a terméshozamok előrejelzésében és a lehetséges termésvesztés becslésében a számításban. Az aszálytérképet az NDVI képekből az aszálykockázati szintekhez tar-

tozó NDVI küszöbértékek alapján lehet előállítani. A számításokhoz egy átlagos személyi számítógép (500 GB HDD, 4 GHz processzor, 8 GB memória) kapacitása elegendő, ugyanakkor speciális térinformatikai szoftver igény van (pl ArcGIS), amellyel a projektranszformáció és képosztályozás elvégezhető, valamint a mintaterületünk megjeleníthető. Ha a fenti feltételek adottak és a legfrissebb, fentebb meghatározott időszakból származó MODIS NDVI adatok, valamint az búza vagy kukorica termőterület térhelyes adatai rendelkezésre állnak, gyors információt kaphatunk a várható termésvesztés mértékéről. Példaként az aszályal érintett 2003-as és egy átlagos csapadékellátottságú 2008-as év aszálykockázati térképezését végeztük el a Tisza vízgyűjtőterületére, annak magyarországi területére és két megyére. A hozamvesztés előrejelzése a június 6-i NDVI felvétel alapján történt búza, míg július 1-i felvétel alapján valósult meg kukorica esetén. Az aszálykockázati térképek pixelről pixelre jelenítik meg a hozamvesztéseket. Az aszályos és az aszálymentes években bekövetkező terméseszközök között jelentős különbség tapasztalható. Az aszálykockázati térkép alapján az eltérő aszálykockázati területek is lehatárolhatók, egymáshoz viszonyított arányuk könnyen számíthatók, eltérő területek, régiók, vagy vízgyűjtők, vagy az évek közötti eltérések egyszerűen számszerűsíthetők (2. táblázat).

2. táblázat. A búza és a kukorica különböző aszálykockázati területeinek aránya %-ban (100% az érintett vizsgált terület)
Table 2. Percentage of different drought risk areas of wheat and maize in % (100% is the entire study area)

Kockázati szint	2003 (aszályos év)				2008 (optimális év)			
	Tisza vízgyűjtő	Tisza vízgy. magyar része	Jász- Nagykun-Szolnok	Hajdú-Bihar	Tisza vízgyűjtő	Tisza vízgy. magyar része	Jász- Nagykun-Szolnok	Hajdú-Bihar
Búza (terület %)								
Katasztrófális	38,44	45,38	59,08	34,80	11,99	13,42	15,73	4,77
Riasztás	8,25	8,27	7,84	7,70	5,05	5,23	5,40	3,30
Figyelmeztetés	8,29	7,96	6,99	8,03	0,45	4,41	4,62	3,04
Korai	10,59	9,75	7,50	10,69	8,30	8,09	8,75	6,13
figyelmeztetés	7,18	6,42	4,51	7,82	10,14	9,69	10,57	9,06
Megfigyelés	27,25	22,22	14,07	30,96	64,07	59,15	54,92	73,70
Kukorica (terület %)								
Katasztrófális	51,77	51,86	66,06	20,92	24,54	19,85	21,24	10,74
Riasztás	2,94	8,06	2,11	1,80	2,78	1,90	2,15	1,27
Figyelmeztetés	8,93	8,11	6,62	7,03	9,92	6,87	6,92	4,97
Korai figyelmeztetés	8,93	7,83	6,46	8,92	11,90	8,83	9,73	6,77
Megfigyelés	8,38	2,51	5,99	10,18	12,46	10,61	11,52	9,54
Nincs	19,05	21,63	12,76	51,16	38,39	51,94	48,44	66,70

Jász-Nagykun-Szolnok (JNSZ) és Hajdú-Bihar (HB) megyék kiválasztásának oka, hogy az aszályos években Hajdú-Bihar megyében volt a legjobb, míg jó csapadékellátottságú években Jász-Nagykun-Szolnok megyében volt a legrosszabb terméshozam. Ezt jól tükrözik a különböző aszálykockázati területek közötti eltérések; 2003-ban JNSZ területének 60%-a katasztrófális búza terméshozamot mutatott, míg HB területeinek csak 35%-a volt katasztrófális besorolású. Kukorica esetén a különbség még egyértelműbb. A csapadék 2008-as év adatai

alapján is HB megyében fele, harmada volt a katasztrófális területek aránya JNSZ megyéhez képest. Az eltérés oka valószínűleg a talaj tulajdonságokra vezethető vissza: JNSZ-ban nagyobb a rossz vízgazdálkodású és rossz vízháztartással rendelkező homokos vagy gyakran sós agyagtalajok aránya, mint HB-ban. A talaj tulajdonságok hatással vannak a biomasszára, amely az NDVI értékekben is megmutatkozik. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a talajtulajdonságok befolyásolhatják az egyes területek, pl JNSZ megye, aszályérzékenységét.

KÖVETKEZTETÉSEK

A MODIS NDVI idősoros adatok, földhasználati és domborzat modellek termésszámításokkal történő kalibrációjával új, távérzékelésre alapozott mezőgazdasági aszálymonitoring és termésveszteség becslő módszert fejlesztettünk ki, amellyel a betakarítás előtt 4-6 héttel előrejelezhető a búza és a kukorica lehetséges termésveszteségei. Az aszályok hatása a mezőgazdaságra jóval az aratási idő előtt meghatározhatóak, amely a közép-kelet-európai régióban az érdekeltek számára kritikus az élelmezés biztonságát és kereskedelmet illetően. A mezőgazdasági aszálymonitoring és termésveszteség becslő módszer hozzájárulhat az aszálytal leginkább sújtott területek térbeli lehatárolásához elősegítve a beavatkozási lehetőségek pontosabb tervezését. Az aszály következményeként kialakuló lehetséges várható termés mennyiség csökkenéséből eredő készletbizonytalanság hatásainak mérséklésére irányuló döntések előkészítésében is szerepet játszhat azáltal, hogy egyes területekre vonatkoztatva is számítható a lehetséges termésveszteség mértéke. Emellett az Országos Vízügyi Főigazgatóság által kidolgozott Operatív aszály- és vízhiánykezelő monitoring rendszert (Fiala és társai 2018) egészítheti ki, amely javítaná annak mezőgazdasági alkalmazhatóságát különösen, mivel a termésveszteség összekapcsolható a tőzsdealapú aktuális árindexálással is (Tamás és társai 2015a). Ez egyben megoldás lenne a napjainkban folyamatosan vitatott öntözési beavatkozások megtérülési viszonyaira. A kutatásaink további tervezett iránya a talajtani adatok leskálázása, ezzel a VGT felszíni vízgyűjtőinek és a mezőgazdasági tábláknak (elsősorban a precíziós mezőgazdasági termelőket bevonva) valós idejű hidrológiai kapcsolatrendszerének kialakítása, amelyben a GINOP-2.3.3-15-2016-00028 számú *Nemzetközi területi vízgazdálkodási és klíma adaptációs műszerközpont létrehozása* című projekt nemzetközi színvonalú infrastruktúrát biztosít, és ehhez várjuk a téma iránt érdeklődő kutatókat közös munkára.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a GWP CEE és a WMO Közös Integrált Aszálymenedzsment Programja, valamint a TÁMOP 4.2.4. A/2-11-1-2012-0001, *Nemzeti Kivállóság Programnak* és a *Komplex vidékgazdasági és fenntarthatósági fejlesztések kutatása, szolgáltatási hálózatának kidolgozása a Kárpát-medencében* című projekt támogatta. Projekt azonosító szám: EFOP-3.6.2-16-2017-00001.

IRODALOM

Becker-Reshef, I., Vermote, E., Lindeman, M., Justice, C. (2010). A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data. *Remote Sens. Environ.* 114: 1312–1323.

Buzás, F. (2017). 5. A búzatermesztés költség- és jövedelemviszonyai. *Őstermelő*, 21(5):54-58.

Choi, M., Jacobs J.M., Anderson, M.C., Bosch, D.D. (2013). Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables. *Journal of Hydrology*, 476: 265–273.

Dai, A., Trenberth, K.E., Qian, T. (2004). A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002:

Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming. *Journal of Hydrometeorology* 5: 1117-1130.

Gallego, J., Carfagna, E., Baruth B. (2010). Accuracy, Objectivity and Efficiency of Remote Sensing for Agricultural Statistics. *Agricultural Survey Methods* John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, United Kingdom 193–211.

Gitelson, A.A., Viña, A., Arkebauer, T.J., Rundquist, D.C., Keydan, G., Leavitt B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophys. Res. Lett.* 30: 1248.

Gobron, N., Verstraete, M.M. (2009). Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR) Global Terrestrial Observing System NRC, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Rome. 14.

Fiala, K., Barta, K., Benyhe, B., Fehérvári, I., Lábdy J., Sipos, Gy., Győrffy, L. (2018). Operatív aszály- és vízhiánykezelő monitoring rendszer. *Hidrológiai Közöny* 98. évf. 3. szám. pp. 14-24.

Lobell, D. B. (2013). The use of satellite data for crop yield gap analysis. *Field Crops Research* 143: 56–64.

Lobell, D. B., Ortiz-Monasterio, J.I., Lee A.S. (2010). Satellite evidence for yield growth opportunities in Northwest India. *Field Crops Research* 118: 13–20.

McKee, T. B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Preprints Eighth Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Anaheim (Ca), 17-22 January 1993. AMS, 179-184.

Moulin, S., Bondeau, A., Delecalle, R. (1998). Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. *Int. J. Remote Sens.* 19 1021–1036.

Nagy, A., Tamás, J. (2013). Non-invasive water stress assessment methods in orchards. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(01-04): 366–376.

Nagy, A., Fehér, J., Tamás, J. (2018): Wheat and maize yield forecasting for the Tisza river catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics. *Computers and electronics in agriculture*, 151:41-49 DOI: 10.1016/j.compag.2018.05.035

Niemeyer, S. (2008). New drought indices. In: López-Francos A. (ed.) *Drought management: scientific and technological innovations*. Zaragoza: CIHEAM, 2008. p. 267-274. *Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens*; n. 80. 1. International Conference on Drought Management: Scientific and Technological Innovations, 2008/06/12-14, Zaragoza, Spain

Reeves, M. C., Zhao, M., Running, S. W. (2005). Usefulness and limits of MODIS GPP for estimating wheat yield. *Int. J. Remote Sens.* 26: 1403–1421.

Salamon, L., Tell, I., Kacz, K., Hegyi J. (2011). Növénytermesztési ágazatok ökonómiája. Debreceni Egyetem, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Pannon Egyetem TÁMOP-4.1.2-08/1/A-2009-0010 projekt 88.

Sellers, P. J. (1987). Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. II. The role of

biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sens. Environ.*, 21: 143–183.

Shanahan, J.F., Schepers, J. S., Francis, D. D., Varvel, G. E., Wilhelm, W. W., Tringe, J. M., Schlemmer, M. R., Major, D.J. (2001). Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agron. J.* 93: 583–589.

Sivakumar, Mannava V.K., Raymond P. Motha, Donald A. Wilhite and Deborah A. Wood (Eds.) (2011). Agricultural Drought Indices. *Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices*, 2-4 June 2010, Murcia, Spain: Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. AGM-11, WMO/TD No. 1572; WAOB-2011. 197.

Tamás, J. (2016). Kihívások az aszálykutatás területén. *Hidrológiai Közlöny*. 96. évf. 2. szám. pp. 13-20.

Tamás, J. (2017). Az aszály. *Magyar Tudomány*. 10. DOI: 10.1556/2065.178.2017.10.6

Tamás, J., Bozán, Cs. (2009). Biomass productivity on the Békés-Csanád loess plateau. *Cereal Research Communications*. 37 (4): 505-508.

Tamás, J., Nagy, A., Fehér, J. (2015a). Integration of RS and GIS tools and intervention levels into drought monitoring. Report of Integrated Drought Management Programme in Central Eastern Europe, activity 5.5. Policy oriented study on remote sensing agricultural drought monitoring methods. 16.

Tamás, J., Nagy, A., Fehér, J. (2015b). Agricultural biomass monitoring on watersheds based on remote sensed data. *Water Science and Technology*. 72(12): 2212-2220 DOI: 10.2166/wst.2015.423

Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 8: 127–150.

Várallyay, Gy., Szabó, J., Pásztor, L., Michéli, E. (1994). SOTER (Soil and Terrain Digital Database) 1:500 000 and its application in Hungary. *Agrokémia és Talajtan*. 43: 87–108.

Wiegand, C.L., Richardson, A.J. (1990). Use of spectral vegetation indexes to infer leaf-area, evapotranspiration and yield. *Results Agron. J.* 82: 630–636.

A SZERZŐK



NAGY ATTILA a Debreceni Egyetem Mezőgazdaságtudományi Karán egyetemi docens. 2005-ben szerzett környezetgazdálkodási agrármérnök diplomát, PhD fokozatot 2009-ben szerezte meg, majd 2016-ban habilitált. Tudományos pályája során korábban fitoremediációval foglalkozott. Jelenleg a távérzékelés és térinformatika vízgazdálkodási folyamatokban való alkalmazása, aszály okozta stresszhatások, mezőgazdasági vízgazdálkodás kritikus vízforgalmi tényezőinek értékelése területén végez kutatásokat. Elismerései: Debreceni Egyetem rektorának elismerő oklevele 2012-ben. Magyar Zoltán Posztdoktori ösztöndíj (2013-2014). A Magyar Hidrológiai Társaság tagja.

TAMÁS JÁNOS a Debreceni Egyetem, Víz- és Környezetgazdálkodási Intézetének igazgatója; agrármérnök, agro-kémiai, vízgazdálkodási és térinformatikai szakmérnök. 2007-ben megkapta Magyar Tudományos Akadémia Doktora címet. Elismerései: Az év publikációja díj, Környezetért díj, Sajó Elemér vízgazdálkodásért díj, Hatvani professzori kutatási díj, Magyar Köztársaság Lovagkeresztje. Publikációinak száma közel 500, tankönyvek száma: 16. Több szakkönyvet jegyzett a precíziós mezőgazdaság és a vízgazdálkodás területén. Szűkebb szakterülete a talaj és a környezet állapotának modellezése térinformatikai és távérzékelési eszközökkel. A Magyar Hidrológiai Társaság tagja, a Hidrológiai Közlöny szerkesztőbizottságának tagja.

SZABÓ ANDREA a Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Karán szerzett környezetgazdálkodási agrármérnök diplomát 2018-ban. Jelenleg a Debreceni Egyetem Táplálkozás- és Élelmiszertudományi Doktori Iskola PhD hallgatója. Kutatásában a vízhiány és az élelmiszerbiztonság vízgyűjtő szintű kapcsolatrendszerének, illetve a klímaadaptáció kapcsolat rendszerének spektrális vizsgálatát és értékelését végzi.

GÁLYA BERNADETT a Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Karán szerzett környezetgazdálkodási agrármérnök diplomát 2012-ben. PhD fokozatot 2018-ban szerezte meg. A Víz- és Környezetgazdálkodási Intézet adjunktusa. Kutatói és tudományos tevékenységei: az aszály és belvíz előrejelzés módszertani fejlesztése, és a különböző aszályjelenségek, belvízi mérési index adatok összehasonlítása, összefüggéseinek feltárása, a mezőgazdasági területi anomáliák okozati kapcsolatának meghatározása. 2017-től a Talajtani Társaság tagja, valamint 2018-tól a Debreceni Egyetem Száraz Területek Kutatóközpontjának titkári feladatait látja el.

FEHÉR JÁNOS a Budapesti Műszaki Egyetemen szerzett építőmérnöki diplomát, majd a Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Karán PhD fokozatot kapott mezőgazdasági vízgazdálkodási témában írt disszertációja alapján. 1976-tól 1996-ig a VITUKI Vízgazdálkodási Tudományos Kutatóintézet tudományos kutatója volt. 1996 augusztusától 2008 májusáig a VITUKI CONSULT Zrt. angol-magyar vállalatot vezette elnök-vezérigazgatóként. 2008 júniusától ismét a VITUKI tudományos kutatója, tudományos tanácsadói beosztásban, egészen a VITUKI 2012-ben történt végelszámolásáig. Az 1990-es évek közepétől számos európai projektben dolgozott, többek között az Európai Bizottság számára a Víz Keretirányelv és a vízgyűjtő-gazdálkodási tervek megvalósításának vizsgálatában, valamint az Európai Környezetvédelmi Ügynökség (EEA) részére az európai felszíni és felszín alatti vízkészletek értékelésében. Vízkészlet-gazdálkodás és az integrált vízgyűjtő-gazdálkodás tárgyköröket oktatja/oktatta a Debreceni Egyetemen, a Budapesti Corvinus Egyetemen, valamint a Szent István Egyetemen. 2017 óta a Debreceni Egyetem címzetes egyetemi tanára. 1994-től tagja volt a Nemzetközi Vízügyi Szövetségnek (IWA), ahol alelnöke (2002-2008), titkára (2008-2011), majd 2011-től 2014-ig elnöke volt az IWA Watershed and River Basin Management szakágazatának. 1977 óta tagja a Magyar Hidrológiai Társaságnak (MHT). Az MHT Közgyűlése 2016-ban beválasztotta az MHT elnökségébe, melyet a 2022-ig szóló második ciklusra is megerősítettek. 2016 óta főszerkesztője a Hidrológiai Közlönynek. Az MHT Pro Aqua díj, valamint a Vitális Sándor szakirodalmi nívódíj kitüntetettje.

Kötött talajok diszperzitása – a jelenség háttere, a mértékadó hézagtenyező alkalmazhatósága

Nagy Gábor*, Nagy László*

* BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék (E-mail: nagy.gabor@mail.bme.hu; lacinagydr@gmail.com)

Kivonat

A kötött talajok szerkezete sokszor *diszperz* rendszerként írható le. Ekkor a szemcsék nagysága és mennyisége, valamint eloszlása és a szemcsék közti erők és hatások határozzák meg a rendszer tulajdonságait és változásait. A szemcsék közti érintkezés során kohézió, kémiai kötések jönnek létre, melyek döntően befolyásolják a talaj mechanikai viselkedését.

Jelen cikkben a diszperzív talajok árvízvédelmi töltésekben való jelenlétével és a belőle származtatható problémákkal foglalkoztunk. Számos hazai és nemzetközi példa mutatja, hogy vízzel kapcsolatba kerülő szerkezetek, töltések, gátak olyan tönkremenetele következett be, mely egyértelműen a kötött talajok eróziójához kapcsolódik. A cikk foglalkozik a talajok diszperzitásának lehetséges magyarázatával, a talajszemcsék felépítésével és a diszperzív tulajdonság fizikai-kémiai okaival, valamint a diszperzív talajokkal kapcsolatos hazai és nemzetközi kutatási tapasztalatokkal, a korábbi vizsgálatok eredményeiből levont tapasztalatokkal, kiemelendő a mértékadó hézagtenyező korrelációját a tűszúrásvizsgálat eredményeivel.

Kulcsszavak

Diszperzív talajok, talajazonosítás, tűszúrásvizsgálat, kettősréteg elmélet.

The dispersive soils behaviour – the background of the phenomenon, application of the Galli-type void ratio

Abstract

The structure of cohesive soils can often be described as a *dispersive* system in which the size and amount and distribution of particles and forces between soil grains determine properties and changes of the system. In contact between the soil forming grains some relationship (as cohesive and chemical bonds) will be formed. These ones can determine the load supporting capacity of soils.

This paper is dealing with the presence of dispersive soils in flood protection structures and the problems that could derive from it. Numerous domestic and international examples show as some water-related structures, fillings, and dams have been damaged. These emergencies (havarria damages) were clearly related to erosion of cohesive soils. The paper deals with problems arising from the presence of dispersive clays in two parts: a possible explanation of the dispersion of soils, the construction of soil grains and the physico-chemical causes of the dispersive property, and domestic and international research experiences on dispersive clays, with experience from previous researches, emphasising the correlation between the results of the Galli-type void ratio and the pinhole test.

Keywords

Dispersive clays, identification, pinhole test, double layer theory.

BEVEZETÉS

A talajok alapvetően geológiai (fizikai, kémiai és biológiai) folyamatok következtében alakulnak ki. A talaj az öt felépítő három különböző halmazállapotú anyag; a szilárd szemcseváz, a szemcsék közti pórusokat kitöltő folyadék- és gáznemű fázis összessége.

A kötött talajok szerkezete sokszor egy diszperz rendszerként írható le, mely esetén a szemcsék nagysága és mennyisége, valamint eloszlása, és az egyes szemcsék közti erők és hatások határozzák meg a rendszer tulajdonságait és változásait. A szemcsék közti érintkezés során kapcsolatok alakulnak ki (kohézió, kémiai kötések), melyek eredményezhetik a talajok teherbíró képességét. Abban az esetben, amikor a szemcsék közti kapcsolatok rendszere nem tud megfelelően kialakulni (legyen ennek oka az, hogy külső hatás következtében a talajszemcsék közti összetartó erők legyengülnek, vagy megszűnnek), károsodások, tönkremeneteli mechanizmusok alakulhatnak ki. Ennek a kapcsolatrendszernek a károsodására egy példa a diszperzív talajok tönkremenetele.

Nevéből adódóan ekkor a talaj tönkremenetelek egy olyan diszperz közegre hasonlít, ahol is a talajszemcsék

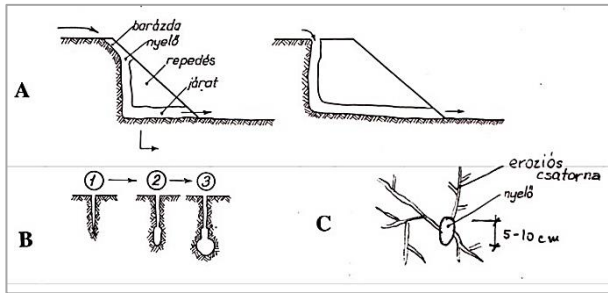
mintegy diszpergált fázis vannak jelen, eloszlata a köztük található pórusfolyadékban.

A DISZPERZÍV TALAJOK FOGALMA

Diszperzív talajok alatt azon kötött talajokat értjük, melyek fizikai-kémiai tulajdonságaik miatt a talajszemcsék közti kötőerő lecsökken, így kis energiával megbontható a szemcsék szerkezete (*Szepessy 1983*) és a talaj erodálható. Ennek következménye lehet, hogy bár áteresztőképességei együtt-hatójuk miatt vízzáróan viselkednének, a víz erodáló hatása miatt mégsem alkalmasak vízzárási feladatok megoldására.

Amikor a pusztulást a talaj belső (járatos) eróziója okozta, ezt az alagúthoz hasonló rendszer kialakulását elnevezték "tunnel erosion"-nek. Száraz időben a gát rézsúján keletkezett repedésekbe csapadék idején vagy a gát első feltöltésekor víz folyt be (*I. ábra*). A víz a repedés alján járatot mosott ki magának, amelyek gyorsan mélyültek, illetve bővültek is (*Felkai és Nagy 2012*).

Ha a járat vízzel kapcsolatba került, akár egy óránál rövidebb idő alatt átszakadt a gát. A kezdeti repedést néhol egyenlőtlen üledés is okozhatta. Az ilyen járatos erózió ellen nem véd a humusztakarás, hiszen a repedés alján, a kezdődő járat falán a víz a talajjal érintkezik (*Sherard és társai 1972*).



1. ábra. Diszperzív talaj jellegzetes eróziós járatai (Szepessy 1983)

Figure 1. Common erosion tunnels in dispersive clays (Szepessy 1983)

A diszperzív talajok tönkremenetelét Szepessy a peptizált szerkezetre vonatkozó vizsgálta, miszerint a peptizált talajra a tömött szerkezet a jellemző. Ezzel a megfontolással kimondható (Szepessy 1983), hogy a gátak járatos eróziója szempontjából a peptizált talaj veszélyes, mert:

- szemcséi között a kötőerő kicsi, ez a felületről az egyedi szemcsék leválását könnyíti meg, és
- mert morzsás szerkezet hiányában a peptizált talaj repedéseinek fala nem duzzad elég gyorsan.

Töltésépítés során ezen szempont figyelembevétel miatt található a diszperzív talajok a „csak kiegészítő műszaki beavatkozással beépíthető” kategóriában, melyet az ME-10-268/1 és ME-10-268/2, illetve MSZ EN 1997-2-2008 szerinti diszperzitás mértékére vonatkozó mérés kell igazolni.

A DISZPERZÍV VISELKEDÉS HÁTTERE

A diszperzív viselkedés hátterének megismeréséhez a szemcsék fizikai-kémiai tulajdonságainak ismerete vezet. A kötött talajok esetenként jó közelítéssel kolloid diszperz rendszerként jellemezhetők. A diszperzió jelentése kémiai értelemben az, amikor a legalább kétfázisú rendszer egyik komponense apró szemcsékre van szétoszlatva (diszpergálva) a másik komponensben.

A kötött talajokra igaz, hogy alakjukból adódóan a szemcsék felülete tömegükhöz képest nagy, 10 m²/g nagyságrendű, ezért a talaj belső erójátékában döntő szerepe van a felületi erőknek (Szepessy 1981). Ezt a kolloidsajátosságú részecskék lemezes felépítése, esetenként jelentős felülete indokolja. A talajkolloidok alapvetően három csoportra oszthatók (Filep 1988):

- ásványi-,
- szerves-,
- szerves-ásványi komplex kolloidok.

Az ásványi kolloidok a diszperzív talajok tekintetében jelentős szereppel bírnak, ide tartoznak az agyagásványok. A kötött talajok jellemző alkotóelemei az agyagásványok, a talajok 2 μm = 0,002 mm-nél kisebb átmérőjű szemcséi, amelyek alakját alapvetően az ásványok lemezes szerkezete adja meg.

Szerkezeti felépítésüket tekintve az agyagásványok két építőelem kombinációjából állnak (2. ábra). A tetraéder (T), jellemzően (SiO₄)⁴⁻ tetraéder és a belőle felépülő tetraéder réteg(ek), valamint az oktaéder (O), jellemzően alumínium, magnézium vas (Fe²⁺), és vas (Fe³⁺) kationokkal,

és a belőlük felépülő oktaéder réteg(ek). Ezen két építőköből álló rétegek száma, és a köztük lévő rétegek közötti térben található komponensek függvényében számos agyagásvány fordul elő a természetben (Nemecz 1973), két nagy szerkezeti csoport szerint:

- 1:1 szerkezet, vagy TO rendszer, amely kifelé semleges, az oktaédes és tetraédes síkok OH-gyökökkel kapcsolódnak, a kötési erős hidrogénkötések;
- 2:1 szerkezet, vagy TOT rendszer, gyengébb van der Waals kötésekkel, valamint térfogatváltozó hajlammal rendelkezik (Mitchell, 1974).

Agyagásványok szerkezetének felépítése	
○ Oxigén és hidroxidok	● Különböző kationok
Töltés és geometria alapján összekapcsolva	
Ismétlődésük réteget hoz létre	
Tetraéder	Oktaéder
Ionos és kovalens kötések által összekapcsolva	
1:1 rendszer	2:1 rendszer
Jellemző csoportok	
Kaolinit, halloisit	Szmektit, vermikulit, illit, klorit

2. ábra. Agyagásványok felépítésének sematikus rendszere (Mitchell 1974 alapján)

Figure 2. Schematic structure of clay minerals (after Mitchell 1974)

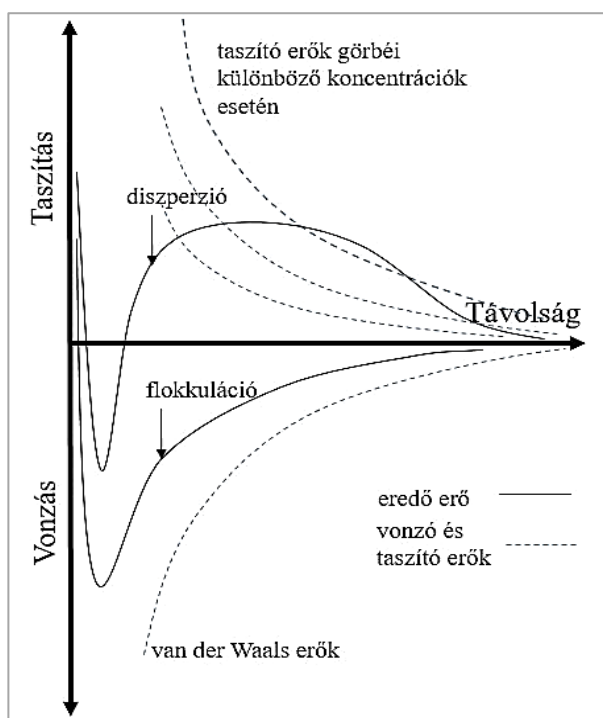
A 2:1 réteggkomplexum töltései kifelé nem feltétlenül kiegyenlítették, ezért további csoportokra bontható (Szabó 1999). Az úgynevezett „közberétegzett tag” alkotója szerint lehet a szerkezet:

- TOTaC, amikor is a 2:1 réteggkomplexumban kifelé negatív töltésfelesleg van, a közbe rétegzett tagban víz (Ai) és cserélhető kationok (C) helyezkednek el, a szemcse felszínén így adszorpciós képessége van, ioncserére képes,
- amennyiben a réteggkomplexumban a közberétegzett tag inaktív kation (I), a szerkezet TOTi;
- illetve TOTO, amikor a közbe rétegzett tag egy oktaédes réteg.

A diszperzív talajok szempontjából jelentős a TOTaC szerkezet, amikor is a köztes rétegben cserélhető kation és víz is jelen van, ilyen agyagásványok a szmektitek, vagy például a vermikulit. Szmektitek, mint a montmorillonit esetén a TOT rétegek közé kationok, nátrium és kalcium ágyazódik, melyek szerepe a viselkedésben meghatározó.

Ezen a ponton érdemes megemlíteni a diszperzív talajokkal kapcsolatos vizsgálatok egyik fontos elemét, a kolloidok határterületén lejátszódó jelenségeket. Mitchell (1974) szerint, a szemcsék közötti vonzó és taszító erők eredője az, amely a szemcsék közötti kapcsolatokat meghatározza, ez az eredő kis távolságon jelentős nagyságú lehet, míg a távolsággal folyamatosan csökken (3.

ábra). A leírt kapcsolat a diffúz kettős réteg tulajdonságaival magyarázható.



3. ábra. Vonzó és taszító erők kapcsolata (Kézdi 1972 és Mitchell 1974 alapján)

Figure 3. Attractive and repulsive forces (after Kézdi 1972 and Mitchell 1974)

Minden ásványi fázis jellemzője, hogy a felületükön lévő szabad vegyértékek folytán ionok, illetve gyökök és molekulák megkötésére képesek, és ez a képesség exponenciálisan növekszik a szemcseméret csökkenésével, azaz a fajlagos felület növekedésével. Az adszorpciót létrehozó erő nagysága, jellege és a megkötődés folyamata alapján kis és közepes hatótávolságon belül fizikai adszorpciónak, Coulomb-erők hatására ioncserének, ha pedig a két fázis között kémiai reakció jön létre, kemisorpciónak nevezik (Filep 1988). Talajok esetén ezek a folyamatok általában a szemcsék felszínén megkötött szolvátrétegben játszódhatnak le. A talajásvány, a felületén megkötött szolvátréteggel és a benne található ionokkal alkotja a micellát. A talaj szolvátrétegének kationösszetételét a talajoldat koncentráció és a kémiai összetétel határozza meg, ezek változása hatására jöhet létre kation csere.

Talajokban a legfontosabb kicserélhető kationok a Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Al^{3+} , H^+ , melyek közül az első négyet lúgos kémhatásuk miatt kicserélhető bázisnak is nevezik. Amennyiben a felület és az ion között specifikus kölcsönhatás nincs, annak a rendjét, hogy a felületen milyen ionok adszorbeálódnak, vagy milyen ionok cserélődnek ki, a liotrop sor határozza meg. Általánosan érvényes továbbá, hogy a nagyobb vegyértékű ionok, valamint azonos vegyértékű ionok közül a kevésbé hidratáltak kötődnek erősebben (Filep 1988).

A kolloidok felületén az adszorpció folyamatok következtében a talajkolloid és a folyadékfázis között határreteg jön létre, melyben az ionkoncentráció eltér mindkét

fázis belsejében tapasztalhatóktól (Filep 1988). Ez a határreteg tulajdonságaiban eltért mind a szemcse, mind a folyadék fázis tulajdonságaitól, és az itt lejátszódó folyamatok (ioncsere, adszorpció) azok, amelyek az anyagok tulajdonságait döntően befolyásolják (Szabó 1999).

Az elektroneutralitás alapján a talajásvány negatív töltését a határretegben lévő pozitív kationoknak kell ellensúlyozniuk. A határreteg leírását és az ottani töltésviszonyokat számos elmélet (Helmholtz, Gouy-Chapman, Stern) írja le. Közös jellemzőjük, hogy a kettősréteget egy, a felülettől távolodva csökkenő potenciálú közegnek írják le. A potenciál-eloszlás a diffúz rétegben Szabó (1999) alapján a (1) egyenlettel írható le:

$$\Psi_x = \Psi_0 \cdot \exp(-\kappa \cdot x), \quad (1)$$

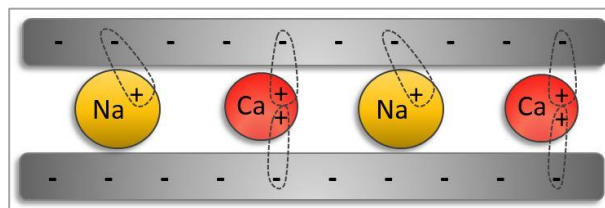
azaz, a potenciál a felület mentén (Ψ_0) a távolsággal (x) exponenciálisan csökken, a csökkenés mértéke pedig Mitchell (1974) alapján a (2) összefüggés szerint írható le:

$$\kappa = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot \eta_0 \cdot e^2 \cdot v^2}{D \cdot k \cdot T}}, \quad (2)$$

ahol is:

- η_0 az ion koncentráció (1 cm^3 térfogatra jutó ionmennyiség);
- e az elemi töltés ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb);
- v az ionérték (vagy vegyérték);
- D a dielektromos állandó (vagy permittivitás);
- k a Boltzmann állandó ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K);
- T a hőmérséklet.

Carey (2014) a diszperzív talajok kutatásakor kitér a kettős rétegben elhelyezkedő ionok szerepére. Túllép azon, hogy az ionos összetétel széles skálája határozza meg a talaj viselkedését, és a diszperzív tulajdonságot a szemcsék között található nátrium és kalcium ionok arányához kapcsolja. Ez alapján, amennyiben a kalciumion jelenléte a domináns, a diszperzió nem jön létre, ugyanis a két vegyértékű, viszonylag kisméretű (ionsugarú) kalcium ionok a szomszédos szemcsék negatív töltéseihez kötődhetnek, ezáltal stabil talajszerkezetet eredményezve (4. ábra).



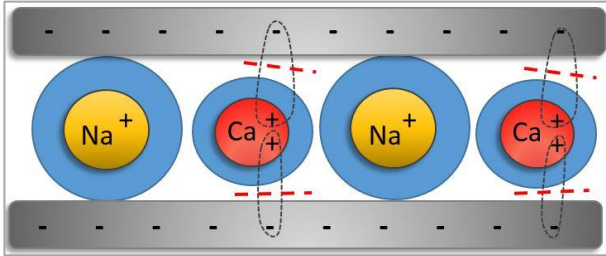
4. ábra. Különböző ionok kötődése az agyagszemcsékhez (Carey 2014 alapján)

Figure 4. Connection of different ions to clay platelets (after Carey 2014)

Abban az esetben, ha vegyesen található meg a talajoldatban nátrium- és kalciumion, míg a két vegyértékű kalcium mindkét szomszédos felülethez tud kötődni (5. ábra), az egy vegyértékű nátrium csak az egyikhez.

Amennyiben a minta víztartalma megnő, a nátrium sokkal nagyobb vízburkot képes megkötni maga körül, mint azt a kalcium teszi, ennek következtében az agyagré-

szecskék távolabb tolódnak egymástól, mint azt a csak kalciumot tartalmazó esetben tették. A szemcsék ilyen módon való eltolódása akkora mértékű, hogy a kalciumion kötéseit, melyet mindkét szomszédos szemcséhez kapcsolta, már fel tudja szakítani. Ez a folyamat vezet Carey (2014) alapján az aggregált talajszerkezet felbomlásához, és a talajok diszperziójához.



5. ábra. Kötések felszakadása a nátriumion hidratációja során (Carey 2014 alapján)

Figure 5. Breaking of bonds during hydration of sodium ion (after Carey 2014)

A pórusvízben lévő oldott sók mennyiségéből lehet következtetni az adszorbeált sók arányára, ezáltal a pórusvíz összetételének módosításával lehet befolyásolni a talaj viselkedését is. Carey (2014) ezen túl megemlíti a magnézium szerepét is a diszperzív talajok viselkedésében, melyek bár két vegyértékűek, mint a kalcium, azonban nagyobb ionsugárral rendelkeznek, így jobban eltávolítják egymástól a szemcséket, mint a kalcium vagy nátrium ionok. A pórusvízben lévő oldott sók mennyiségéből lehet következtetni az adszorbeált sók arányára, ezáltal a pórusvíz összetételének módosításával lehet befolyásolni a talaj viselkedését is. Carey (2014) ezen túl megemlíti a magnézium szerepét is a diszperzív talajok viselkedésében, melyek bár két vegyértékűek, mint a kalcium, azonban nagyobb ionsugárral rendelkeznek, így jobban eltávolítják egymástól a szemcséket, mint a kalcium vagy nátrium ionok.

Sherard és társai (1972) laboratóriumi vizsgálati módszere a talajok diszperzitásának mértékét az összes kation és a nátriumion arányát vizsgálva kategorizálja. A kationok mellett azonban fontos ismerni a kötődő anionokat is, hiszen ugyanazon kationhoz kötődő különböző anionok jelentős eltérést okozhatnak az anyag viselkedésében. Az anionok jelentősen befolyásolhatják a felületek töltését, a NaCO_3 oldat például általában peptizálja a talajt, míg a NaCl nem (Szepessy 1981).

DISZPERZÍV TALAJOK KIALAKULÁSA, DISZPERZÍV TALAJOK MAGYARORSZÁGON

Sherard és Decker a '70-es években foglalkozott behatóan a diszperzitás kérdéskörével, a diszperzív talajokat keletkezésük szerint az alluviális üledékek közé sorolják, folyami üledékes talajként meghatározva. Tudvalevő, hogy a diszperzív talajok alapkőzete, a metamorf vagy üledékes kőzetek nem diszperzívek az aprózódás előtt. A klimatikus hatások, a talajokat érő víz összetétele, a lefolyási viszonyok és a területhasználat együttesének tulajdonították a diszperzív viselkedés kialakulását. McCook (2005) az általa vizsgált töltések és gátak vizsgálati alapján a diszperzív talajok eredetét tengeri, palás és lösz formáci-

ókhoz kapcsolja. A geológiai eredet változatosságát mutatja, hogy olyan szélsőséges példák is előfordulnak, mint Zimbabwe, ahol gránitos-homokkőves környezetben is tapasztaltak diszperzív talajok okozta károsodásokat.

Szepessy (1983) a diszperzív talajokat ausztrál kutatók (a kötött talajok eróziós hajlama és a pórusvízben oldott anyagok), valamint Sherard és társai (1976) kémiai vizsgálati alapon történő diszperzitás vizsgálati eredményein alapulva azon üledékes talajokra nézve állapítja meg, melyek mészből (kalciumban) szegények. Ezen elmélet alapján kizárja a dunai üledékeket, melyek Vendl (1951) alapján mészből gazdagok, és a vizsgálatát a Tisza-völgyi területekre terjeszti ki, ahol is a mészből szegény talajok jellemzőek. Kiemeli a Sebes-Körös, a Berettyó, a Hortobágy-Berettyó menti szakaszokat, valamint a Tisza egyes szakaszait. Érdemes megjegyezni, hogy ezen elmélet alapján Szepessy (1983) diszperzitás szempontjából veszélyesnek tartja a szikes talajokat is.

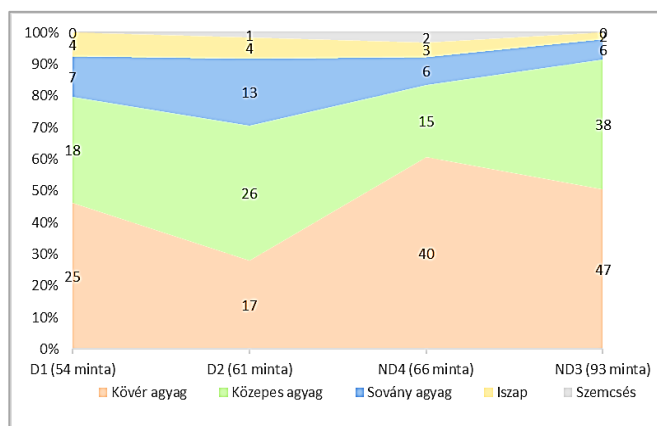
Mindezen megfontolások alapján kijelenthető, hogy a diszperzív talajok kedvezőtlen tulajdonságai leírásakor nem feltétlenül a geológiai eredet a meghatározó, hanem azon geológiai és környezeti folyamatok, melyek a talajok kialakulása során hatottak rá, és a talajszemcsék tulajdonságait, összetételét megváltoztatták. A rendelkezésre álló adatok, valamint Szepessy (1981) kutatásai alapján vizsgálatunk során a Tisza-völgyi vízfolyások menti vízépitési földművek anyagait, valamint a területen található töltésanyag nyerohelyek talajait tanulmányoztuk. A vizsgált terület felöleli a Nagyunság egészét, a Jászság keleti részét, a Hortobágy szinte teljes területét és a Tiszántúl jelentős részét. Ennek keretén belül az 6. ábrán látható területekről gyűjtöttünk mintákat és rajtuk laboratóriumi vizsgálatokat végeztünk el, hogy a diszperzitásuk mértéke, és eróziós hajlama megállapítható legyen.



6. ábra. Diszperzív talajok Magyarországon
Figure 6. Location of dispersive soils in Hungary

DISZPERZÍV TALAJOK LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA

Tekintettel arra, hogy a diszperzitás mértéke egy kötött talajjellemző, így vizsgálható a talajok diszperzitásának foka a plaszticitási indexükkel kapcsolatban. Összesítve a hazai archív, és saját vizsgálatunk során kapott eredményeket összesen 296 (összesen 299 mintából kivéve 3 db szemcsés talaj eredményeit) diszperzitás szempontjából vizsgált talajminta diszperzitási fok- plaszticitási index összefüggéseit vizsgáltuk. Az eredményeket a 7. ábra és az 1. táblázat foglalja össze.



7. ábra. A 296 talajminta plaszticitási index eloszlása a diszperzitási fokok alapján
Figure 7. Distribution of the plasticity index of the 296 soil samples based on the degree of dispersion

1. táblázat. A vizsgált talajok plaszticitási indexe és diszperzitási foka
Table 1. Plasticity index and degree of dispersion of the samples examined

Diszperzitási fok	$I_p > 30\%$ (Kövéragyag)	$30\% > I_p > 20\%$ (Közepes agyag)	$20\% > I_p > 15\%$ (Sovány agyag)	$15\% > I_p > 10\%$ (Iszap)
D1	25	18	7	4
D2	17	26	13	4
ND4	40	15	6	3
ND3	47	38	6	2
ND2	0	3	3	0
ND1	4	3	11	1
Összesen	133	103	46	14

Az archív adatok és saját méréseink alapján kijelenthető az alábbiak:

- A diszperzív és átmeneti kategóriájú, tehát járatos erózió szempontjából veszélyes talajok a vizsgálatok során legalább 91,8%-ban bizonyultak agyagnak.
- A diszperzív és átmeneti kategóriájú talajok 93,7%-ban voltak agyagok, ezen belül pedig átlagosan 81,2%-ban legalább 20%-os plaszticitási indexszel rendelkezők, mely alapján megállapítottuk, hogy a hazai talajviszonyok között a közepes és kövéragyagok hajlamosabbak diszperzív viselkedésre, míg a sovány agyagok már kevésbé, diszperzitás szempontjából a viselkedésük már közelebb áll az iszapokéhoz.
- A D2-es diszperzitási kategória esetén a vizsgált 13 sovány agyagnak köszönhető, hogy nem magasabb arányban szerepelnek a közepes és kövéragyagok a diszperzív talajok között, azonban ez sok esetben 18-19%-os plaszticitási indexű talajokat jelentett, mely az Atterberg határok meghatározásának pontatlanságánál kisebb értékkel tér csak el a közepes agyagként való kategorizálástól.

Megállapítható, hogy magyarországi viszonyok között is igaz az állítás, amit *Sherard és társai (1972)* is kijelentett, hogy a diszperzív viselkedés nem kapcsolható egyértelműen a talajok „szokványos” geotechnikai azonosító vizsgálataihoz. Ennek eredménye, hogy a plaszticitási index önmagában nem különbözteti meg a diszperzív és nem diszperzív talajokat. Az egyes talajtípusok esetén, azonban jellemzőbb a diszperzív viselkedés lehetősége, tehát a geotechnikai azonosítás mintegy „szűrő” feltételként alkalmazható.

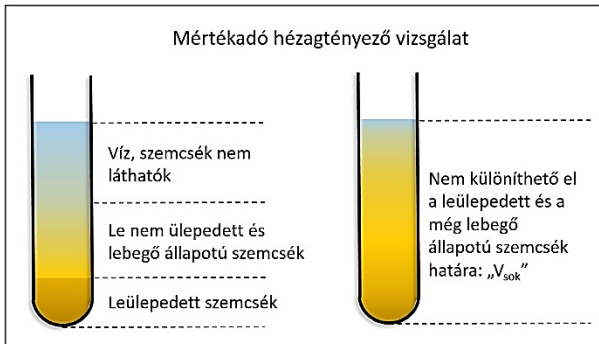
A diszperzív viselkedés kimutatására laboratóriumi vizsgálati módszereket dolgoztak ki, hogy a kedvezőtlen tulajdonságú kötött talajok megkülönböztethetők legyenek az erózióálló kötött talajoktól. A következőkben bemutatjuk a diszperzív talajok laboratóriumi és helyszíni azonosítására és minősítésére szolgáló vizsgálatokat. Kiemelt hangsúlyt fektetve azokra a módszerekre, melyeket a vizsgálataink során is alkalmaztunk. Az MSZ EN 1997-2-2008 a diszperzitási fok meghatározását is tartalmazza, melyre négy lehetőség van:

- túsűrűsvizsgálat, mely a repedés mentén mozgó víz hatását modellezi;
- kétszeres ülepítési vizsgálat, amellyel a tiszta vízben, mechanikus keverés nélkül, illetve diszpergálószerrel, mechanikai keverés után ülepített agyag-szemcsék diszperzióját hasonlítják össze;
- rögvizsgálat, amely azt mutatja meg, hogy miként viselkednek a talajrögök híg nátrium-hidroxid-oldatba helyezve;
- a pórusvízben lévő oldható sók meghatározása, mellyel korrelációba hozható a nátrium és a telített oldatban lévő összes só százalékos mennyisége.

Magyarországi gyakorlatban legjobban elterjedt a túsűrűsvizsgálat alkalmazása, mellyel így hidraulikai szempontból közelítik meg a diszperzív talajok viselkedését (*Országos Vízügyi Hivatal 1987*). A vizsgálati berendezés vázlatos rajza a 8. ábrán látható. A teljes berendezés a laboratórium falán vagy a fala mellett felállított függőleges alaplapra szerelhető.

A vizsgálat során egy kisméretű rézhengerbe töltött plasztikus határa körül beállított víztartalommal rendelkező talajmintát két réz befoglaló fej közé fognak, majd ezen a hengeres talajmintán egy acéltűt átszűrnak, ezáltal

alakítva ki rajta egy mesterséges járatot. Ezt követően különböző nyomásmagasságok mellett vizet áramoltatnak a mintán át, és a kifolyó víz mennyiségét mérik, illetve a víz áttetszőségét figyelik meg.



8. ábra. Tűszűrővizsgálat berendezése
Figure 8. Pinhole test device

Minél inkább diszperzív egy talaj, azaz minél hajlamosabb arra, hogy járatos erózióval károsodjon, annál kisebb nyomásmagasságok mellett több és több szemcse kimosódása tapasztalható, valamint a kimosódással egy időben a mesterségesen megnyitott járat bővülése és a megnövekedett vízáramlás is tapasztalható.

A vizsgálat végeztével a hengeres talajmintát kiszárítva, majd a henger alkotója mentén eltörve a kialakított mesterséges furat bővülése látható. Erózióknak ellenálló kötött talajok esetén a járat jelentős bővülése nem tapasztalható, míg egy diszperzívnek besorolt minta esetén a kialakított 1 mm-es furat jelentős mértékű bővülése alakulhat ki. A vizsgálat eredménye az úgynevezett diszperzitási fok, mely segítségével egy talajminta járatos belső erózióval való tönkremeneteli hajlama értékelhető. Az egyes fokozatok minősítése a következő:

- D1 és D2: diszperzív talaj, gyors erózió 0,3 m/s sebességnél,
- ND3 és ND4: átmeneti talaj, lassú erózió 0,3-0,6 m/s sebességnél,
- ND2 és ND1: nem diszperzív talaj, kolloidális erózió, 2-3 m/s sebességnél nincs.

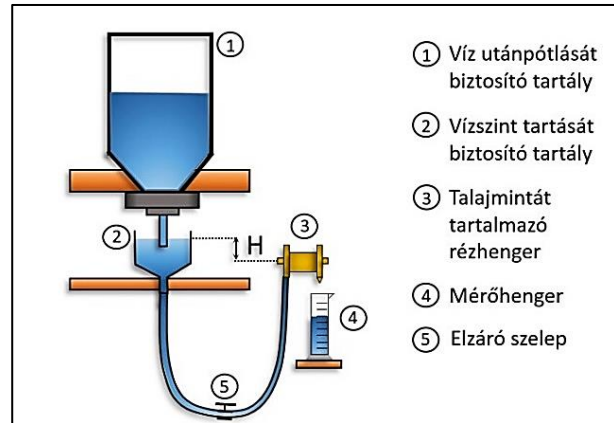
KAPCSOLAT A MÉRTÉKADÓ HÉZAGTÉNYEZŐVEL

Tekintettel arra, hogy bár laboratóriumi körülmények között, nagyszámú minta esetén kimutatható korreláció a talajok diszperzitási foka és plaszticitásuk között, mégis számos esetben segítené a mérnöki feladatok megoldását, ha lenne a diszperzitás mértékére vonatkozó egyszerű mérési módszer, mely segítene eldönteni, hogy az adott talajt szükséges-e diszperzitás szempontjából is vizsgálni.

A fentiek alapján vizsgáltuk a mértékadó hézagtényező összefüggését a talajok diszperzitásával. A mértékadó hézagtényező vizsgálata egy viszonylag egyszerű mérési módszer, a vizsgálat maga 48 órán át tartó ülepedési kísérlet, mely során az ülepedési idő letelte utáni minta térfogat, és annak zavarossága alapján történik a kategóriába sorolás.

Amennyiben a mérés végén nem különíthető el egyértelműen a leülepedett anyag, és a felette lévő, viszonylag

kevés szemcsét tartalmazó víz, hanem egy szuszpenziószerű állapot alakul ki, a mérés nem értelmezhető. Ekkor vélhetően a szemcsék mérete és töltésviszonyai következtében az ülepedés nem is várható el. Galli (*Országos Vízügyi Hivatal 1987*) javaslata alapján a mérés eredménye „V_sok”, vagyis nem értelmezhető térfogat, ekkor a vízre való érzékenység szempontjából a legrosszabb kategóriába („szétfolyó”) sorolja a talajt. A két különböző mérési kimenetelt a 9. ábra mutatja be.



9. ábra. A mértékadó hézagtényező vizsgálat kimenetelei
Figure 9. Outcomes of the Galli-type void ratio test

Vizsgálataink során a minták térfogatának meghatározását ismert keresztmetszeti területű edényben végeztük, a térfogat megállapításához az ülepedett térfogat magasságát milliméteres pontossággal leolvasva. A leolvasási pontosság alapján a mérések során a mértékadó hézagtényező meghatározását 0,1-nél kisebb hiba terhelte, így egy-egy mérési eredmény is megbízhatónak tekinthető. A besorolás Galli (*Országos Vízügyi Hivatal, 1987*) alapján a 2. táblázat szerint történik.

2. táblázat. Mértékadó hézagtényező Galli szerint
(Országos Vízügyi Hivatal 1987)
Table 2. Galli-type void ratio evaluation
(Országos Vízügyi Hivatal 1987)

Talajminta értékelése	Mértékadó hézagtényező (e_k)
Rögösödő	$0,0 < e_k < 2,0$
Vízálló	$2,0 < e_k < 3,5$
Fellazuló	$3,5 < e_k < 6,0$
Szétfolyó	$6,0 < e_k$ vagy V nem meghatározható

A diszperzitási fok és a mértékadó hézagtényező kapcsolatának vizsgálatához összesen 125 talajminta Galliféle mértékadó hézagtényező meghatározását hajtottuk végre. Tűszűrővizsgálattal minden egyes minta diszperzitási fokát is meghatároztuk, hogy a korreláció vizsgálható legyen a két módszer eredményei között. Mindez azon az elven alapult, hogy míg a tűszűrővizsgálat végrehajtása jelentős előkészítést igényel, addig a mértékadó hézagtényező meghatározása viszonylag egyszerűen végrehajtható, így az „szűrő feltétel” lehet a diszperzitási fok meghatározásához.

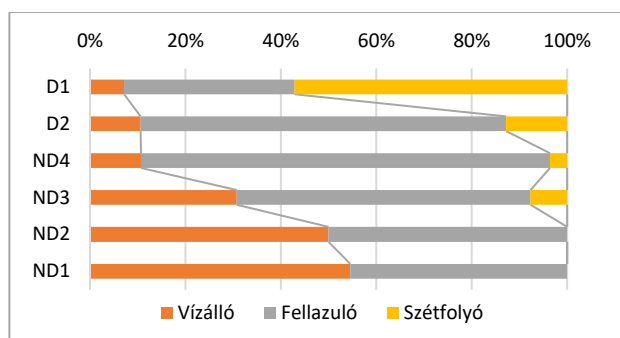
A mérési eredményeket a 3. táblázat mutatja be. Szétfolyó minősítést csak diszperzív, vagy átmeneti kategóriába tartozó minta kapott. A 10. ábra mutatja a diszperzitási fok és a mértékadó hézagtényező kapcsolatát.

3. táblázat. Mértékadó hézagtenyező vizsgálatok eredményei

Table 3 Results of the Galli-type void ratio tests

Diszp. fok	Rögösödő, $0,0 < e_k < 2,0$	Vízálló, $2,0 < e_k < 3,5$	Fellazuló, $2,0 < e_k < 3,5$	Szétfolyó, $6,0 < e_k$, vagy V_{sok} (nem meghatározható)	Összesen [db]
D1	0	1	5	8	14
D2	0	5	36	6	47
ND4	0	3	24	1	28
ND3	0	4	8	1	13
ND2	0	6	6	0	12
ND1	0	6	5	0	11
				Mindösszesen	125

A 10. ábrán letről felfelé csökken a „vízálló” kategória aránya, míg a „szétfolyó” és „fellazuló” besorolású minták aránya növekszik. Százalékos eloszlást tekintve, a diszperzív (D1,D2) minősítésű talajok mértékadó hézagtenyezője a minták több, mint 90%-a esetén elérte a „fellazuló” besorolást, azaz $e_k \geq 3,50$. Ez az arány az átmeneti kategória esetén is igaz a minták 83%-a esetében. A diszperzív, és átmeneti kategóriák esetében, a mérési eredmények alapján a minták több, mint 87%-a „fellazuló”, vagy „szétfolyó” besorolású.



10. ábra. Mértékadó hézagtenyező és diszperzitási fok kapcsolata

Figure 10. Correlation between the Galli-type void ratio and the dispersive category of the samples

Mindez jó korrelációra utal a mértékadó hézagtenyező és a túsűrűsvizsgálat alapján történő diszperzitási fok meghatározás között. A fentiek alapján a „vízálló” minősítés diszperzív talajok esetén mindössze 9%-ban, átmeneti talajokat vizsgálva pedig 17%-ban adódott. A nem diszperzív kategóriájú talajok mintái már 52%-ban bizonyultak vízállóknak.

ÖSSZEFOGLALÁS

A diszperzív talajok járatos belső erózióra hajlamos kötött talajok. Árvízvédelmi gátba való beépítés előtt a talaj laboratóriumi minősítését el kell végezni, hogy a diszperzív viselkedésből következő tönkremenetel elkerülhető legyen. Már megépült töltésben diszperzív talaj kimutatása esetén a talaj kezelése, vagy kiegészítő mérnöki szerkezet beépítése szükséges az állékonyság biztosítása szempontjából.

A vizsgálati eredmények azt mutatták, hogy a „diszperzív” (D1, D2) és „átmeneti” (ND4, ND3) kategóriába tartozó, vagyis járatos erózióra hajlamos talajok átlagosan mintegy 94%-ban agyagnak, 81%-ban közepes és kövér agyagnak minősültek. Tehát megállapítható, hogy a vizsgált magyarországi talajok esetén a diszperzív viselkedés a közepes és kövér agyagok jellemzője lehet.

Fontos kiemelni, hogy töltéscsökkentés előtt az anyaggyerőhelyek talajainak, vagy már meglévő töltés vizsgálatok elengedhetetlen a kötött talajok diszperzitás szempontjából történő értékelése, hogy a későbbi károsodások, a szemcsekimosódás útján kialakuló tönkremeneteli mechanizmus megelőzhető legyen.

A vizsgálati eredményeink alapján azon természetes állapotú talajminták, amelyek legalább „fellazuló” vagy „szétfolyó” mértékadó hézagtenyező kategóriába sorolhatók a Galli-féle mértékadó hézagtenyező vizsgálata esetén, azaz esetükben $e_k \geq 3,5$, a diszperzív viselkedés lehetsége nem zárható ki. Ezen mintáknál szükséges a túsűrűsvizsgálat elvégzése a diszperzitási fok meghatározása céljából.

A Galli-féle mértékadó hézagtenyező és a túsűrűsvizsgálat alapján történő diszperzitási fok meghatározás jó korrelációt mutat. A mérési eredményeink alapján a diszperzív (D1, D2) minősítésű talajok több, mint 94 %-ban bizonyultak „fellazuló” vagy „szétfolyó” kategóriájúnak. Ilyen egyezés alapján javasolt, hogy amennyiben nagyszámú minta diszperzitás szempontjából történő vizsgálata szükséges, a vizsgálatok számának racionalizálásához, mintegy „szűrő” feltételként az amúgy is szükséges plasztikus index meghatározása mellett Galli-féle mértékadó hézagtenyező meghatározás is kerüljön alkalmazásra. Amennyiben ez a gazdaságos vizsgálat is igazolja diszperzitásra való hajlamot, csak akkor készüljön költséges túsűrűsvizsgálat.

IRODALOMJEGYZÉK

- Carey, B. (2014). Understanding dispersive soils. <http://landcare.org.au/resourceslinks/achieving-soil-conservation-in-queensland/>
- Felkai B. O., Nagy L. (2012). Gátszakadás egy tiszai vas-kapu helyén. Hidrológiai Közöny, 92. évf. 4. szám. 60-62.
- Filep Gy. (1988). Talajkémia, Akadémiai Kiadó, Budapest, ISBN: 963 05 4673 6.
- Kézdí Á. (1972). Talajmechanika I., Tankönyvkiadó, Budapest, ISBN: 963-17-0807-1.
- McCook, D. (2005). Dispersive clays – Experience and History of the NRCS (Formerly SCS): <http://www.dtic.mil/ndia/2005triservice/track5/mccook.pdf>
- Mitchell, J. K. (1974). Fundamentals of soil behavior, Wiley Publications, New York, ISBN: 978 0 471 46302 3.
- Nemecz E. (1973). Agyagásványok, Akadémiai Kiadó, Budapest.

Országos Vízügyi Hivatal (1987). *Árvízvédelmi gátak építése és fenntartása*. Budapest. ISBN 963-602-377-8.

Sherard, J. L., Decker, R. S., Ryker, N. L. (1972). Piping in earth dams of dispersive clays, in *Proc. ASCE Speciality Conference on the Performance of Earth Structures*, pp. 589-626.

Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S. (1976). Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils, in: *ASCE, Geotechnical Engineering Division*, pp. 69-85.

Szabó I. (1999). *Hulladékéltelhelyezés*, Miskolci Egyetem, ISBN: 963 661 313 3.

Szepessy J. (1981). Vízépítési földművek altalajának diszperzításvizsgálata, *Vízügyi Közlemények* 63(2), 219-238.

Szepessy J. (1983). Szemcsés és kötött talajok járatos eróziója, illetve megfolyósodása árvízvédelmi gátakba. A veszély mértéke, csökkentése. *Hidrológiai Közlöny*, 83. évf. 1. szám, 11-20.

Vendl A. (1951). *Geológia*. Tankönyvkiadó, Budapest.

A SZERZŐK



NAGY GÁBOR 1988-ban született Szombathelyen, középiskolai tanulmányait a kőszegi Jurisich Miklós Gimnáziumban végezte. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen szerzett okleveles építőmérnöki diplomát BSc szinten 2011-ben, MSc diplomát 2013-ban kapott. 2013 óta a BME Geotechnika, majd Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék munkatársa, ahol mind oktatási, mind kutatási feladatokat lát el, 2017-ben védte meg PhD disszertációját „Árvízvédelmi gátak diszperzítése” címmel. Okleveles építőmérnök, geotechnikai tervező, a Magyar Mérnöki Kamara, a Magyar Geotechnikai Egyesület tagja.



NAGY LÁSZLÓ 1956-ban született Nyíregyházán, iskoláit Debrecenben végezte. Első diplomáját 1980-ban szerezte a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karán. Ugyanott 1984-ben szakmérnöki államvizsgát tett. Munkahelyei a vízügyi szakterülethez kapcsolódtak: Vízügyi Tervező Vállalat, Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Központ, Árvízvédelmi és Belvízvédelmi Központi Szervezet, Országos Vízügyi Főigazgatóság. 2003 óta a Műegyetemen oktat, kutat. 2006-ban megvédte PhD disszertációját, kilenc évvel később habilitált. 2015-ben a geotechnika és az árvízvédelem határterületén végzett munkásságáért a Magyar Köztársaság Érdemrend Lovagkereszt kitüntetését kapta. A Magyar Hidrológiai Társaság tagja. 2016 májusától a Hidrológiai Közlöny egyik szakszerkesztője.

Fórum

Rövid szakmai beszélgetés Bodáné dr. Kendrovics Rita egyetemi docenssel, aki az Óbudai Egyetem Rejtő Sándor Könnyűipari és Környezetmérnöki Kar oktatási dékánhelyettese, a Környezetmérnöki Intézet igazgatója, arról, hogy miként segíti az Óbudai Egyetem a települési szennyvízgyártás feladatainak hatékony megvalósítását.

A hagyományos szakkikk forma helyett az interjúformát választottuk a téma jellege miatt. Bodáné dr. Kendrovics Ritát a Hidrológiai Közöny (HK) főszerkesztője dr. Fehér János kérdezte.

Települési szennyvízgyártási szakmérnök képzés az Óbudai Egyetemen

Bodáné dr. Kendrovics Rita

egyetemi docens, intézeti igazgató, oktatási dékánhelyettes
(bodane.rita@rkk.uni-obuda.hu)
Óbudai Egyetem Rejtő Sándor Könnyűipari és Környezetmérnöki Kar, Környezetmérnöki Intézet

HK: Köszöntöm Dékánhelyettes asszonyt, és köszönöm, hogy elfogadta meghívásunkat. A települési szennyvízgyártás feladatainak hatékony megvalósítása egyre összetettebb ismereteket igénylő szakterület, amit növekvő fontossággal kell el látni, figyelemmel a jövőbeli kihívásokra, köztük a klímaváltozás mind intenzívebb hatásaira. Mikor indult az Óbudai Egyetemen a települési szennyvízgyártási szakmérnök szakirányú továbbképzés?

BKR: Mindenekelőtt magam is üdvözlöm Főszerkesztő urat, köszönöm a lehetőséget, hogy erről a témáról beszélgethetünk. Az Óbudai Egyetem Rejtő Sándor Könnyűipari és Környezetmérnöki Kar Környezetmérnöki Intézete 2011-ben indította a települési szennyvízgyártási szakmérnök szakirányú továbbképzést.

HK: Miként fogalmazták meg a 2011-ben indított települési szennyvízgyártási szakmérnök szakirányú továbbképzés céljait?

BKR: Ennek a képzési programnak elsődleges célja a vízügyi ágazat szakember utánpótlásának biztosítása. Olyan szakemberek képzését, illetve továbbképzését céloztuk meg, akik a korábban megszerzett felsőfokú mérnöki végzettségük, valamint a nálunk megszerzett szakképzettségük és szakismereteik birtokában képesek a szennyvízgyártás szakterületén építési, üzemeltetési, szakértői, beruházási, közigazgatási és vállalkozói munkakörökben a legújabb szakmai- tudományos és fejlesztési eredmények követésére és alkalmazására, valamint specialisták a szennyvíz- és vízgyártás területén.

A képzés célja továbbá olyan korszerű technológiai és gazdasági ismeretek átadása, melyek a jövő fenntartható vízgyártását szolgálják. Jelenleg ugyanis azokból a speciálisan képzett szakemberekből, akik a fenntarthatóságot és a műszaki technológiák fejlesztését együttesen tudják kezelni hiány mutatkozik nem csak a vízügyi, hanem általában a mérnöki társadalomban. A szakmérnöki képzés ezt a hiányt igyekszik pótolni.

HK: Milyen időtartamú a szakirányú továbbképzés?

BKR: A képzés 3 féléves időtartamú, ami gyakorlatorientált képzési lehetőséget nyújt arra, hogy a résztvevő hallgatók az ágazat neves professzoraival, oktatóival, valamint

gyártó és szolgáltató cégek képviselőivel vitassák meg szakmai problémáikat, elképzeléseket és terveiket. Ennek remek hátterét biztosítják a jó hangulatú, interaktív órák.

HK: Milyen tantárgyak szerepelnek a szakirányú továbbképzés szakmai törzsanyagában?

BKR: A szakmai törzsanyag része a víz- és talajvédelem, települési hidrológia, szennyvíztisztítás és szennyvíziszap kezelés, valamint szennyvíziszap gyártás mellett a csatornahálózatok kiépítése, üzemeltetése, diagnosztikája és rekonstrukciójával kapcsolatos ismereteket adó tananyagok, összesen 112 tanóraban.

A természettudományos alapismeretek kiegészítésére adnak lehetőséget a hidrológiai, hidrobiológiai és biokémiai ismereteket tartalmazó tantárgyak.

A műszaki ismeretek bővítését a hidraulika, mélyépítési és energiaellátási alapok, gépészeti és irányítástechnikai rendszerek tantárgyi programjai biztosítják.

Az üzemeltetés gazdasági és jogi feladatait foglalják össze és nyújtanak jól használható, aktuális ismereteket a jogi, gazdasági és pénzügyi feltételrendszereket bemutató tantárgyak, a PR ismeretek, a dinamikus költségelemzés és a pályázati lehetőségek, valamint a projekt és forráselőkészítés.

Figyelembe véve a napjainkban egyre inkább előtérbe kerülő igényt az automatizálásra és folyamatirányításra a következő képzés csoportjának integrált irányítási rendszerekkel kapcsolatos ismereteket is kívánunk nyújtani, korszerűsítve a képzés tantárgyi programját.

HK: Mik a vizsgakövetelmények, mit nyújt a sikeresen megszerzett diploma?

BKR: A képzés harmadik féléve államvizsgálattal zárul és az itt kapott diploma feljogosítja a végzett hallgatókat arra, hogy önálló fejlesztési feladatokat oldjanak meg, decentralizált, kis szennyvíztisztítókat tervezzenek, üzemeltessenek, építési, üzemeltetési feladatokat lássanak el. A nálunk végzett szakmérnökök képesek a víziközmű szakterületen tervezői, vezető tervezői, szakértői, valamint projekt menedzseri feladatok elvégzésére.

HK: Mikor indul a következő települési szennyvízgyártási szakmérnök szakirányú továbbképzés?

BKR: A 2020 februárjában induló képzésre 2019. december 16-ig lehet jelentkezni. A képzésre való bejutás feltétele főiskolai vagy egyetemi, illetve BSc vagy MSc szintű mérnöki végzettség. A jelentkezési lap, továbbá a mintatanterv és a képzéssel kapcsolatos további információk az alábbi címen érhetők el: <https://rkk.uni-obuda.hu/hu/szakiranyu-tovabbkepzesek>.

HK: Köszönöm a beszélgetést!

A SZERZŐ

BODÁNÉ DR. KENDROVICS RITA PhD, okleveles gépészmérnök – tanár, egyetemi docens, a Környezettudományok doktora, Környezeti és Települési szennyvízgyógyászati szakmérnök, az Óbudai Egyetem Rejtő Sándor Könyvgyártási és Környezetmérnöki Kar oktatási dékánhelyettese, a Környezetmérnöki Intézet igazgatója. Tagja a Magyar Víz és Szennyvíztechnikai Szövetség Felügyelő Bizottságának, a Magyar Hidrológiai Társaság Környezetvédelmi Szakosztályának és Oktatási Bizottságának, a Magyar Tudományos Akadémia Vízgyógyászati Bizottság Vízellátási és Csatornázási Akadémiai Bizottságának, valamint a Magyar Nevelés- és Oktatókutatók Egyesület Környezetpedagógiai Szakosztályának. 2011-től a szakmérnöki képzés szervezője, tantárgyi programjainak kidolgozója, majd 2018-tól a képzés szakfelelőse. Főbb kutatási területei a fenntartható vízgyógyászati, szennyvíz újrahasznosítás, valamint az oktatásfejlesztés (projektoktatás bevezetése a vízminőségvédelem tantárgy oktatásában) a felsőoktatásban.

**ÓBUDAI EGYETEM**REJTŐ SÁNDOR KÖNYVGYÁRTÁSI
ÉS KÖRNYEZETMÉRNÖKI KAR

Nekrológ



Életének 79. évében elhunyt Dr. Lorberer Árpád Jenő okleveles vízépítőmérnök. 1959-ben érettségizett, majd egy évig a VITUKI-ban intézeti technikusként vett részt különböző kisminta-kísérleti és terepi mérési vizsgálatokban. Egyetemi tanulmányait 1960-ban kezdte meg az akkori Építőipari és Közlekedési Műszaki Egyetem (ÉKME) Mérnöki Karán Budapesten. Egyetemi tanulmányait, melyet 1963-ban megszakított és a Közép-Duna-völgyi VIZIG-nél műszaki ügyintézőjeként dolgozott egy évig, majd folytatva nappali tagozatos egyetemi tanulmányait, 1966-ban vízépítőmérnöki oklevelet szerzett. Egyetemi tanulmányait követően ismét a Közép-Duna-völgyi VIZIG munkatársa lett, mérnöki beosztásban. Mérnök geológus oklevelet szerzett 1970-ben a Budapesti Műszaki Egyetemen (BME).

1970-ben a Felső-Tisza Tarpa községi szakaszán irányította az árvízvédelmi munkálatokat. 1971-től a Közlekedéstudományi Kutató Intézet (KÖTUKI) Útépítési Tagozata Kőzetlaboratóriumának tud. munkatársa, majd a következő évben a VITUKI Mélységi Vizek Osztályának kutatója lett. 1977-től tudományos főmunkatárs, majd – különféle szervezeti keretek között – a Hidrogeológiai Kutatócsoport vezetője (egy ideig a Jósavfői kutatóállomás felügyelője is).

1979-ben védte meg doktori disszertációját szintén a BME-n Sátoraljaújhely térségi hidrogeológiájának leírásával, amelyben Magyarországon úttörő jellegű módon mutatta be a kettős porozitás jelenségét.

A VITUKI-ban végzett tudományos munkája során foglalkozott a Mátra- és Bükkalja, valamint a Duna-Tisza köze porózus vízádóival is. Meglepetést keltett azzal is, hogy hidrogeológiai alapon, a fedőrétegek vízszint-eloszlása alapján is ki tudta mutatni a Közép-Magyarországi Tektonikai vonal lefutását. Porózus alföldi tárolók vízáramlásával és az 1990-es években pedig több ismert talajvíz-szennyeződés feltárásával, pl. mindkét Garéi hulladék-lerakó hidrogeológiájával is foglalkozott munkája során.

Legtöbb és legismertebb tevékenysége azonban a karsztos vízádók, elsősorban a Dunántúl kutatásához kötődik. Sok évig dolgozott mind a teljes Dunántúltra kiterjedő térképi adatfeldolgozásokon, mind pedig a

Dr. Lorberer Árpád Jenő

Budapest, 1941. március 5. - Budapest, 2019. július 28.

kiemelt hazai termálfürdők vízföldtanával. A VITUKI részéről koordinálta a meddő olajkútak átalakítását, illetve bauxit- és szén-bányászati vízkivételek követésére szolgáló karsztvíz-monitoring rendszer felállítását, üzemeltetését, a monitoring eocén-program kiterjesztését, majd leállítását is. Részletes tanulmányokat, vízbeszerzési- és vízgazdálkodási és fejlesztési tervekét alkotott többek között Bábolna, Bükkfürdő, Esztergom, Gárdony, Harkány, Hévíz, Kehidakustány, Marcali, Tamási, Zalakaros hévízkútjairól, valamint a főváros összes gyógyfürdőjéről.

Teljes állásban 2006-ig dolgozott a VITUKI-ban, majd nyugdíjasként a VITUKI Kht. 2012. évi megszűnéséig volt az intézmény vezető tudományos munkatársa. Vállalkozóként 2001-2009 között a BABÉR 2001 Bt. ügyvezetője. Szakmai munkásságának főbb területei: karszthidrologia, karsztvízszint állapot-térképezése, különféle rétegvíz-tárolók vízföldtani feldolgozása, a budapesti hévizek vízföldtani kutatása. Műszaki tanácsadóként irányította a DMK karsztvízszint-észlelő hálózatának az „eocén-bányák”-kal kapcsolatos bővítését, beleértve az egyes fúrások földtani, kúthidraulikai, vízminőségi vizsgálatainak értékelését és dokumentálását.

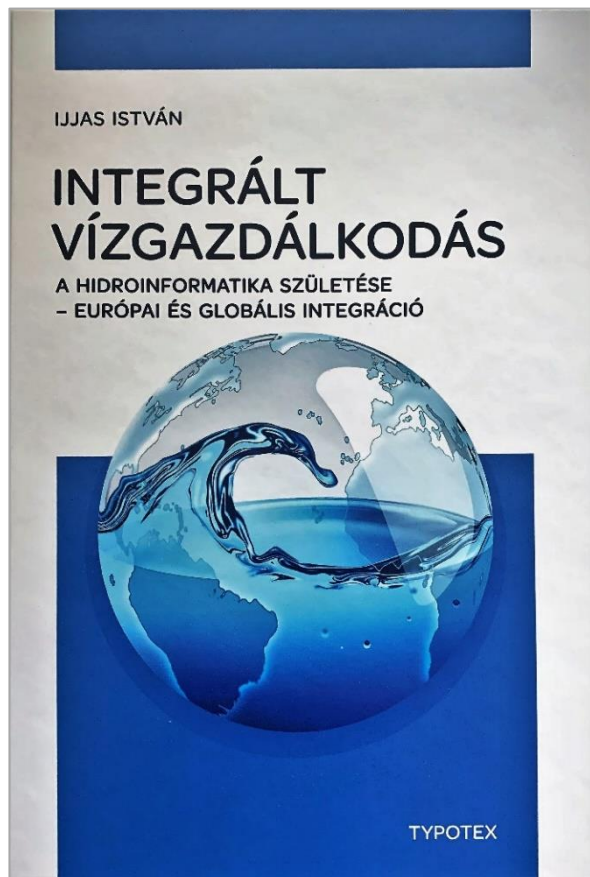
Publikációs tevékenységét 140 különböző, magyar és idegen nyelvű (saját és társszerzős) cikke és tanulmánya fémjelzi, amelyek hazai (számos ezek közül a Hidrológiai Közlönyben) és külföldi folyóiratokban és időszaki kiadványokban jelentek meg. Rendszeres előadója volt a Magyar Hidrológiai Társaság (MHT) nagyrendezvényeinek, külföldi szakmai konferenciáknak. Az MHT tagsága mellett több szakmai egyesület tagja volt: a Magyar Geotermális Egyesület tiszteleti tagja (2016), birtokosa a Felszín Alatti Vizekért Alapítvány „Ezüstpohará”-nak (2010). 1993-2013 között a Guckler Károly Természetvédelmi Közalapítvány Kuratóriumának elnöke. Az MHT Pro Aqua-émlékéremmel (2007) és Bogdánfy Ödön-émlékéremmel tüntette ki (2012).

Nem csak ez a sokoldalú és értékes életpálya jelenti rendkívüliségét, hanem az a hihetetlen mennyiségű információ, ami a fejében volt. Sokkal több, mint a munkáival, térképeivel zsúfolásig telt szobájában, ahol mégis mindig gyorsan megtalálta az aktuális problémához megfelelőt. Így idézte fejből a legrészletesebb szakmai és nem szakmai tudnivalókat, nyújtott segítséget munkatársaknak, konzulensként egyetemi hallgatóknak. Nemcsak szakemberként, hanem emberként is derekasan helyt állt. Kiállt barátaiért, munkatársaiért, a saját igazáért, kevéssé törődve a következményekkel. Nem kereste a maga javát. Szerényen élt, családtagjait segítve, élete nehézségeit panasz nélkül viselve. Isten adja meg neki a megérdemelt nyugalmat!

*Liebe Pál és Révi Géza
volt VITUKI-s munkatársak
Dr. Major Veronika
a Hidrológiai Közlöny Szerkesztőbizottságának tagja*

Könyvismertetés

Reich Gyula a Magyar Mérnöki Kamara elnökségi tagja bemutatja Ijjas István: Integrált vízgazdálkodás. A hidroinformatika születése — Európai és globális integráció című könyvét.



Az OVF Vízügyi Tudományos Tanácsának a „Jövőépítés a vízgazdálkodásban” című sorozatában a hazai vízgazdálkodás kiemelkedő tudósai foglalják össze az életművüket. Bemutatják mivel és hogyan járultak hozzá a vízgazdálkodás jövőjének az építéséhez, tanulságul a jövőt építő új generációk számára. A most megjelenő kötet szerzője Ijjas István, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízgazdálkodási és Vízépítési Tanszékének professzor emeritusa, aki a még ma is alkotó pályáját nagy részben az egyetemen töltötte, mérnök generációk szakmai tudását és szemléletét formálta.

A kötet főcíme az „Integrált vízgazdálkodás” arra utal, hogy azok a tevékenységek és módszerek, amelyekről ír, valamilyen formában és mértékben mind az integrálás – a ma divatos szóhasználattal élve – jó gyakorlatai közé tartoznak. „A hidroinformatika születése – Európai és globális integráció” alcímet, azért viseli a kötet, mert ezek a vízgazdálkodás elmúlt ötven évének a legnagyobb újdonságot jelentő és a legnagyobb változásokat hozó tényezői közé tartoztak, ezekkel foglalkozott a legtöbbet a szakmai pályafutása alatt.

Az első fejezet munkásságának az „idővonalán” – a közösségi médiák fiatalok számára ma már természetes kifejezésével élve – mutatja be kollégáit, a csapatokat,

amikben hol munkatársként, hol vezetőként alkotott, szemléltetve, hogy a vízügyi szakember munkája együttműködésben, párbeszédben kell, hogy gyökerezzen. Az integrált vízgazdálkodás két olyan témakörére hívja fel a figyelmet, amelyekről nem sok szó esik a hazai vízgazdálkodási szakirodalomban. Az egyik a szakmai-tudományos szervezetek jelentős szerepe az integrált vízgazdálkodási módszerek terjedésében, a másik a vízgazdálkodás, mint a víztudományok külön szakterületének kialakulása Magyarországon. Mindezzel kordokumentum, forrásértékű szakma-, ágazat- és tanszék-történeti visszatekintés, ideértve azokat a szervezeteket is, ahol tevékenykedett, mint a Magyar Hidrológiai Társaság elnöki posztja, a Magyar Mérnöki Kamara, vagy az ICID Magyarország.

A kötet második nagy témacsoportja a számítástechnika, a számítógép használata, aminek az időszerűségét nem lehet túlbecsülni! Hiszen a digitális vízgazdálkodás, a „big data” algoritmusok elterjedésének, küszöbén állunk. Bemutatja a számítástechnika (mai szóhasználattal hidroinformatika) oktatásának és alkalmazásának tanulságos kezdeteit a hazai vízgazdálkodásban, valamint a számítógéppel segített vízgazdálkodási tervezéshez és döntéshozáshoz általa kidolgozott modelleket, módszereket és programokat. Érdemes lenne ezeket aktualizálni, mert ha csak az öntözés remélhető felfutására tekintünk, máris eszünkbe jut az öntöző csőhálózatok optimalizálásához írott és a könyvben bemutatott legendás programja.

A harmadik témacsoport a vízügyek európai integrációja, az integrált vízgazdálkodás és alkalmazásának jó gyakorlatai. A ma már vitathatatlanul megjelent globális vízválság fékezésének pedig talán egyetlen átfogó eszköze az integrált vízgazdálkodás. Lényegének megértéséhez, a napi vízgazdálkodás legfontosabb problémáinak megoldására való alkalmazásához ez a témacsoport adhatja a legnagyobb segítséget. Hiányt pótol az integrált vízgazdálkodás alapfogalmáról, alapvetéseiről, módszereiről szóló leírásával. Rámutat arra, hogy a Víz Keretirányelv szerinti vízgyűjtő-gazdálkodás fontos eredményeket hozott, de az igazán integrált vízgazdálkodásnak a gazdasági és szociális célok teljesítéséhez szükséges vízgazdálkodási intézkedéseket is meg kell valósítania.

A Szerző a könyvet egyetemi hallgatónak, volt tanítványainak és munkatársainak, valamint a víztudományok szakértőinek és szakpolitikusainak is ajánlja. Felajánlja a segítségét azoknak, akik a könyvben bemutatott modelleket és módszereket alkalmazni kívánják.

A könyv az OVF támogatásával készült. A kötet szép kiállítása, gondos kivitelezése a Typotex kiadót dicséri.

Reich Gyula
a Magyar Mérnöki Kamara elnökségi tagja

Konferencia ajánlás



Magyarországot fenyegető vízválság – árvízvédelem

A Budapesti Víz Világtalálkozó utórendezvényeként, mintegy 300 fő részvételével megtartott „Homokszákoktól a drónokig” című konferencia a Víz Világtalálkozó sok víz, kevés víz és szennyezett víz témaköreiből a sok víz, azon belül is az árvíz hazai vízválságot okozható problémáit tekintette át.



A plenáris ülés

A plenáris ülésen elhangzott öt és a négy szekció ülésen elhangzott 24 előadás más-más szegmensét és vetületét dolgozta fel az árvíznek, de számos kérdés tekintetében egyirányba mutatnak a teendők.

1. A hazánkat fenyegető ma még rendkívüli árvizek a közeljövőben sűrűbben fognak előfordulni és magasabb szinten fognak lefolyni, amivel közvetlenül előidéznek a sok víz okozta vízválságot vagyis árvízkatasztrófákat kell elszüntetnünk. Elkerülésük érdekében haladéktalan intézkedések szükségesek, de ezeket nem a jelenleg működő irányító, illetve szakmai műhelyekben kell és lehet meghozni, hanem kormányzati szintű döntések szükségesek a fenyegető vízválság megelőzéséhez.

2. Az árvizek elleni küzdelemben a Kormány által elfogadott Nemzeti Vízstratégia szerint a védekezési feladatokról a megelőzésre kell helyezni a hangsúlyt, amihez több tározó kell, és a lefolyási viszonyokat az árvízvédelmi töltések között javítani kell. Vagyis a nagyvízi kezelési tervek alkalmazását jogilag kell kötelezővé tenni. Ennek feltétele, hogy a hullámtéri NATURA 2000-es területek kijelölésének létjogosultságát felül kell vizsgálni és azt a lefolyási viszonyok javításának kell alárendelni. Biztosítani kell, hogy a hullámtereken az árvízlevezetési feladatkörökben a vízügyi hatóság kizárólagos hatáskörben járjon el.
3. A tározók létesítése kapcsán szembe kell nézni a tározóterek létrehozásának, a meder duzzasztásának mind ez ideig elodázott kérdéskörével és meg kell szüntetni az e kérdésben még mindig meglévő érzelmeken alapuló tilalmakat. Folytatni kell a Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztésének programját, el kell érni, hogy a tározók területén a mezőgazdasági érdekeltég legyen felelős partnere a tározók igénybevételenek és a védekezési költségeket ne növelje a kártérítés.
4. A fejlesztéssel közel egyenértékű, nemzetközileg is elismert hazai árvízvédekezési képességet meg kell őrizni, aminek letéteményesei vízügyi szakemberek, akiknek kinevelése és megtartása a ma nem versenyképes bérezés és előmeneteli gondok miatt lehetetlen. Ezt alkalmi szervezeti átvezényléssel (mint tettük azt 2010-ben és 2013-ban) véglegesen nem lehet megoldani. Minden szervezetnek meg van a kijelölt és begyakorlott árvízvédekezési feladata. Az ország egyik része sem maradhat védelem nélkül.
5. Az árvizek előrejelzése, levonulásuk ismerete, az árvízi fejlesztések megalapozása és optimalizálása, a veszély közérthető érzékeltetése is megköveteli az új módszerekkel és eszközökkel végzett szervezett és államilag irányított, kutatási és fejlesztési munkát. Ez annál inkább indokolt, mert a kormányzati szinten érzékelhetően elvárt innováció is csak ezen a bázison építhető. Szükség van egységes vízügyi kutatási központra, aminek legyen kiemelt feladata a hullámterek alkalmazkodási feltételeinek kutatása.
6. A konferencián egyértelműen megfogalmazódott az egységes vízügyi szolgálat megteremtésének igénye. Hazánkban a vízgazdálkodás a biztonságpolitika része, garancia az állampolgárok életének megóvására és a nemzetgazdaság folyamatos működésének feltétele. A fenyegető vízválság kezelésének alapvető gátja a szervezeti széttagoltság. Ez a vízgazdálkodás minden területére igaz. Jószerevel felsorolhatatlan, hogy hány állami szervezet érintett a vízgazdálkodás valamely részproblémájában, és hány helyen gyűjtenek vízzel kapcsolatos adatokat. Az egységes vízügy nem a döntések meghozataláért, hanem azok átfogó, minden szempontú előkészítéséért felel, vagyis integrált vízgazdálkodást végez. Javítaná a hatékonyságot a számunkra stratégiai jelentőségű határvízi együttműködésben is az egységes vízügyi irányítás.

Budapest, 2019. november 25.

Lovas Attila
elnök
Global Water Partnership
Magyarország Alapítvány

Dr. Szlávik Lajos
elnök
Magyar Hidrológiai Társaság

Reich Gyula
elnökségi tag
Magyar Mérnöki Kamara

Dr. Váradi József
elnök
OVF Vízügyi Tudományos Tanács