

HIDROLÓGIAI KÖZLÖNY



A MAGYAR HIDROLÓGIAI TÁRSASÁG LAPJA • 101. ÉVF. 1. SZÁM • 2021
HUNGARIAN JOURNAL OF HYDROLOGY • VOL 101. No. 1. • 2021





Hidrológiai Közlöny

A Magyar Hidrológiai Társaság lapja
Megjelenik háromhavonként

Főszerkesztő

Fehér János

Szakszerkesztők

Ács Éva
Konecsny Károly
Nagy László

Olvasószerkesztő

Szlávik Lajos

Szerkesztőbizottság elnöke

Szöllősi-Nagy András

Szerkesztőbizottság tagjai

Ács Éva, Bakonyi Péter, Baranyai Gábor, Baross Károly, Bíró Péter, Bíró Tibor, Bogárdi János, Bozán Csaba, Csörnyei Géza, Engi Zsuzsanna, Fehér János, Fejér László, 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

Magyar Hidrológiai Társaság Titkarsága
1091 Budapest, Üllői út 25. IV. em.
Telefon: (1)-201-7655 Fax: (1)-202-7244
Email: titkarsag@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

Rácz Tibor és Kisely Tamás: Az MHT Vízépítési Szakosztályának fél évszázada – gondolatok a magyarországi vízépítésről 5

Koris Kálmán: Elkészült az új hazai empirikus árvízszámítási segédlet: az OVF-2020 13

Nagy Eszter Dóra és Szilágyi József: A Wisnovszky-féle összefüggés felülvizsgálata hazai vízgyűjtőkön mért összegyülekezési idők és számos morfológiai jellemző vizsgálatával 19

Rátky István: Egydimenziós nempermanens számításához szükséges minimális folyóhossz közelítő meghatározása. 2. rész: A feladat gyakorlati megoldása 33

Sándor Balázs, Szabó K. Gábor, Hajnal Géza: Mennyire örvénymentes a lefolyó örvény? 43

Lükő Gabriella, Torma Péter, Weidinger Tamás, Krámer Tamás: Hullámmódosított turbulens impulzusáram mérése és becslése a Balaton légkör-víz határfelületén 52

Szilágyi Mariann, Homoródi Krisztián, Józsa János, Krámer Tamás: Nádassziget hullámmódosító hatása – numerikus vizsgálatok 61

Szabó Andrea, Tamás János, Nagy Attila: Precíziós öntözőberendezés szórássegényletességének értékelése 74

NEKROLÓG

Dr. Vermes László – Kardos Levente és Fehér János megemlékezése 80

Dr. Vitális György – Szlávik Lajos megemlékezése 81

Dr. Janusz Kindler – Gayer József megemlékezése 82

In memoriam VITUKI – Fehér János megemlékezése 83



Hungarian Journal of Hydrology

Journal of the Hungarian Hydrological Society
Published quarterly

Editor-in-Chief

János FEHÉR

Assistant Editors

Éva ÁCS

Károly KONECSNYI

László NAGY

Copy Editor

Lajos SZLÁVIK

Editorial Board Chairman

András SZÖLLŐSI-NAGY

Editorial Board Members

Éva ÁCS, Péter BAKONYI, Gábor BARANYAI, Károly BAROSS, Péter BÍRÓ, Tibor BÍRÓ, János BOGÁRDI, Csaba BOZÁN, Géza CSÖRNYEI, Zsuzsanna ENGI, János FEHÉR, László FEJÉR, József GAYER, Géza HAJNAL, Márk HONTI, István IJJAS, János JÓZSA, Zsuzsanna KERESKESNÉ STEINDL, Zoltán KLING, Károly KONECSNYI, 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

Secretariat of the Hungarian Hydrological Society

H-1091 Budapest, Üllői út 25., Hungary

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

Email: titkarsag@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

Tibor RÁCZ and Tamás KISELY: Half a century of the Hydraulic Engineering Department of the Hungarian Hydrological Society - thoughts on hydraulic engineering in Hungary 5

Kálmán KORIS: The new Hungarian empirical flood calculation guide has been completed, the OVF-2020 13

Eszter Dóra NAGY and József SZILÁGYI: Revision of Wisnovszky's equation by a comprehensive analysis of measured time of concentration and catchment morphological parameter values 19

István RÁTKY: Approximate determination of the minimum river length required for one-dimensional unsteady flow calculation. Part 2: A practical solution to the problem 33

Balázs SÁNDOR, Gábor SZABÓ K., Géza HAJNAL: How irrotational is the sink vortex? 43

Gabriella LÜKKŐ, Péter TORMA, Tamás WEIDINGER, Tamás KRÁMER: Wave-driven turbulent momentum exchange measurement and parameterization at the air-water interface of Lake Balaton 52

Mariann SZILÁGYI, Krisztián HOMORÓDI, János JÓZSA, Tamás KRÁMER: Wave modification by reed island – a numerical study 61

Andrea SZABÓ, János TAMÁS, Attila NAGY: Evaluation of water application of precision irrigation system 74

OBITUARY

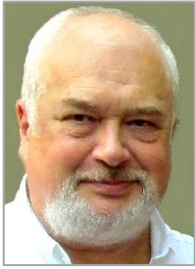
Dr. László VERMES – Commemoration by Levente KARDOS and János FEHÉR 80

Dr. György VITÁLIS – Commemoration by Lajos SZLÁVIK . 81

Dr. Janusz KINDLER – Commemoration by József GAYER ... 82

In memoriam VITUKI – Commemoration by János FEHÉR 83

Előszó



Rendhagyó módon kezdődött a *Hidrológiai Közlöny* második évszázadának története. Az elmúlt években kialakult negyedévenkénti megjelenés ütemét megtörve a 101. évfolyam egy tematikus Különszám megjelentetésével kezdődött. A jelen lapszámot megelőzve, 2021 februárjában megjelent a 119 oldal terjedelmű Különszám, amelyben valamennyi cikk a vízkonfliktusok témakörét vizsgálta.

A kötethez *dr. Somlyódy László* akadémikus, professzor emeritus írt bevezető gondolatokat a vízről, a vízzel való gazdálkodás növekvő kihívásairól.

A bevezetőt követően a Különszám összesen 16 szakcikket tartalmaz. Az első cikk rövid áttekintést ad a globális szinten fenyegető vízkonfliktusokról. *Major Veronika* cikke felhívja a figyelmet arra, hogy innovatív műszaki, intézményi, közgazdasági és jogi eszközök bevezetése és alkalmazása lesz szükséges a vízkonfliktusok kezeléséhez.

A *Szilágyi Ferenc*, *Major Veronika* szerzőpáros a globális vízkonfliktusok rövid áttekintése után tárgyalja a hazai vízkészleteink főbb jellemzőit és kockázatait, valamint bemutatja az alkalmazható konfliktust megelőző és kezelő eszközöket.

Pump Judit nagyszámú megjegyzéssel, jegyzettel ellátott két cikkben is kifejti, hogy a vízzel kapcsolatos konfliktusok megelőzésére, enyhítésére vagy megoldására a jog milyen eszközöket ad, amelyek jó megválasztása nagy jelentőséggel bír. Ugyanakkor rámutat arra is, hogy a jogi eszközök maguk is hozzájárulhatnak a konfliktusok keletkezéséhez.

A következő cikkben *Szilágyi Ferenc* áttekinti, hogy a társadalmi és az ökológiai (ideértve a természetvédelmet is) vízigények hogyan alakulnak Magyarországon, és a vízhiányos időszakokban ez milyen konfliktusokat okoz.

Ezt követi hat rövidebb specifikus cikk, amelyek a vízkárelhárítás (*Láng István*), felszíni vizek vízminőségvédelme (*Varga Pál*), a mezőgazdasági vízgazdálkodás (*Kolossváry Gábor*), a termálvizek hasznosítása (*Kérékgyártó Tamás és Tóth György*), a vízellátás (*Kovács Károly*), valamint a települési vízgazdálkodás infrastrukturális fejlesztése (*Füstös András*) területén megtörtént vagy lehetséges konfliktusokat elemzik.

Charles J. Vörösmarty és szerzőtársai módszert mutatnak be, hogy milyen adatok és azokból származtatott mérőszámok alapján lehet azonosítani, elemezni és térképezni azokat a vízgyűjtő területeket, ahol sok szempontot figyelembe véve vízkonfliktusok alakulhatnak ki. A nemzetközi szerzőhármast a szélesebb nemzetközi szakmai nyilvánosság elérése érdekében angol nyelven is elkészítette a cikket. A szerzők kérésére, és a témával kapcsolatos várható érdeklődésre tekintettel, a kettős megjelenést támogattuk.

Híressé / hírhedté vált vízkonfliktust dolgoz fel a következő két cikk. Az elsőben a budapesti Római-part árvízvédelmi rendszere fejlesztésének konfliktusokkal terhelt történetét és tanulságait mutatja be *Major Veronika*. A másik eset, a Bős-Nagymarosi Vízlépcső rendszer évtizedek óta megoldatlan konfliktusa. *Janák Emil* tollából származó cikk figyelemre méltó szakmai összefoglalást adja a komplex műszaki, intézményi, közgazdasági és jogi problémakörnek.

Kis András és társai célratörő tömörségű cikkben vizsgálják fel az alkalmazható közgazdasági eszközöket és azok szerepét a szűkös vízkészletek elosztásában, illetve a vízzel kapcsolatos érdekkellentétek kezelésében.

Ezúton is szeretném megköszönni *Major Veronikának* kimagasló munkáját, aki kezdeményezője, majd szervezője volt a Különszámnak, és aki ezeken felül több cikk szerzőjeként is hozzájárult a kiadványhoz.

Ugyancsak köszönöm *Ijjas István* professzor úrnak a lektori munkáját, amelynek során értékes tanácsokat adott a cikkek szerzőinek, elősegítve ezzel a cikkek szakmai pontosságának és minőségének növelését.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm a *Szerzőknek*, hogy a Hidrológiai Közlöny nevében küldött felkérést elfogadták, és elkészítették szakterületük vízkonfliktusait érintő elemző cikkeiket.

Azt gondolom, hogy a Különszám átfogó képet ad és jó segítséget nyújt a vízügyi szakma különböző területein dolgozó szakembereknek a vízkonfliktusok komplex kérdéseire. A cikkek számos ajánlást is tartalmaznak mind a döntéshozók, mind a gyakorló szakemberek számára, amelyek megvalósítása segítséget tud adni a vízkonfliktusok kezelésében.

A Magyar Hidrológiai Társaság internetes honlapjáról letölthető, illetve az MHT Titkárságától megrendelhető nyomtatott Különszámot ajánlom mindazoknak, akik mélyebb ismereteket kívánnak szerezni a vízgazdálkodás komplex összefüggéseiről, amelyek érintik ennek jogi, szabályozási, intézményi, műszaki és társadalmi vetületét.

És most néhány szó a jelen lapszámról, ezen történelmi 101. évfolyam, a Hidrológiai Közlöny remélhetően teljessé váló második évszázadának tervszerinti első számáról. E lapszámban nyolc szakcikk jelent meg, amelyek a vízépítés, a hidrológia, valamint a hidraulika témakörében íródtak.

Rác Tibor és Kisely Tamás, mint az MHT Vízépítési szakosztályának vezetői, áttekintést adnak a szakosztály fél évszázados tevékenységéről, bemutatva a magyarok Kárpát medencében történt letelepedése előtti időktől napjainkig megvalósult jelentősebb vízépítési tevékenységeket, valamint hogy milyen tevékenységet folytatott az 1964-ben megalakult Vízépítési szakosztály, miként segítette a vízépítési szakma fejlődését hazánkban.

Két hidrológiai témájú cikk közül először *Koris Kálmán* mutatja be az OVF-2020 nevet viselő új hazai empirikus árvízszámítási segédletet, majd *Nagy Eszter Dóra és Szilágyi József* közlik eredményeiket a Wisnovszky-féle összefüggés felülvizsgálatáról, amelyet hazai vízgyűjtőkön mért összegyűlekezési idők és számos morfológiai jellemző felhasználásával végeztek. Mindkét cikkben közölt eredmények jelentősen hozzájárulnak az árvízi védekezés, illetve tervezés minőségének javításához.

A szakcikkek harmadik csoportjában, a hidraulika területéről közlünk öt cikket. *Rátky István* kétrészes cikkének második része gyakorlati példát mutat be az egydimenziós nempermanens számításához szükséges minimális folyóhossz közelítő meghatározására.

Egy speciális hidraulikai jelenség, a lefolyóban vagy más szóval nyelőben kialakuló örvénymozgás matematikai modelljét mutatja be *Sándor Balázs és társai* cikke, rámutatva, hogy a tárgyalt modell alkalmas lehet különböző mederalakok hatásának vizsgálatára.

Hullámzással kapcsolatos a hatodik és a heted szakmai cikk. *Lükő Gabriella és társai* a Balaton légkör-víz határfelületén kialakuló hullámzás módosította turbulens impulzusáram mérésével és becslésével foglalkoztak. A mérések alapján új, sekély tavi, meghajtási hossz-limitált körülményekre alkalmazható légkör-víz határfelületen kialakuló impulzusáramra vonatkozó becslési összefüggéseket vezettek le.

Szilágyi Mariann és társai numerikus modellvizsgálatokat végeztek egy Fertő-tavi nádassziget hullámzásmódosító hatásának elemzésére. Vizsgálatuk során az áramlástan hatásai közül a felszíni hullámzás módosulására, a sziget környezetében végbemenő hullámjelenségekre összpontosítva. Megállapították, hogy ezek közül legnagyobb jelentőséggel a diffrakció (és kisebb mértékben a refrakció) révén a nádassziget árnyékterébe oldalról behatoló energia bír, és meghatározó még az árnyéktér fölött fokozatosan megerősödő szél energiabevitele.

A nyolcadik cikkben *Szabó Andrea és társai* precíziós öntözőberendezések szóráségyenletessége összehasonlító vizsgálatának eredményeit közlik. Összefoglaló megállapításuk: a változó intenzitású öntözési (VRI) technológiával ellátott öntözőberendezések biztonságosabb és egyenletesebb szórásképet biztosítanak, mint a hagyományos lineáris öntözőberendezések.

A Magyar Hidrológiai Társaság három kiemelkedő tudós tagjáról emlékezünk meg Nekrológ rovatunkban. Az életének 85. évében elhunyt *dr. Vermes László* professzoról írt nekrológban, életútjának bemutatása után *Kardos Levente és Fehér János* kiemelik, hogy *Vermes László* professzor személyében nem csak egy kiváló szakembert veszítettünk el, hanem egy olyan személyiséget is, aki tudásával, segítőkészségével mindenben támogatta kollégáit és fáradhatatlanul segítette a hallgatóit is.

Szlávik Lajos személyes hangvételű nekrológban mutatja be életútját, és emlékezik meg a Magyar Hidrológiai Társaság elmúlt hetven évének meghatározó személyiségéről, az életének 92. évében elhunyt páratlan tudású szakemberről, *dr. Vitális György* okleveles geológusról, a földtudományok kandidátusáról.

A Társaság 2001-ben külföldi tiszteleti tag címmel kintüntetett tagjáról, a 86 évesen elhunyt lengyel *dr. Janusz Kindler* professzorról emlékezik meg *Gayer József*. Kindler professzort hazáján kívül szerte a világban, mint nagyra becsült vízügyi szakember tisztelték, és akit sokan az integrált vízgazdálkodás egyik apostolának tartottak. Kollégái, tanítványai melegszívű, intelligens és rendkívül elfoglalt embernek ismerték, aki minden nehézség ellenére egész életében elkötelezett maradt a tudomány és a környezeti ügyek iránt.

Egy szomorú aktualitás kiváltotta írással fejeződik be a Hidrológiai Közöny második évszázadának nyitó száma. Az *In memoriam VITUKI* írásban megemlékezünk arról, hogy 2020. december 10-én felrobbantották a Budapest, IX. ker. Kvassay Jenő út 1. szám alatt álló toronyházat, és ezzel fizikailag is végleg megsemmisült egy jogelődjeit is figyelembe véve 126 éves múlttal rendelkező vízgazdálkodási tudományos kutatóintézet, a VITUKI. Mindazok, akik dolgoztak a VITUKI-ban, illetve kötődtek e nagyszerű intézethez, az emléket úgy őrizhetnék meg leginkább, ha megírnák e kiemelkedő intézmény történetét a jövő szakmai generációja számára. Várjuk mindazok jelentkezését, akik ebben a munkában részt vennének, és ehhez a Hidrológiai Közöny támogatását felajánljuk.

Dr. Fehér János
címetes egyetemi tanár
a Hidrológiai Közöny főszerkesztője

Az MHT Vízépítési Szakosztályának fél évszázada - gondolatok a magyarországi vízépítésről

Rácz Tibor*, Kisely Tamás**

* A Magyar Hidrológiai Társaság Vízépítési Szakosztályának elnöke (email: raczt167@yahoo.com)

** A Magyar Hidrológiai Társaság Vízépítési Szakosztályának titkára

Kivonat

A cikk első része rövid áttekintést ad a magyarok Kárpát-medencében történt letelepedése előtti időktől napjainkig a területen megvalósult jelentősebb vízépítési tevékenységekről. A második részben tárgyalja, milyen tevékenységet folytatott a Magyar Hidrológiai Társaság keretében 1964-ben megalakult Vízépítési Szakosztály, miként segítette a vízépítési szakma fejlődését hazánkban.

Kulcsszavak

Vízépítés, MHT, Vízépítési Szakosztály, történeti áttekintés.

Half a century of the Hydraulic Engineering Department of the Hungarian Hydrological Society - thoughts on hydraulic engineering in Hungary

Abstract

The first part of the article gives a brief overview of the major hydraulic engineering activities carried out in the area from time the Hungarians settled in the Carpathian Basin to this day. In the second part, it discusses the activities of the Department of Hydraulic Engineering established in 1964 within the framework of the Hungarian Hydrological Society, and how the Department helped the development of the hydraulic engineering profession in Hungary.

Keywords

Hydraulic engineering, MHT, Hydraulic Engineering Department, historical overview.

BEVEZETÉS, ELŐZMÉNYEK

A Magyar Hidrológiai Társaság Vízépítési Szakosztálya 1964-ben alakult meg, eredeti nevén Vízépítőipari Szakosztály néven. Maga a vízépítés kifejezés nehezen definiálható, alkalmazzák szűkebb értelemben, kifejezetten a vízrendezés, vízhasznosítás és vízgazdálkodás építési tevékenységeire, vagy tágabb értelemben, részben lefedve az említett szakterületek nem kifejezetten építési jellegű szakkérdéseit is.

A vízépítés az egyik legrégebbi építési tevékenység, és végig kíséri az emberi társadalom fejlődését a kezdetektől fogva. E tevékenység valahol az első lakhelyek víz elleni védelménél indul, és a javak mennyiségének, értékének növekedésével, valamint a víz iparszerű használatával az öntözés és energiatermelés (mechanikai, később elektromos energia) egyre jelentősebbé vált. A vízépítés jellegzetessége, hogy fajlagos költsége magas, a létesítmények többnyire jelentős építési munkát igényelnek, nagy földtömegeket kell megmozgatni, felszín alatt kell építkezni, jelentős erőhatásoknak kitett szerkezeteket kell kialakítani. A vízépítés drága dolog, sokszor a természeti környezet nagymértékű átalakítását igényli vagy eredményezi. Jellemző, hogy a legfejlettebb, leginkább szervezett társadalmak foglalkoztak vízépítéssel, azok, ahol az anyagi és emberi erőforrás erre huzamos időn keresztül rendelkezésre állt. A vízépítés jellegzetessége, hogy sokszor nem feltétlen termel közvetlen hasznot, sokszor károk keletkezését akadályozza, vagy a termelőtevékenység kiegyensúlyozott feltételeit biztosítja.

A természetes felszíni vízkészletre a változékonyság jellemző, ahogy a felszíni vízkészletek az igencsak változó meteorológiai viszonyoktól függenek, a víz emiatt

hol szűkebben áll rendelkezésre, hol pedig a szokásos mennyiségét lényegesen meghaladja. Ez ugyanúgy igaz volt évezredekkel ezelőtt, és igaz ma is, korunk klímaváltozásától függetlenül. A jövőbe tekintve az emberi tevékenység hatására kialakult klímaváltozás miatt az várható, hogy a víz térbeli és időbeni eloszlásának egyenlőtlen jellege megmarad, ugyanakkor szélsőértékei kitolódnak. Ez hosszabb aszályos időszakokra és szélsőséges áradásokra történő felkészülést igényel.

Ugyan a vízépítés, mint mérnöki tevékenység különösen a régi korokra visszatekintve nehezen különíthető el az általános mérnöki munkáktól, különösen a hadmérnöki tevékenységtől, a Velencei Köztársaságban már a XIII. században is külön foglalkozásként létezett a hidrometria, a vízmérnöki tevékenység, mellyel kaocsolatban meglehetősen szigorú szabályok léteztek például az árvízvédelmi létesítmények védképességének folyamatos biztosítására, a védművek károsításának megakadályozására. Sokszor beszélünk mérnökökről a Római Birodalom, vagy az antik Görögország, és a többi nagy antik kultúra kapcsán is, vissza egészen Chatal Hüyük városállamáig, az időszámításunk előtti 7500-as évig, ugyanakkor sajátos módon például a mérnökök képzéséről a ma emberének csak sejtései lehetnek (Sanda 2015a, 2015b).

A vízépítés történetét három önkényesen meghatározott szakaszra osztva tárgyaljuk a jelen írásban.

Korai szakasz alatt azt az időszakot értjük a továbbiakban, amelyre a műszaki tudás átadásának mester-tanítvány kapcsolata volt jellemző. Nem (feltétlen) a leírt tudás, hanem elsősorban tapasztalati alapon továbbadott szakmai ismeretek átadása, amely időszakban az anyaghasználatot

az építési tevékenység során a föld-kő-fa-tégla-kötőanyag alkalmazása jellemzi.

A *klasszikus korszakot* a korai időszakról elsősorban az intézményes képzés megjelenése, és a munkák egyre megalapozottabb tervezése különbözteti meg, az anyaghasználatban pedig egyre nagyobb szerepet kapnak a fémek, elsősorban az öntöttvas, majd az acél.

A *modern vízépítés korszakát* az intézményes képzés állandósulása, az egyre mélyebb tudományos megalapozottság és az iparszerűen előállított anyagok alkalmazása jellemzi, amely a jelenkorban is tart.

A VÍZÉPÍTÉS KORAI KORSZAKA MAGYARORSZÁGON

A magyarok letelepedése előtti időszak

Az első ismert vízépítési munkálatok a Kárpát-medencében az ókori Rómához köthetők. Ez az államalakulat volt képes a vízimunkákhoz szükséges erőforrások biztosítására. A Római Birodalom tartósan a mai Dunántúli területen rendezkedett be, de jelen volt a Duna vonalától keletre húzódó területen is, ahol politikai értelemben ütközőzónát tartott fenn. Ennek talán leginkább ismert nyoma a Csörsz árka néven ismert védműrendszer, amelyet a IV. században építhettek a Duna-Tisza-közén élő szövetséges szarmaták védelmére (Bernáth 2007). Pannónia gazdaságának fellendülése segítette elő az első ármentesítési, mederrendezési és lecsapolási munkák véghezvitelét. A III. és IV. században Probus császár uralkodása alatt mocsárkiszáritással, Galerius császár időszakában vizes, ingoványos területek lecsapolásával nyertek értékes területeket a földművelés elősegítésére. Hagyomány szerint ugyanebben az időszakban készült el többek között hatalmas erdők kiirtásával a Sió-csatorna őse, amely a Balaton vízszintjét szabályozta (Katona O. és Tóth A. dátum nélkül.), bár utóbb a Sióval kapcsolatos római kori munkákra bizonyítékot nem sikerült feltárni (Anon 2015). Völgyzárógátas víztározók is készültek a római időszakban, amelyekre példa a Fejér megyei Pátka melletti, ma nyomokban fellelhető egykori, és a Veszprém megyében, Várpalotától nyugatra a 8-as főút töltésében lévő jó állapotban fennmaradt létesítmény. A római kori vízépítés legismertebb és jól dokumentált létesítményei a városok vízellátását biztosító, magasvezetésű vízvezetékek, az akvaduktok, pl. Aquincumban. A Dunán már a rómaiak előtt megfordultak a föníciaiak hajói, azonban a leírások szerint fejlettebb hajózás csak a római korban alakult ki (Bernáth dátum nélkül.).

A Római Birodalom hanyatlását és Pannónia feladását követően a vízépítési jellegű ténykedések is visszaszorultak. A vízépítési munkák gazdasági feltételei jó ideig nem álltak fenn, a római létesítmények idővel elpusztultak, a lecsapoló csatornák eliszapolódtak, a mezőgazdaság számára korábban meghódított területek újra erdősültek vagy mocsárrá váltak.

A kialakuló Magyar Királyság megerősödésével a gazdasági fejlődés újra igényt és erőforrásokat teremtett a vízépítési munkálatokhoz. A magasabb termelékenységű, fejlettebb mezőgazdaság a természet növekvő arányú átalakítását igényelte. A középkori vízerő hasznosítás a római

kori találmányokon alapuló, vízikerekekről hajtott különféle mechanikai munkavégzésre alkalmas gépekben volt megtalálható, így a vízimalmokban, fűrészmalomban, olajütőkben és posztványolóknak, kendertörőkben stb. Az elrendezésüktől függően malomcsatornás vagy völgyzárógátás megoldással üzemelő vízimalmok kialakítása mai szemmel tipikus vízmérnöki tevékenység, amelyet a malomépítésben jártasságot szerzett mesterek végeztek. A vízimalmok jelentős része igen hosszú időn, akár évszázadokon át is fennmaradt és csak az iparosított molnárkodás vezetett hanyatlásukhoz. Visszaszorulásukat gyorsította a malmok vízrendezési szempontok miatti lebontása és a malomárkok ezzel párhuzamosan végbement felszámolása. A vízimalmok száma a XV. század végén 5 500 körülire volt becsülhető (Károlyi 1960).

A mezőgazdasági célú vízhasznosítás ebben az időszakban a halastavak létesítésére korlátozódott, amelyek a középkori adománylevelekben rendszeresen felbukkanó, értéket képviselő létesítmények voltak. A halastavak természetesen nem jelentenek feltétlen komoly mérnöki teljesítményt, hiszen ezek akár a természetadta mélyültekben spontán módon is kialakulhattak. Ugyanakkor, hivatkozva a vízimalmok kapcsán rendelkezésre álló műszaki ismeretekre, épített tározók révén is készülhettek tavak, amelyek a kor technikai színvonalának megfelelő létesítményként hosszabb időre is fennmaradhattak.

A vízkárelhárítás és vízrendezés korabeli létesítményeiről kevés híradás maradt fenn. Nyilvánvaló, hogy a kor embere igyekezett védeni javait az árvizek ellen. Általánosságban a passzív vízkárelhárítás lehetett azért jellemzőbb, a károk megelőzése azáltal, hogy az építmények és települések kialakítására és a termelésre a vízkároknak nem kitétt, mai terminológiával élve vízkárnak ellenálló (reziliens) területeket választották. Ugyanakkor a XIII. században a Rába árvizeit helyenként már gátakkal igyekeztek távol tartani az értékektől, és a Körös-Berettyó völgyben is épültek árvízvédelmi töltések. A XV. század végén a Dráva mentén állítólagos római kori gátak felhasználásával vagy továbbfejlesztésével készültek töltések. Werbőczy hármaskönyve is említést tesz a védőtöltésekről és a vezérárkokról, amelyek korabeli mederrendezési munkákra is utalnak. Minthogy a jogszabályok jellemzően a korábban kialakult igények normatív leképezésével keletkeznek, a szabályban körülírt létesítmények megjelenése már sok generációval korábban megtörténhetett. A vízrendezésre, amely jellemzően mezőgazdasági területek kialakítására irányult, számos példa lelhető fel. A XIII. században lecsapoló létesítmények készültek a vizenyős területek lecsapolására: ilyen például a Debrecen határában levő Nagyárok vagy Ördögárok (Károlyi 1960). A munkaerőt ezekhez a munkálatokhoz a jobbágyi köteles munkavégzés biztosította.

A vízellátási, csatornázási infrastruktúra tekintetében a korábbi római időszakhoz képest visszaesés figyelhető meg egyes kivételektől eltekintve (Buda, Városkút forrás vízvezetéke).

A víziközeledéshez is szükségszerűen kapcsolódtak vízépítési munkák a kikötők és a révek kialakítása kapcsán. A római időszakot követően a Magyar Királyság

megszilárdulásának időszakára tehető a hajózás újolagos fejlődésének időszaka. A XIII. században Pest és Pozsony voltak a legjelentősebb hajózási központok, később emelkedett melléjük Komárom és a Tisza mentén Szeged, valamint ekkoriban készült el a Duna folyását végig kísérő vontatóút.

Vízimunkálatok Magyarországon a török korban (XVI—XVII. század)

A török terjeszkedés következtében kialakult rendszeres háborúk miatt az alföldi népesség életmódja megváltozott. A korábbi időszak földműves létformája helyén szilaj pásztorkodás alakult ki. Ekkor jöttek létre az eltűnő falvak helyén a széles határral rendelkező mezővárosok, és ekkor alakultak ki a legeltetésre alkalmas puszták is (*Károlyi 1960*). Habár jelentős területek voltak kiszolgáltatva a katonai akcióknak, elsősorban a hódoltsági terület peremén, a belső vidékeken viszonylagos rend és béke honolt. A hódoltság kezdeti időszakára az iszlám alapú jogállam, valószínűleg, és előjogmentes, az állami hierarchiához kötött hatalom volt jellemző (*Matúz 1992*). Ez a rend a birodalom gazdasági megingása miatt a hódoltság második időszakára a megváltozott és lényegesen rosszabb állapotokat hozott a lakosság részére (*Matúz 1992*), amely a hosszabb távú fejlesztésekre nem igazán adott teret, és a már meglévő létesítmények állapota is leromlott. A török hódoltság legismertebb vízépítéshez kapcsolódó eredménye a hő- és gyógyforrások nagyobb arányú hasznosítása volt, amelyek egy része a mai napig fennmaradt, és a hazai fürdőkultúra részét képezi. A hódoltság idejének másik következménye a rizstermelés meghonosítása, az ehhez szükséges infrastruktúrával együtt. Az 1800-as évek elején leírt vélekedések szerint a teljes hódoltsági területen termeltek rizst, és leginkább a meghódított Mátraalja lehetett jelentős, bár ezt a növények agrometeorológiai igényei nem igazolják (*Békés Megyei Múzeumok Közleményei 1985*).

A legjelentősebb vízi munkálatok magyar és török részről is jellemzően hadászati célúak voltak: a várakat vízzel töltött mesterséges várárokkal, elárasztott területekkel biztosították (pl. Szigetvár, Sárvár, Kaposvár, Simon-tornya, Fehérvár (Székesfehérvár)), ahol ezt a terepviszonyok megengedték.

A török megszállással nem érintett területeken a meglévő létesítmények fenntartása és újak építése jellemző volt, amint ez például a Duna mentén, a Csallóközben meglévő töltések karbantartásáról, de általában az árvizekkel fenyegetett vármegyék megfelelő létesítmények építésére irányuló együttműködéséről szóló királyi rendeletekből látható (*Károlyi 1960*).

A XVIII. század elején végzett vízépítési munkálatok

A XVIII. század elején a török hódoltság utáni időszak legfontosabb feladata az elvadult vízviszonyok rendezése volt. A lassan meginduló gazdálkodás egyre inkább nyitott az olyan termelési technikák felé, amelyek a vízjárta területeken nem voltak alkalmazhatók, így a vízrendezésre irányuló szándék egyre gyakrabban jelent meg. A század elején a Rákócziak csatornaépítési és vízszabályozási terveket készítették, továbbá az országgyűlés is foglalkozott a

vízrendezés kérdésével. A rizstermelésben, és az ehhez kapcsolódó vízrendezési és mezőgazdasági vízépítési munkákban olasz telepesek végeztek jelentős munkát az Alföld délkeleti részén (*Békés Megyei Múzeumok Közleményei 1985*).

Tervek készültek ugyan a folyók hajózhatóvá tételére, csatornaépítésekre, azonban nagyszabású vízrendezési célok ekkor még nem valósultak meg.

A MAGYARORSZÁGI VÍZÉPÍTÉS KLASSZIKUS IDŐSZAKA

A kiegyezés előtti időszak vízépítési munkálatai

A XVII. században megindult a műszaki felsőoktatás, amelyre Mária Terézia és II. József hangsúlyt fektetett. A vidéki gazdasági és mérnöki akadémiákon kívül a pesti egyetemen megindult a mérnökképzés. A XVIII. század végén elkészült a Ferenc-csatorna, amely a Duna hajózás időszerűségét rövidítette meg, és lényegében az 1840-es évekig működött. Felújításával és kiegészítésével készült el a csatorna a mai nyomvonalán, melynek vízellátását a bajai Deák Ferenc zsilip biztosítja.

A XIX. század elejének egyik legnagyobb változását a Napóleoni háborúk utáni gabonakonjunktúra hozta, amely extenzív termelésbővítéssel járt (*Demeter 2017*), és amely az 1890-es évekig tartott, komoly lendületet adva a vízrendezési munkálatoknak. Ennek első és meghatározó üteme a reformkorra esett. A reformkor vízügyi programjának előkészítői Vedres István és Beszédes József voltak. Az ő javaslataik alapján fogalmazta meg Széchenyi István a kor vízépítési feladatait, összefüggésben az ország remélt gazdasági fejlődésével. A XIX. század elején a szabályozási munkálatokat előkészítő vízrajzi felméréseket követően megkezdődött a reformkor vízügyi programja és a Duna és a Tisza szabályozása, amely Széchenyi István és Vásárhelyi Pál együttműködésnek köszönhető. Meggyőződésük szerint az ország felemelkedésének legfőbb eszköze a közlekedés és a kereskedelem fejlesztése: az ehhez szükséges vízi és szárazföldi utak megteremtése, vagyis a vízszabályozások, az ármentesítések és lecsapolások, és ezzel egyidejűleg országos kereskedelmi és kulturális központok kialakítása. Emiatt vette kezébe Széchenyi a vízrendezés és a hajózás ügyét, ezért sürgette a biztos hajóutak megteremtését, és ezért utazta végig Beszédes Józseffel a Dunát Pesttől a Fekete-tengerig, hogy a helyszínen lássa a hajózás akadályait, ugyanakkor megismerje a szabályozásban rejlő gazdasági lehetőségeket is.

Az Al-Duna-szabályozás munkálatai 1833-ban kezdődtek meg a mederbeli akadályok eltávolításával és a később Széchenyiről elnevezett vontatóút építésével. Végül az akkori hajók számára sikerült Széchenyinek és Vásárhelyinek járhatóvá tenni az Al-Dunát és megteremteni a hajóút összeköttetést a tengerrel.

A XIX. század és Vásárhelyi Pál legjelentősebb vízmérnöki teljesítménye a Tisza szabályozása, a Tisza-völgy rendezése. Vásárhelyi terveit alapján évtizedeken át folyamatosan haladtak a munkálatok, amelyek a század végére értek olyan állapotba, hogy a Tisza-völgy ármentesítését befejezettek tekinthették. Egyben ez az első olyan

munka, amely kapcsán jelentős vita keletkezett a beruházás hasznosságáról és hatásairól, amely a magyar vízépítést a mai napig kíséri. Ez a vita a jelenkor számára is tanulságot hordoz. Többek között Hunfalvy János, a XIX. századi földrajztudós már az 1860-as évektől bírálta a Tisza-völgyi munkálatokat, állítva, hogy azok hatása a kiszáradás folyamatát erősíti. 1888-ban úgy fogalmaz, hogy „*ha az eddig követett rendszert tovább folytatjuk, az árvíz magassága évtizedről évtizedre mindinkább emelkedni fog, a töltéseket folyvást magasbíteni és erősbíteni fog kelleni, mégis a töltésszakadások nem lesznek elháríthatók.*” Így folytatja: „*Sokkal messzibre terjed most mind a töltés-szakadás esetében a kiömlő árvíz, mind a föld alatt szivárgó víz. Most oly vidékeken is küiti magát a víz, melyek azelőtt soha fakadó vadvizet nem láttak volt. Az úgynevezett ártér-fejlesztést az egyes években tapasztalt legmagasabb vízálláshoz képest foganatosítják, tehát most olyan területeket is belevonnak az ártérbe, a melyek azelőtt teljesen vízmentesek voltak*” (Hunfalvy 1888). Idézhető lenne itt az idős Kossuth kései levelezése is, amely ugyancsak bírálatokat fogalmaz meg a Tisza-völgy árvízvédelmének alakulásával kapcsolatban (Hunfalvy 1888, Andor 2019). A szakma álláspontját jelentette meg Hieronimi Károly (Hieronimi 1888), aki a töltésezést mint egyedül lehetséges gazdaságos megoldást védi, szemben a tározással, és szemben egyéb, a valóságtól elrugaskodott javaslatokkal. A vita során felvetett kérdések továbbra is aktuálisak a klímaváltozással együtt várható szárazodás és a Tisza árvizeinek már megtapasztalt jelentős emelkedése miatt. A beavatkozásokkal kapcsolatban a szakma is megfogalmaz bizonyos önkritikát. A Tisza szabályozásáról írott Veritékes honfoglalás című monográfia előszava is tükrözi ezt: „*A nyugalmi helyzetéből másfél évszázada kibillentett természeti ingát századunk mérnökeinek most már az új helyzethez igazodva kell nyugalomban tartaniuk. Prózaibb módon kifejezve: ha egy vízfolyás életébe egyszer beleavatkozunk, akkor ettől kezdve nem lehet magára hagyni, mert különben állapota rosszabb lesz, mint korábban volt. Tehát a Tisza-szabályozással kialakított vízviszonyok fenntartása az árvíz- és belvízvédelmi rendszer folyamatos működtetését igényli. Szüksős erőforrásainkat ma a működőképesség biztosítására kell fordítanunk*” (Dunka 1996).

A Duna-völgyében is a XIX. században kezdődtek meg a nagyobb volumenű ármentesítési és szabályozási munkálatok, elsősorban a jeges árvizek kivédése érdekében. A korábbi védműépítési munkák után a Duna 1838-as árvízét követően indult meg Pest-Buda árvízvédelmének kialakítása, amely új elvek, egységes magassági kialakítás alapján volt hivatott a város, később a főváros védelmét biztosítani. A munkálatok az 1850-es években indultak meg, és az eredményük néhány évtizeden belül látványossá vált. Az 1876-os jeges árvíz kivédésével a rendszer igazolta megfelelő voltát. A folyó szabályozása az 1875-ös törvény alapján indult meg, amikor a jégmegállásra hajlamos mederszakaszok átformálása és a jég levonulásának biztosítására alkalmas mederszabályozó művek építése megkezdődött.

A Duna és a Tisza szabályozásán kívül a XIX. században számos egyéb vízfolyást rendeztek pl. a Berettyót, a Sebes Köröst, Kettős- és Hármasköröst.

Az 1863-as és az utána következő aszályos esztendő hatására a mezőgazdasági vízgazdálkodás (lecsapolások, belvízrendezés, öntözés stb.) is szükségszerű fejlődésen ment keresztül. A kultúrmérnöki intézmény megszervezése a halászat és a tógazdálkodás fejlődésére nagy hatással volt.

A vízépítés klasszikus korszaka jelentős munkálatokkal telt, és a magyarországi vízmérnöki tevékenység jelentős fellendülést hozta. A termelési mód és a táj átalakításának időszaka ez, nem véletlenül nevezik veritékes honfoglalásnak is. A természet átalakítása viszont számos olyan negatív következménnyel járt, amely napjainkig hat, sőt a szárazodás tekintetében épp napjainkban tűnik egyre komolyabb problémának.

A MODERN VÍZÉPÍTÉS KORSZAKA MAGYARORSZÁGON

A reformkor utóélete. Az Osztrák-Magyar Monarchia vízépítési eredményei

A modern vízépítés korának kezdete a bevezetőben adott definíció szerint az anyaghasználat változásában és a tudományosan megalapozott vízmérnökség megjelenésében ragadható meg. Az egyik kulcs-alapanyag a beton, illetve a vasbeton. A ma tömegmérétekben használt beton a XVIII. század végétől jelenik meg, és a XIX. század elején már felhasználására is sor kerül angol és francia területeken. A magyarországi vízépítési alkalmazására Mihalik János tervei alapján 1856-ban, a bezdáni zsilipnél kerül sor. A hajózás fejlődő igényeinek megfelelően a XX. század elejének legnagyobb vízépítési feladata a Ferenc-csatorna korszerűsítése és fejlesztése volt. A Ferenc-csatornát a Türr István kezdeményezésére létrejött társulat jelentős állami támogatással építette újjá és fejlesztette a baja-bezdáni tápcsatorna létrehozásával, valamint a 68 km hosszú Ferenc József-csatorna megépítésével.

Budapesten megépült a belvárosi Duna part támfal-rendszere, amely azóta is alapjaiban határozza meg a fővárosi árvízvédelmet és a városképet. A Tisza szabályozása miatt kellett foglalkozni műtárgyak építésével, átmenőtelepekkel. A korszakot kiugró technológiai fejlődéssel és a gyakorlati tapasztalatok alapján egyre tökéletesebb építési technológiával lehet jellemezni. Ez az az időszak, amikor az ármentesítés után a – sajnálatos, hogy nem egyszerre – az öntözés és belvízrendezés kérdése hatványozottan került napirendre.

A XIX. század végén olyan jelentős vízépítési létesítmények épültek, mint pl. a Gyulai duzzasztómű (1895-1896) vagy a Hortobágyi árvízkapu (1898-1899). Ebben az időben új, mesterséges víziút létesült a Hármaskörös csatornázásával, illetve a Bökényi vízlépcső építésével (1904–1907).

A vízerőhasznosítás területén jelentős fejlődés indult meg, megjelentek a Francis turbinás vízimalmok, amelyek már gyár hatását keltették az épületeik tömege és a vízenergia hatékony felhasználásával. E vízimalmok – jórészt igen lepusztult állapotban – még megtalálhatók és némelyikük az utóbbi időig működött, akár törpe vízerőműként is. Az elektromos energia iránti igény kielégítésére hamar megjelent az első vízerőmű is, amely a Rábán épült fel

Ikervár mellett. Ez a létesítmény a mai napig üzemel. Bár utóbb több példa is volt vízerőművek építésére, már a századfordulón (és azóta is) lemaradásban voltunk a vízerőhasznosításban számos nyugati országhoz viszonyítva. A század elején épült a Felsődobozai vízerőmű (1906), a Gibárti vízerőmű (1903).

A XIX. század a vízellátás és csatornázás fejlődésének nagy korszaka. A vízművek és vízelosztó rendszerek kialakítása, a szennyvízgyűjtés és tisztítás, valamint a járulékos iszapkezelés megoldása az 1800-as évek második harmadától gyorsult fel. E téren a nagyvárosok kialakulása volt jelentős hajtóerő.

Trianon után

Az ország területvesztését követően a vízgazdálkodás komoly kihívások elé került, hiszen a vízgazdálkodási egységként is működő Kárpát-medence felvízi és alvízi elhelyezkedésű államokra tagolódt, és Magyarország (a Szerb-Horvát-Szlovén királysághoz csatolt dél-alföldi területekhez hasonlóan) alvízi helyzetbe került. A világháborús jóvátétel is jelentős mértékben határolta be az ország fejlesztési lehetőségeit. A két világháború közötti időszakban előkerültek a vízépítési nagylétesítmények (csatornák, vízerőművek és duzzasztóművek) korábban előkészített tervei. A korszak vízügyi programjának kialakítása többek között Sajó Elemér munkájának köszönhető.

A magyar külkereskedelem levantei irányának fejlesztésére és általában a dunai hajózásban elfoglalt szerep erősítésére készült el a budapesti Kereskedelmi és Ipari Kikötő. Megvalósult a Soroksári Duna-ág rendezése. Ez a feladat a XIX. században megfogalmazott elvek szerinti Duna szabályozási munka befejeződésének tekinthető a főváros térségében. A Duna-ág északi és déli végén vízerőtelep és hajózsilip épült.

A távlati fejlesztések egyik rendszeres témája a Duna-Tisza csatorna, amely ebben az időszakban újból előkerült, és amelynek építése csak 1947-ben kezdődött meg. A munkálatok azonban 3 hónap után félbeszakadtak, így csak a Ráckevei-Duna-ágból délkeleti irányba induló csatorna első 10 km-es szakasza készült el, a mai napig nyitva hagyva a kérdést a csatorna szükségességéről.

Tovább folyt a munka a Sió csatornázásánál és a balatoni kikötők építése is folytatódott.

Ekkor készültek – a teljesség igénye nélkül – olyan jelentős vízépítési műtárgyak, mint a Kesznyéteni vízerőmű (1938-43), a Békésszentandrás vízlépcső (1936-1942) vagy a Nicki duzzasztómű (1930-32).

1943-ban kezdődtek meg a Sajó alsó, 40 km-es szakaszának folyócsatornázási munkálatai, míg a Körös vízrendszerének fejlesztésére az öntözésfejlesztés kapcsán került sor.

Ebben az időszakban hozták létre az Országos Öntözésügyi Hivatalt is, valamint jelentős belvízrendezések és lecsapolások történtek. A tervezett vízierőhasznosítások is nagyrészt a mezőgazdaság gépesítését, villamosítását voltak hivatottak szolgálni.

A szocializmus időszaka

A második világháború utáni időszakban a központi irányító szervek megszervezésekor került sor a vizitársulatok szigorúbb állami felügyelt alá vonására, és a vízügyi szolgálat központi szervének, az Országos Vízgazdálkodási Hivatalnak és az Országos Vízügyi Főigazgatóságnak a létrehozására. Ezek a szervezetek olyan, sokszor a háború előtti időszakban gyökerező, de a kor programjába illeszthető létesítmények kialakítását tették lehetővé, mint a Tiszalöki vízlépcső. Ebe a körbe tartozik az öntözés fejlesztése és ezzel párhuzamosan a belvízelvezetés biztosítása. A Nyugati-főcsatornát 1965. december 30-án helyezték üzembe. A főcsatorna hossza ekkor 43 km volt. Az 1950-es évek második felére készült el a tiszavasvári vízbeeresztő-hajózsilip (1953-58) és a Nyugati Főcsatorna tiszavasvári vízbeeresztő zsilipje (1954-56).

A XX. század második felében az árvízvédelemmel egyenrangúan kezelték a belvízrendezést és a belvízvédelmet. A mérnöki munkák egységes és tervszerű végrehajtása érdekében nagyobb hangsúlyt kapott a befogadók rendezése: a kisebb patakok, mellékágak rendezése, sok esetben voluntarista módon, mára az egyes területeken a természetes vízrendszer uniformizálódását eredményezve.

1973-ban átadták a Kiskörei vízerőművet, amely azóta is az ország legnagyobb vízerőműve. A vízlépcső építésének elsődleges célja a Tisza felduzzasztása és a Tisza-tó létrehozása volt, az áramtermelés mellékes szerepet játszott. A tó annak ellenére vált a magyar alföldi táj egyik meghatározó elemévé, hogy teljes kiépítésére nem került sor. Mégis, a jelen állapotában az Alföld vízjárta területeinek arculatát hozta vissza a tározó és egyebek mellett ezzel lett jelentős turisztikai látványosság.

Az időszak egyik jelentős hatású fejlesztése volt a nagy tavaink medrének kiépítése, amely a turisztikai hasznosításra nyitott lehetőséget. Nem kétséges ugyanakkor az eredmény kettős társadalmi megítélése. A tavak nagyobb tömeg fogadására lettek alkalmasak, de sokat veszítettek természetes állapotukból is, ezt a körülményt a Balaton vízminőségének kérdésével évtizedeken át együtt emlegették. A Balaton vízjárásával kapcsolatban számos vita folyt, mindenesetre a megoldást a Sió zsilipjének és a Sió medrének bővítésével, de legalábbis kapacitásának helyreállításával szükséges biztosítani. A zsilip bővítése napirenden van.

A Balaton vízminőségének védelmére a lecsapolási munkák során korábban megszüntetett Kis-Balaton visszaállítására folytak munkák, melyek körében szabályozó létesítmények, töltések létesültek.

Ugyancsak a világháborút megelőző időszakra nyúlik vissza a magyarországi Duna felső szakaszának lépcsőzésére vonatkozó terv is, amelyet Bős-Nagymaros vízlépcsőrendszerként ismert meg a közvélemény. Ez a beruházás jelentősen befolyásolta a szakma megítélését, ennek hatása a beruházás leállítását követően, harminc év után is eleven. Az a társadalmi támogatottság, amely korábban a vízügy és a vízépítés irányában létezett, az 1980-as évek végén megtört.

Vízgazdálkodási kihatással bírt a bauxit bányászat fejlesztése, amely révén a teljes Dunántúli karsztvízrendszerét érintő, és károsító technológia alkalmazására került sor. Az így megbillentett vízháztartás részleges helyreállása évtizedekkel a bányabezárások után következett csak be.

A XX. század második felének vízépítési szempontból legnagyobb fejlődésen átmenő területe a csatornázás és vízellátás volt. Míg a század első felében az ország lakosságának alig 20%-a részesült közműves vízellátásban, a század végére ez közelített a teljes ellátottsághoz. Számos regionális vízmű, törpe vízmű épült ki. A vízellátással párhuzamosan a csatornázás is folyamatosan fejlődött, azonban jelentősen elmaradt a vízvezeték hálózatok bővülésétől, és a szennyvíztisztítás is jelentős lemaradásban volt. A lemaradás a rendszerváltást követően csökkent.

NAPJAINK

A XX. század utolsó évtizedének, valamint a XXI. század első két évtizedének egyik legnagyobb eredménye a szennyvízcsatornázás fejlesztése és a szennyvíztisztítás arányának növelése, valamint a tisztítás hatékonyságának javítása volt. A szennyvízvezető hálózatba bekapcsolt lakások száma alapján az ország 79%-a csatornázott. A kilencvenes évek elejétől kezdve számos szennyvíztisztító telep épült, illetve került bővítésre. A közcatornán elvezetett szennyvizet csaknem teljes egészében megtisztítják, így a Duna (és a többi folyónk) vízminősége jelentősen javult. A Budapesten keletkező szennyvíz új főgyűjtő és új szennyvíztisztító létesítésével 2016-tól lényegében 100%-ban tisztításra kerül. A közüzemi ivóvíz-ellátottság az ország településeit tekintve már 2008-ban elérte a 100%-ot, míg a vízvezeték-hálózatba bekapcsolt lakások aránya 2015-ben már 95% volt. A szennyvíziszap és egyéb lebomló hulladékok feldolgozása és a biogáz termelésben történő hasznosítása jelentős mértékben nőtt, és ezzel a szennyvíztisztítás gazdaságossága is javulhatott.

Az elmúlt évszázad során épített nagylétesítmények kora indokolttá tette azok felújítását, korszerűsítését. Az elmúlt évtizedben megkezdődtek és folyamatosan haladnak a magyarországi vízépítési nagyműtárgyak felújításai, amelynek keretein belül többek között rekonstrukcióra kerül a Tiszalöki, a Kiskörei, a Dunakiliti vízlépcső, a Kvassay-zsilip, és a Sió zsilipje, amely a Balaton vízkészlet-szabályozásának kulcsa.

Napjainkban a Transzeurópai Közlekedési Hálózat részeként a dunai víziút közel két és félezer kilométer hosszban biztosítja a nemzetközi hajózást. A magyarországi szakasz, elhelyezkedésénél fogva nagyban kihat az áruforgalomra. A hazai szakaszon az egyre gyakoribb alacsony vízállású időszakok eredményeként a hajózható napok száma 250 alá csökkent, amely jelentős akadályt képez a dunai áruszállításban.

A XXI. században folyamatosak az árvízvédelmi fejlesztések is, amelyekre többek között a klímaváltozás és a tájhasználat okozta változások miatt van szükség. A 2000-es évek elejének Tisza-völgyi árvizei, valamint a Duna 2002-2013 közötti több rekordot is megdöntő árvizei a kérdést fókuszpontba helyezték. A védműfejlesztések és főleg a Tisza-völgy vízjárásának és árvízvédelmének felülvizsgálata kapcsán kialakított és tervezett árvíz-tározók építése

igen jelentős feladatot jelent. A folyami árvizek mellett egyre jelentősebb hangsúlyt kapnak a korábban a helyi vízkárokat kategóriájába sorolt hirtelen kialakuló árvizek és a csapadékvizek elégtelen elvezetése miatt kialakuló elöntések, valamint ezek megakadályozása, kezelése. A felmelegedés következtében a klímaváltozási projekciók szerint hazánkban a csapadékok egyre szélsőségesebb formában jelentkeznek, ami a rövid idő alatt lezúduló csapadékok intenzitásának és a csapadékmentes időszakok hosszának növekedését is jelenti.

A számítástechnika és elsősorban a nagy adattömegek feldolgozására irányuló technológiák, valamint az ugyancsak ezzel összefüggésben világszerte megindult mesterséges intelligencián alapuló eljárások várhatóan új korszak beköszöntét is jelentik. A modern kor technológiai újításai nem csak a tervezés és előrejelzés során jelennek meg. Az informatika fejlődése hatással van a kivitelezés hatékonyságának növelésére, a folyamatos és biztonságos üzemeltetésre és karbantartásra.

A vízépítési létesítmények esetében igen gyors a gépészet és az irányítástechnika fejlődése, de ezek sokszor csak egy nagyobb léptékű felújítás során kerülhetnek a már meglévő rendszerekbe, műtárgyakba. Ennek következtében sok vízépítési létesítmény vár jelentős felújításra, amely nem csak a szerkezeteket, hanem a gépészeti, elektromos és irányítástechnikai berendezéseket is érinti.

A vízépítés modern korszakának feladatai kiegészültek a vízellátás és szennyvíztisztítás jelentős feladataival, valamint a mezőgazdasági vízigények regionális léptékű kiszolgálását lehetővé tevő létesítmények kiépítésével.

MI LEHET A JÖVŐ VÍZÉPÍTÉSÉNEK FELADATA MAGYARORSZÁGON?

A szűken vett vízépítésben csapódnak le a teljes szakma építési feladatai. A vízépítés, mint az építéstechnológiák összessége, ideértve az anyagokat, az építőipari gépeket, a különféle segéd- és fő-szerkezeteket, az irányítástechnikai megoldásokat, egy folyamatosan fejlődő szakterület, amely mindig mutat újdonságokat. Ezek az újdonságok egyaránt alkalmazhatók a meglévő létesítmények felújítása és az új létesítmények létrehozása területén. A cél mindig az lesz, hogy a talajban áramló, az építményeket fenyegető, a víztartást biztosító, vagy épp a vizet elszívárogtató, a vizet vezető létesítmények bizonyuljanak gazdaságosnak a tervezett élettartamuk során, illetve annak végére.

A gazdaságosság egy adott létesítmény vonatkozásában a létesítés, fenntartás és üzemeltetés költségeinek optimalizálásán alapul. A szűken vett vízépítés fejlődése is e három elem fejlődése mentén valósulhat meg.

De mégis, mi minden épülhet még Magyarországon? A teljesség igénye nélkül az alábbi vízgazdálkodási feladatok sorolhatók fel.

A. Víz-tározás bővítése a klímaváltozás és az ezzel fenyegető szárazodás, és a nagyobb tömegben kihulló csapadék jelentette veszélyek elhárítása érdekében. A nagyobb intenzitású csapadék visszatartása és felszíni vagy talajban történő tározása kulcskérdés lesz.

- B. Az öntözés bővítése, az öntözhető területek növelése, a szükséges főművek tervezése, építése, vagy felújítása, amely évtizedek óta napirenden levő, de megoldatlan feladat.
- C. A településeket sújtó szélsőséges csapadékesemények kezelése a csapadékok lehető legnagyobb mértékű visszatartásával és a visszatartható mértéken felüli térfogat biztonságos elvezetésével. A jelenlegi helyzet ugyancsak évtizedes lemaradást mutat, amit egyszerre kellene behozni, ráadásul a víziközműrendszer sajnálatos szerkezeti válságával azonos időszakban.
- D. A hosszabb száraz időszakok a folyami áruszállítást lehetetlenítik el. A hosszabb kisvízes időszakok miatt újból előkerülhet a folyami hajózás feltételeinek javítása.
- E. A szennyvíztisztítás technológiai fejlődése az, amely a klímaváltozástól függetlenül óriási lehetőségek előtt áll. Ezek a lehetőségek a szennyvíziszap biogáztermelésen túli, ipari anyagok előállításától a legkülönbözőbb direkt energetikai felhasználásáig tartó technológiai fejlesztések körében találhatóak. Ez a fejlődés a biotechnológia víztudományban történő alkalmazásában rejlik, és amelyek vízépítési vonzatai megkerülhetetlenek lesznek.
- F. Természetvédelmi és élőhelyrekonstrukciós munkálatok a vízrendezés során túlszabályozott területek helyreállítása érdekében. Ahhoz, hogy ebben a folyamatban a vízépítő mérnökök megfelelő súllyal vehessenek részt, együttműködési készséggel kell magukat újra pozícionálni a társadalom előtt.

A fejlesztési feladatok megvalósulásához jelentős erőforrás bevonása szükséges. Kérdés, hogy az emberi erőforrás területén mennyiben állunk megfelelő helyen a feladatok ellátása érdekében. Van-e, lesz-e elegendő megfelelően képzett szakemberünk, akik ezeket a feladatokat magas színvonalon el tudják majd látni? Megfelelő mennyiségű erőforrást fordított, illetve fordít-e a nemzetgazdaság a vízépítéssel kapcsolatos kutatásba, fejlesztésbe? Van-e, lesz-e megfelelő fedezet a vízgazdálkodási létesítményeink fenntartására?

A Magyar Hidrológiai Társaság Vízépítési Szakosztálya e feladatok megvalósítási kérdéseire kínál fórumot, nyújt szakmai véleményt a tagjai szakmai előadásai révén.

A szakosztály munkáját nagyrendezvények, előadóülések, kerekasztal beszélgetések szervezésével, továbbá igény esetén alkalmi munkabizottságok létrehozásával végezte eddig is. Ezt a hagyományos tevékenységet a napjaink igényeihez alkalmazkodva kevesebb, de nagyobb szakmai merítésre alkalmas, jellemzően több szakosztály együttműködésével létrehozható rendezvények keretében igyekszik megvalósítani.

A szakosztály tagjainak száma 300 fő fölött stabilizálódott. A taglétszám alakulása a vízépítőipar, általában a magyar építőipar műszaki és társadalmi helyzetének jó fokmérője.

A nagyrendezvényeink programjában az elmúlt évtizedekben az épülő, vagy már kész nagyobb vízi létesítmények szerepeltek, így többek között a vízlépcsőrendszerek,

a Kis-Balaton védőrendszer, szennyvíztisztítók, partvédőművek, árapasztó tározók, víztározók, árvízvédelmi falak, vízerőművek stb. Több rendezvényünkkel egy-egy jelentősebb építkezés fejlődését, előrehaladását kísértük figyelemmel. Ilyen volt például a felső-dunai építkezés, az észak-pesti szennyvíztisztító telep építése, fejlesztése, a nagymarosi meder alatti közműalagút kialakítása, a budapesti Zsigmond téri és az angyalföldi szennyvízáttemelő korszerűsítése.

A Vízépítési Szakosztály a Társaság majd' minden szakosztályával együttműködik. A szakosztály feladatának tekintette a vízépítési emlékek megőrzését is. Szakosztályunk készítője volt a Lampl Hugó-díj szabályzatának, sokáig szervezője a pályázatok elbírálásával foglalkozó munkának.

Szakosztályunk tagjai számos kitüntetést kaptak, köztük a Magyar Hidrológiai Társaság legmagasabb kitüntetését, amely a Tiszteleti tag cím. A teljesség igénye nélkül a szakosztály Tiszteleti tagjai közül szeretnénk megemlíteni például Mosonyi Emilt (1990), aki a Magyar Hidrológiai Társaság egykori elnöke volt, és a Társaság a professzor születésének centenáriumának alkalmából a nevével fémjelzett különdíjat alapított. Az utóbbi évekből a szakosztály munkájában jelentős szerepet vállaló tagtársunk is kapott Tiszteleti Tag címet, így Bognár Győző 2006-ban, Hrehuss György 2016-ban és Ivicsics Ferenc 2018-ban.

A Magyar Hidrológiai Társaság Vízépítési Szakosztálya a Társaság tevékenységében és a magyarországi vízmérnöki és víztudományi fejlődésben erejének megfelelő szerepet kíván betölteni a jövőben is.

IRODALOM

Andor L. (2019). A 86 éves Kossuth Lajos a Tisza-szabályozásról. <https://ntf.hu/index.php/2019/09/17/a-86-eves-kossuth-lajos-a-tisza-szabalyozasrol/> [Hozzáférés dátuma: 2020. 02. 17.]

Anon (2015). Hogyan lett a zabolázatlan, magas vízállású Balatonból mesterségesen szabályozott tó? National Geographic. <https://ng.hu/termeszet/2015/09/14/a-sio-csatorna/> [Hozzáférés dátuma: 2020. 02. 07.]

Békés Megyei Múzeumok Közleményei (1985). 4. Rizstermesztés. http://epa.oszk.hu/01500/01577/00008/pdf/bmmk_1985_067-075.pdf [Hozzáférés dátuma: 2020. 02. 08.]

Bernáth P. (2007). A legendától a valóságig: a Csörszárók története. <https://mult-kor.hu/cikk.php?id=18364>, [Hozzáférés dátuma: 2020. 02. 07.]

Bernáth P. (dátum nélkül.). A dunai római flotta nyomában. <http://www.kriegsmarine.hu/hk/bp01102m.html> [Hozzáférés dátuma: 2020. 02. 07.]

Demeter G. (2017). Történeti kérdések földrajzi szempontból: mi az, amit másképp lát egy földrajzos? (A Trianonhoz vezető út regionális aspektusai). Történeti Földrajzi Közlemények, 3-4, pp. 22-36.

Dunka, F. V. (1996). Veritékes honfoglalás. A Tisza-szabályozás története. Budapest: Vízügyi Múzeum, Levéltár és Közgyűjtemény.

Hieronymi K. (1888). A Tiszaszabályozásáról. Budapesti Szemle, 138. szám, pp. 429-479.

http://real-j.mtak.hu/2335/1/BudapestiSzemle_1888_054.pdf

Hunfalvy J. (1888). Folyóink szabályozása. Budapesti Szemle, 138. szám, pp. 321-337.

http://real-j.mtak.hu/2335/1/BudapestiSzemle_1888_054.pdf

Károlyi Zs. (1960). A vízhasznosítás, vízépítés és vízgazdálkodás története Magyarországon. Budapesti Műszaki Egyetem Központi Könyvtára, Műszaki Tudománytörténeti Kiadványok 13. szám. Tankönyvkiadó, Budapest.

Katona O., Tóth A. (dátum nélk.). A Sió-csatorna története. <http://www.siocsatorna.hu/adatok/tortenet> [Hozzáférés dátuma: 2020. 02. 07.]

Matúz J. (1992). A magyarországi török hódoltság néhány főbb sajátosságáról. *Aetas*, 7. kötet, pp. 115-137.

Sanda I. D. (2015a). A modern szakképzés rendszerének kialakulása és professzionalizálódása a késő középkortól a XVIII. század végéig. In: Baska Gabriella és Hegedűs Judit (szerk.). Égi iskolák, földi műhelyek. Tanulmányok a 65 éves Németh András tiszteletére. Budapest: ELTE Pedagógiai és Pszichológiai Kar, pp. 46-60. ISBN 978-963-284-706-1. DOI: 10.184599/nasz.20159.1

Sanda I. D. (2015b). A szakképzés és a szakoktatás az ókorban. *Képzés és gyakorlat*, 13. évf. 1-2. szám. pp. 419-433. DOI:10.17165/TP.2015.1-2.30.

http://trainingandpractice.hu/sites/default/files/kepzes_es_gyakorlat/tanulmanyok/tp-2015-1_2-30-Sanda-tanulmany.pdf

A SZERZŐK



RÁCZ TIBOR 1991-ben okl. építőmérnökként végzett a BME Építőmérnöki Karán, vízépítőmérnöki szakirányon. 1991 és 2005 között tervezőként dolgozott mérnöki irodáknál és saját vállalkozásában. 2005-től 2019 végéig a Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. Ár- és Belvízvédelmi Osztályán dolgozott, 13 éven át annak vezetője volt. 2020-ban a RAMBOLL Studio Dreiseitl pekingi irodájában volt senior vízépítő mérnök. 2016-tól a Szent István Egyetem Környezettudományi Doktori Iskolájának hallgatója. A Magyar Hidrológiai Társaság Vízépítési Szakosztályának elnöke.



KISELY TAMÁS okleveles építőmérnök, okleveles mérnök-közgazdász. Tanulmányait a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karán magas- és mélyépítési szakirányon végezte, majd a Budapesti Corvinus Egyetem Gazdálkodástudományi Karán posztgraduális képzés keretében mérnök-közgazdász diplomát szerzett. 2005-től tervezőmérnökként dolgozott a Mélyépterv Kultúrmérnöki Kft.-nél és a Főmterv Zrt.-nél, míg 2015-től a Metaduo Kft. ügyvezetője. Kiemelten gyakorolt szakterülete a vízépítési műtárgyak tervezése, illetve azok rekonstrukciójának tervezése. 2011-től az MHT Vízépítési Szakosztályának titkára, 2016-ban a társaságért végzett munkájának elismeréseként Pro Aqua-émlékérmet kapott.

Elkészült az új hazai empirikus árvízszámítási segédlet: az OVF-2020

Koris Kálmán***

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. (koris@emk.bme.hu)

** VIZITERV Environ Kft., 1012 Budapest, Kuny Domokos u. 13-15.

Kivonat

Az árvízszámítás a műszaki hidrológia egyik legfontosabb fejezete. Hidrológiailag feltáratlan vízgyűjtőkön empirikus módszereket alkalmazunk. Ezek a módszerek az észlelt vízfolyások mért vízhozam adatain alapulnak, és a hidrológiai analógia alkalmazása révén használhatók olyan vízgyűjtőkre, amelyeken vízrajzi észlelés nem folyik. Az empirikus árvízszámítási eljárások a műszaki tervezések hidrológiai alapadatait adják meg, hidrológiailag feltáratlan hegy- és dombvidéki kisvízgyűjtőkön. A hazai Csermák, Kollár, Kovács-Takács, Markó stb. eljárások után az eddigi legszélesebb adatbázison alapuló eljárás az OVF-2001-es módszer volt. Az alábbi cikkünkben bemutatott árvízszámítási eljárás ennek elméleti háttérében és adatbázisában lényegesen bővített, illetve korszerűsített utódja az OVF-2020 segédlet. Az új segédlet 10-6000 km²-es nagyságú hegy- és dombvidéki vízgyűjtőterületekre alkalmazható. A 0-10 km² közötti vízgyűjtőkre egyedül a racionális módszer marad tapasztalati árvízszámítási eljárásként.

Kulcsszavak

Hegy- és dombvidéki kisvízgyűjtők, empirikus árvízszámítás.

The new Hungarian empirical flood calculation guide has been completed, the OVF-2020

Abstract

Flood calculation is one of the most important chapters in technical hydrology. Empirical methods are used in hydrologically unexplored river basins. These methods are based on measured water flow data from observed watercourses and can be used by applying a hydrological analogy to river basins where no hydrographic detection is taking place. Empirical flood calculation procedures provide basic hydrological data for engineering designs on hydrologically unexplored mountain and hilly catchments. After the procedures developed by the Hungarian Csermák, Kollár, Kovács-Takács, Markó, etc. the procedure based on the widest database to date was the OVF-2001 method. The new OVF-2020 guide is a significantly expanded and modernized successor of the flood calculation procedure is presented in this article giving and overview of its theoretical background and database. The new calculation guide can be applied to mountain and hilly river basins of 10-6000 km². For river basins between 0-10 km², only the rational method remains as an empirical flood calculation procedure.

Keywords

Mountain and hilly catchment areas, empirical flood calculation method.

BEVEZETÉS

1998-ban az OVF felkérte a Szerzőt, hogy vizsgálja meg az eddigi tapasztalati árvízszámítási eljárásokat, és ezen alapulva dolgozzon ki egy új eljárást. Egykori egyetemi oktatóként és kutatóként ugyanis jól ráérezett arra, hogy az addig összegyűlt adatokon alapulva – jelentősen meghaladva a régieket – egy új, korszerű eljárást lehet kifejleszteni. A munkában a szerző irányításával egy igen képzett hidrológus-vízrajzos csapat vett részt (Miskolc: Pataki László, Kovács Péter, Budapest: Szilágyi Attila, Győr: Kalmár István, Sütő László, Székesfehérvár: Antal Gábor, Pécs: Schubert József, Szombathely: Hamza István, dr. Szilágyi Endre), a számítógépi futtatásokat ifj. Goda László végezte. A munka végeredménye 2001-ben jelent meg, a segédlet az OVF-2001 nevet kapta. A vékony segédlet mellett egy többkötetes részletes feldolgozás gyűjtemény is készült, mely adatgyűjteményből, részletes statisztikai feldolgozásból, geográfiai paraméterek gyűjteményéből és a végeredmények összefoglalásából állt. A segédlet nyomtatott és elektronikus formában sok példányban készült, a részletes anyag csak néhány, már nehezen fellelhető kötetben. Az azóta eltelt csaknem 20 év a segédlet kiegészítését és megújítását sürgető igényként vetette fel. Az OVF a segédlet megújí-

tását kezdeményezte és támogatta. Az ezzel kapcsolatos kutató-fejlesztő munka a VIZITERV Environ Kft-ben indult, az árvízi kockázatkezelési projekt (ÁKK) keretében. A projektet Bálint Márton vízépítőmérnök irányította igen hatékonyan, amit a kutatás-fejlesztés gyors átfutása is mutat. A munka 2019-ben indult hidrológiai, térinformatikai, geográfiai paraméterek és adatok gyűjtésével. A hidrológus-vízrajzos csapat átalakult, az eltelt 20 év kényeszerű lepergése miatt, de most is a legkiválóbbak vettek benne részt (Miskolc: Kovács Péter, Budapest: Takács Zita, Győr: Kerék Gábor, Székesfehérvár: Simonics László, Pécs: Horváth Gábor, Szombathely: Somogyi Péter). Az új segédlet 2020. augusztus 31-ére elkészült, és az elődjének mintájára OVF-2020 nevet kapta. Ezt az árvízszámítási segédletet mutatjuk be az alábbiakban.

AZ ÚJ ÁRVÍZSZÁMÍTÁSI SEGÉDLET ELVI ALAPJAI

Az empirikus árvízszámítási eljárások legfontosabb hidrológiai törvénye az amerikai Myer-től származik, amiről *T. M. Cleemann* számolt be 1879-ben írt cikkében, mely szerint az árvízhozam vagy nagyvízhozam alapvetően a vízgyűjtő terület nagyságától függ, és az alábbi elvi összefüggést követi (*Cleemann 1879, Zsuffa 1968*):

$$Q_p = f(A^b), \quad (1)$$

ahol A – a vízgyűjtő terület nagysága, b – állandó ($b \leq 1$).

A segédlet – ezen elven alapulva – mint az empirikus módszerek, melyek nemzetközileg is általánosan elfogadottak, az alábbi fő módszertani elveket követi (Koris 2014).

- 1.) Alapvetően alkalmazza a vízgyűjtő nagyság *Myer-elvét*, amikor a nagyvízi jellemzők alapvetően és döntően a vízgyűjtő nagyságától függenek.
- 2.) A módszer tartalmazza az úgynevezett „*régió elvet*”, azaz a vizsgált teljes hazai hegy- és dombvidéki területegységet – a lefolyási sajátosságok eltérései miatt – kisebb régiókra bontja.
- 3.) Az eljárás felhasználja a „*geográfiai paraméterek elvét*”, megjelenítve azt a tényt, hogy az árvízi lefolyási viszonyokat a vízgyűjtő geográfiai jellemzői (vízgyűjtő alaki jellemzői, lejtésviszonyai, fedettség, geológiai- talajtani viszonyok stb.) alapvetően befolyásolják.

Az empirikus árvízszámítási segédletek az 1920-30-as években először csapadékadatokból indultak ki. E segédletek a csapadékmaximum függvények és a csapadék-lefolyás kapcsolatok alkalmazásával adták meg a mértékadó árvízhozam értékét. Az 1950-es évek elején Csermák Béla mért (és becsült) nagyvízhozam adatokat használt eljárásához, amely akkor úttörő módszernek számított (Kontur és társai 2003, Koris 2014). Nagy elméleti előlépést jelentett Kollár Ferenc eljárása az 1960-as években, mert a számításokat egy valószínűséghez kötött fajlagos árvízhozam meghatározásával végezte (Koris 2014). Ugyancsak fontos része volt módszerének, hogy bevezette az eljárásba a „*vízjárás hevességének*” fogalmát, melynek meghatározása a tervező, a segédletet alkalmazó szubjektív hidrológiai döntését és felelősségét igényelte. Az OVF-2001 segédlet (Országos Vízügyi Főigazgatóság 2001) adatokkal jelentősen bővített, elméleti statisztikai feldolgozásában korszerűbb utódja az alábbi OVF-2020 eljárás (Országos Vízügyi Főigazgatóság 2020a és 2020b). Mindezek miatt a segédlet megbízhatóságát nagymértékben sikerült növelni a hidrológiailag feltáratlan vízgyűjtőkre történő alkalmazás során.

A SEGÉDLET RENDELTETÉSE ÉS ALKALMAZÁSÁNAK FELTÉTELEI

Az árvízszámítási segédlet hidrológiailag feltáratlan magyarországi hegy- és dombvidéki kisvízgyűjtők vízfolyásai különböző előfordulási valószínűségű árvízhozamainak meghatározására használható. Az alkalmazható vízgyűjtő nagyságok: $A = 10 - 6000 \text{ km}^2$ között, úgy, hogy a határértékek is felvehetők. Nem alkalmazható a segédlet a hegy- és dombvidéki területeken belül a teljesen sík-, vagy belvízi öblözet jellegű részterületekre, kisesésű mesterséges csatornákra, vagy belvízcsatornákra.

Abban az esetben, ha a vízfolyás vizsgálni kívánt szelvényében vízmércéállomás van, és a vízmérce adatsora alapján az évi maximális vízhozamok valószínűségi eloszlásfüggvénye ismert vagy meghatározható, a vízfolyásszaksz hidrológiailag feltártnak tekintendő. Ebben az eset-

ben a különböző előfordulási valószínűségű árvízhozamokat – a nagyvízhozam adatok alapján – statisztikai módszerrel kell számítani. Ha nem a vizsgált szelvényben, de annak környezetében (ugyanazon a vízfolyáson) van vízmérce állomás, a nagyvízhozamok eloszlását ugyancsak statisztikai módszerrel lehet meghatározni. Ezt az eloszlást ezután transzformálni lehet a vizsgált szelvényre. Amennyiben a vizsgált vízgyűjtőterületre részletes hidrológiai tanulmány készült, és abban megalapozott nagyvízhozam eloszlás szerepel, akkor annak az adatait kell használni.

A segédlettel közvetlenül meghatározható a $p = 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20$ és 50% -os előfordulási valószínűségű, azaz a $T=200, 100, 50, 33^{1/3}, 20, 10, 5$ és 2 évenként átlagosan egyszer előforduló árvízhozam. A $p = 0,5\%$ -os valószínűségnél kisebb valószínűségű árvízhozam nem határozható meg a módszerrel. A $p = 0,5-50\%$ valószínűségi tartományban a megjelölt értékek között lineáris interpolálással tetszőleges valószínűségekhez tartozó árvízhozamok is meghatározhatók, míg az 50% -nál nagyobb esetben erre elvi lehetőség van.

AZ ÁRVÍZSZÁMÍTÁSI SEGÉDLET

A segédlet a hegy- és dombvidéki területeket hat régióra osztja fel, melyek Magyarország jól elkülönülő lefolyási régiói („*régió elv*”). Ezek az alábbiak:

- 1.) Észak-magyarországi lefolyási régió,
- 2.) Budapest-környéki lefolyási régió,
- 3.) Észak-dunántúli lefolyási régió,
- 4.) Közép-dunántúli lefolyási régió,
- 5.) Dél-dunántúli lefolyási régió,
- 6.) Nyugat-dunántúli lefolyási régió.

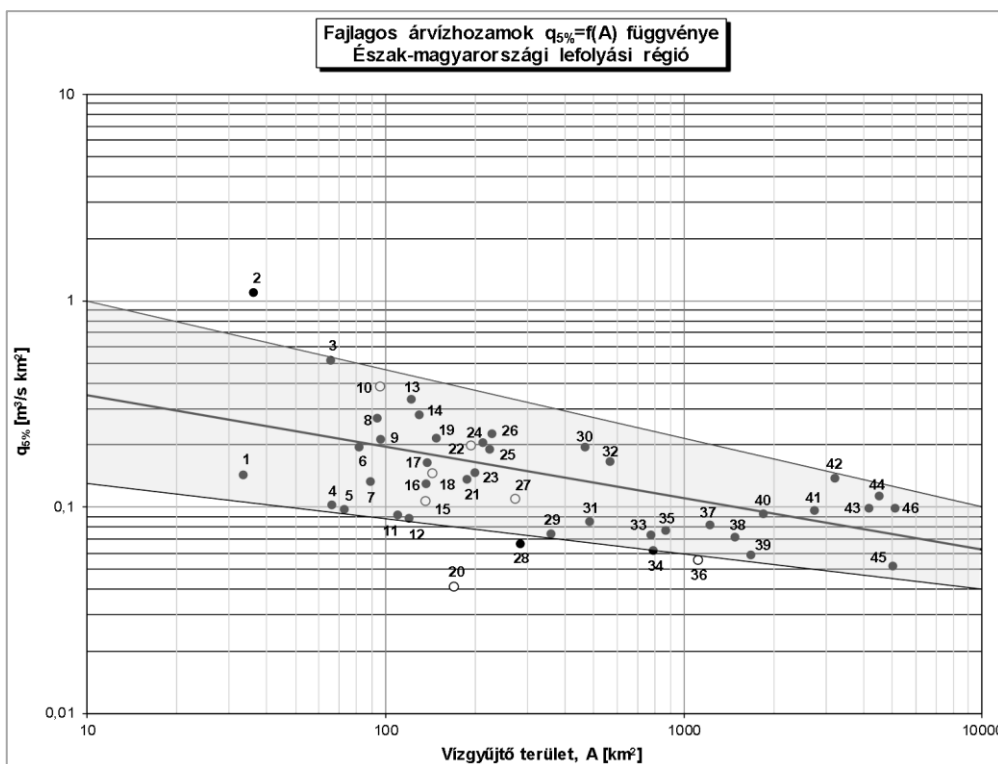
A régiók vízhálózati térképe alapján állapítható meg, hogy a vizsgált vízfolyás (vízgyűjtő) melyik régióban helyezkedik el, és ennek alapján lehet majd megválasztani az alkalmazott lefolyási függvényt.

A lefolyási régió kiválasztása után következik a $p = 5\%$ -os előfordulási valószínűségű, $q_{5\%}$ [$\text{m}^3/\text{s km}^2$] fajlagos árvízhozam meghatározása a vízgyűjtőterület nagyságának függvényében („*Myer-elv*”): $q_{5\%} = f(A)$. Ehhez a fenti összefüggést lefolyási régióként tartalmazó, megfelelő grafikon és azt, mint középértéket ölelő sávot kell használni. Az 1. ábrán példaképpen bemutatjuk az Észak-magyarországi lefolyási régióra vonatkozó függvényt.

Az összefüggések megadják az „átlagos” lefolyási viszonyokat kifejező vonalat, továbbá az azt körülölelő sávot. A felső tartományt „heves” lefolyási viszonyok között, míg az alsót „nyugodt (kiegyenlített)” vízjárás esetén kell használni (Koris 2000a, Koris 2014). A teljes sáv tartományon belül a hidrológiai viszonyok mérlegelésével kell értékeket felvenni. Alkalmazható a sáv tartományon kívüli érték is. Az 1. ábrán a sorszámozott pontok a segédlet kidolgozásánál figyelembe vett vízgyűjtőket jelentik.

A lefolyási viszonyok elemzéséhez a vízgyűjtők geográfiai és fedettségi adatai, valamint egyéb, a lefolyás jellegét befolyásoló paraméterek szükségesek („*geográfiai paraméterek elve*”). A geográfiai paraméterek nagy segítséget nyújtanak a lefolyási viszonyok jellegének megállapításához (Koris 2000a, Országos Vízügyi Főigazgatóság

2020a). Régióként az abban szereplő vízgyűjtők geográfiai paramétereit meghatároztuk (a számításokat Filutás István végezte). Mintaképpen az alábbi 1. táblázat részmutatja a konkrét értékeket.



1. ábra. A $q_{5\%} = f(A)$ függvény
Figure 1. The $q_{5\%} = f(A)$ function

1. táblázat. Vízgyűjtők geográfiai paramétereit (részlet)
Table 1. Geographical parameters of catchment areas (detail)

S.	Vízfolyás-Vízmerce	Vízgyűjtő terület A (km ²)	Erdő-terület E (km ²)	Fővölgy hossza L (km)	Min. terep (m B.f.)	Max. terep (m B.f.)	Fővölgy átl. esés S (-)	Ősszegy. idő τ (óra)	Vízgy. hossz N (km)	Vízgy. szélesség M (km)	N/M
1.	Garadna-Újmassa	33,6	33,61	7,2	291,16	945,64	0,091	0,49	12,31	5,95	2,07
2.	Kövicses-Hasznos	36,4	30,51	12,6	199,26	943,66	0,059	1,81	12,53	6,39	1,96
3.	Kemence-Bernecebaráti	65,6	57,32	23,8	156,86	936,39	0,033	6,40	13,11	9,48	1,38
4.	Rakaca-Krasznokvajda	66,7	21,69	11,8	200,68	327,50	0,011	2,71	10,70	8,91	1,20
5.	Tarján-Kisterenye	73,2	38,01	18,9	191,94	645,00	0,024	4,51	15,84	8,44	1,88

(A paraméterek pontos definícióját a segédlet részletesen megadja.)

A segédlet általános iránymutatást ad a geográfiai paraméterek és a lefolyási jelleg kapcsolatáról. A paraméterek felhasználása adja az egyik módszerét a lefolyási viszonyok jellemzésének.

A vizsgált vízgyűjtő paramétereit a segédlet alkalmazhatóságának, azaz a hidrológiai analógia fennállásának, igen fontos tényezői. (A hidrológiai analógiát a vizsgált, vízrajzilag feltáratlan vízgyűjtő és a felhasznált bázisvízgyűjtők között értelmezzük.) Ha ugyanis a vizsgált vízgyűjtő paramétereit a bázisvízgyűjtők értékeivel összehangban vannak, a hidrológiai analógiát meglévőnek tekintjük, és a segédlet mindenképpen alkalmazható. (Természetesen a segédletek akkor is alkalmazhatók, ha a vizsgált vízgyűjtő egyes paramétereit a táblázatos értékeken kívül esnek, de ekkor a lefolyási viszonyokat több oldalról kell elemezni.) Ugyanakkor a vizsgált vízgyűjtőre kiszámított paraméterek és a bázisvízgyűjtők hasonló értékeinek összevetése alapján a hidrológiai-lefolyási viszonyok minősíthetők, azaz eldönthető, hogy a vizsgált vízgyűjtőn a lefolyási viszonyok hevesek, átlagosak, vagy nyugodtak (kiegyenlítettek).

A lefolyási viszonyok meghatározásának, minősítésének másik legfontosabb módszere a helyszíni bejárás és az abból levonható következtetések.

A lefolyási viszonyok fentiek szerinti elemzése után a $q_{5\%}$ -fajlagos árvízhozam a segédlet grafikonjai segítségével felvehető.

A $q_{5\%}$ ismeretében a p [%]-os előfordulási valószínűségű árvízhozam:

$$Q_{p\%} = a_i \cdot q_{5\%} \cdot A \tag{2}$$

képlettel számítandó, ahol: $Q_{p\%}$ [m³/s] – a p [%] valószínűségű árvízhozam, a_i – dimenzió nélküli szorzó, definiálása és értéke az alábbi táblázatban található, $q_{5\%}$ [m³/s km²] – a grafikonokról meghatározott fajlagos árvízhozam, A [km²] – a vizsgált vízgyűjtőterület nagysága.

A valószínűségi szorzók táblázata (2. táblázat) példaképpen az Észak-magyarországi lefolyási régióra az alábbi.

2. táblázat. Az a_i valószínűségi szorzók
Table 2. The a_i probability multipliers

S.	Valószínűségi szorzók	$a_i = NQ_i\%/NQ_5\% [-]$							
		$a_{0,5}$	a_1	a_2	a_3	a_5	a_{10}	a_{20}	a_{50}
1.	Észak-magyarországi lefolyási régió	1,95	1,63	1,34	1,19	1,00	0,77	0,55	0,27
2.	Budapest-környéki lefolyási régió	2,00	1,65	1,35	1,19	1,00	0,77	0,55	0,26
3.	Észak-dunántúli lefolyási régió	2,26	1,77	1,40	1,21	1,00	0,76	0,54	0,28
4.	Közép-dunántúli lefolyási régió	1,82	1,54	1,30	1,16	1,00	0,79	0,60	0,35
5.	Dél-dunántúli lefolyási régió	1,81	1,54	1,29	1,17	1,00	0,80	0,60	0,34
6.	Nyugat-dunántúli lefolyási régió	1,80	1,54	1,30	1,17	1,00	0,79	0,58	0,31

A SEGÉDLET ADATBÁZISA ÉS FELÉPÍTÉSÉNEK ELMÉLETI HÁTTERE

Az új OVF-2020-as empirikus árvízszámítási eljárás adatbázisában és a korszerű statisztikai szemléletében nyújt többet a korábbi eljárásoknál (*Országos Vízügyi Főigazgatóság 2020a és 2020b*).

Az első mért nagyvízhozam adatokra alapozott eljárás a Csermák-féle módszer volt. Csermák Béla eljárásához egyrészt az akkor észlelt kisszámú vízfolyás árvízhozam adatát használta fel, továbbá a területi hidrológusok, mérnökök által több mint 200 vízfolyásra becsült vagy számított (tehát nem észlelt) vízhozam adatát is figyelembe vette (*Zsuffa 1968*). Kollár F. módszere (*Kontur és társai 2003*), amely elméleti alapjaiban a mai napig korszerű eljárás, kizárólag mért nagyvízhozam adatokat használt fel, becsült adatokat nem, így a módszer adatbázisa az előzőnél szűkebb (pontos ismeretünk a felhasznált adatokról azonban nincsenek).

Ugyancsak ismeretlen a Kovács-Takács eljárás, valamint a Markó-féle módszer adatbázisa (*Kontur és társai 2003*).

Az OVF-2001-es módszer adatbázisáról pontos adataink vannak (3. táblázat).

3. táblázat. A segédlet adatbázisai
Table 3. Databases of the calculation guides

S.	Lefolyási régió	Vízgyűjtő (2001)	NQ adat (2001)	Vízgyűjtő (2020)	NQ adat (2020)
1.	Észak-magyarországi	25	1360	46	1870
2.	Budapest-környéki	12	571	13	1605
3.	Észak-dunántúli	14	710	27	1198
4.	Közép-dunántúli	33	1614	57	2409
5.	Dél-dunántúli	16	838	29	2214
6.	Nyugat-dunántúli	21	1278	38	1471
	Összesen	121	6371	210	10767

A táblázat az OVF-2020-as segédlet adatbázisának adatait is feltünteti. A felhasznált csaknem kétszer annyi vízgyűjtő, és a több mint másfélszer annyi nagyvízhozam adat önmagáért beszél (*Országos Vízügyi Főigazgatóság 2020*). Már a korábbi OVF-2001-es segédlet – széles adatbázisa miatt is – sokkal megbízhatóbb volt a megelőző empirikus módszerekénél, de az OVF-2020-as eljárás ennél is csaknem „kétszer” megbízhatóbb.

A korábbi OVF-2001-es segédlet kidolgozása során minden állomásra elvégezték a nagyvízhozam adatsorok komplett statisztikai vizsgálatát. Vizsgálták a reprezentatív

minta függetlenségét és homogenitását, majd folytonos elméleti eloszlásfüggvények valamelyikét (normál, lognormál, Gumbel, Fréchet, Todorovics, gamma-3) illesztették az empirikus mintákhoz (a számítógépi futtatásokat ifj. Goda László végezte). Ezek a folytonos eloszlásfüggvények szolgálták alapul a segédletek elkészítéséhez (*Koris 2000a és 2000b*).

Az OVF-2020-as módszer az adatsorok statisztikai feldolgozása során az előzőnél korszerűbb eszközökkel dolgozott (*Országos Vízügyi Főigazgatóság 2020a és 2000b*). A statisztikai vizsgálatok első lépései (függetlenség, egyöntetűség vizsgálatok) ugyanazok voltak. A kisvízfolyások vízjárásának modellezésére viszont a Poisson folyamatot alkalmazták (*Zsuffa 1968, Koris 2000b*). A modell alapja a küszöbszint feletti mintavételezés, amely a vízhozam idősort a fenti sztochasztikus folyamattal jól megközelíthetővé tette. A Poisson folyamat három fontos eloszlása a modellezett vízhozamidősort három fő jellemzőjéhez köthető (*Koris 2014*). Az időegység alatt érkező árhullámok száma Poisson eloszlású, az árhullámok követési időközei exponenciális eloszlásúak, és a legfontosabbak a Q_0 -küszöbszint feletti árhullámcsúcsok, melyek standard exponenciális eloszlásfüggvényt követnek. (A meteorológiában és a hidrológiában igen ritka, hogy a vizsgált valószínűségi változó eloszlása levezethető. A maximális vízhozamok e ritka kivételek közé tartoznak.) A kisvízfolyások vízgyűjtő nagyság szerinti alsó tartományában a nagyvízhozamok exponenciális eloszlása csaknem minden esetben igazolható az empirikus eloszlásfüggvénnyel. Pontosabban az exponenciális eloszlás család valamelyik eloszlásával (exponenciális, Gumbel, Fréchet, Pareto II., Todorovics), tekintettel a vízjárás modellezés közelítő voltára. A vízgyűjtő nagyság szerinti felső tartományban a nagyvízfolyások árvízhozamainak eloszlására levezethető normál eloszlás inkább jellemző (pontosabban a normál eloszlás család: normál, lognormál eloszlások). A középső vízgyűjtőnagyság tartományban az exponenciális- és normál család eloszlásai vegyesen fordulhatnak elő az illeszkedések vizsgálatánál. Néhány ritka esetben az empirikus eloszlás folytonos görbévé simítását lehetett csak elvégezni, így az empirikus eloszlásfüggvényt analitikusan leírhatóvá tenni (gamma-3 eloszlásfüggvény alkalmazásával). A figyelembe vett vízmércék esetén - elsősorban a legfelső valószínűségi tartományban legjobban illeszkedő - eloszlásfüggvények lefolyási régiók szerinti megoszlását az alábbi 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat. Az eloszlásfüggvény típusok megoszlása
Table 4. Division of distribution function types

S.	Lefolyási régió	Exponenciális eloszlás család	Normál eloszlás család	Egyéb simuló eloszlás	Összes eloszlás
1.	É-magyarország	30	12	4	46
2.	Budapest-körmeyéki	11	2	0	13
3.	É-dunántúli	20	6	1	27
4.	Közép-dunántúli	36	21	0	57
5.	D-dunántúli	18	10	1	29
6.	Ny-dunántúli	22	11	5	38
	Összesen	137	62	11	210

A táblázatból látható, hogy a vízfolyásoknak több mint a fele jól modellezhető a Poisson folyamattal. Valamivel kevesebb, mint az egyharmaduk nagyvízhozamainak eloszlása a nagyobb folyók eloszlástípusát követi. A kétféle típus egyikével sem (és más típussal sem) követhető a vízfolyások elenyésző 5 százaléka.

ÖSSZEHASONLÍTÓ MEGÁLLAPÍTÁSOK

Kézenfekvő módon kínálkozik az OVF-2001 és 2020-as módszerek összehasonlítása. Ebből hidrológiai hasznot remélünk. A felhasznált adatbázisok összehasonlítását, és az ebből nyert információ többletet az előzőekben részleteztük. Ugyancsak leírtuk a felhasznált statisztikai fegyvertár különbségeit is, a nyilvánvalóan változatlan módszerek mellett. Mit mutatnak a legfontosabb végeredmények, a q_{5%}-os fajlagos vízhozamok grafikonjai? Az alábbi 2. ábrán a Közép-dunántúli lefolyási régió vonatkozó régi és új segédletét mutatjuk be. (A két részre koordinátái közel azonos léptékűek.)

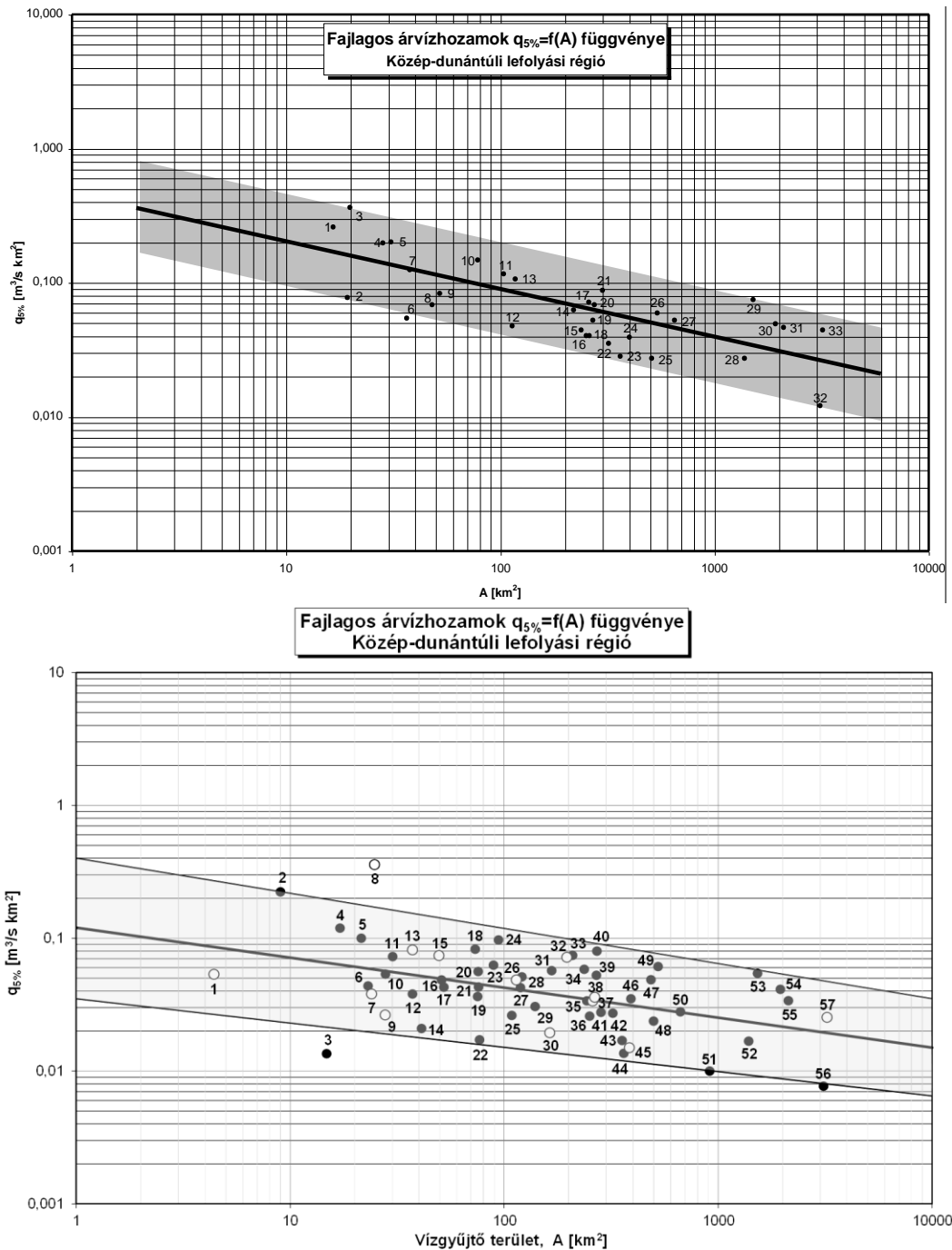
A két ábrarész összehasonlításából látszik, hogy az új segédlet fajlagos vízhozam értékei a teljes vízgyűjtő területi tartományban kisebb értékeket mutatnak. Ez az átlagos értékek és a szélsőértékek vonalaira egyaránt igaz. Az is látszik, hogy az új segédlet szélső vonalai közötti tartomány szélesebb, és a nagyobb vízgyűjtőterületek tartománya felé szűkül. Ezek a jellegzetességek valamennyi lefolyási régióra fennállnak. Mindenesetre a legfontosabb tendencia a fajlagos árvízhozamok generálisan csökkenő volta. Ennek feltételezhetően oka a kétszeresére bővült adatanyag, de oka lehet a lefolyási viszonyok húszéves időtávlatban mutatkozó változása, valamint más egyéb tényezők is. Azt azonban nem lehet megállapítani, hogy a húsz év alatt bekövetkezett adatbázis növekedés, vagy a lefolyási viszonyok változása a domináns-e, esetleg a kettő együtt van hatással e jelenségre. Ez utóbbi látszik biztosnak. Ez tömören összefoglalva azt jelenti, hogy az árvízi viszonyok értékei a hazai hegy- és dombvidéki vízgyűjtőkön – globális területi vonatkozásban – a múlthoz képest csökkenő tendenciát mutatnak. Ez a tendencia az antropogén hatások együttese miatt alakult így, és ellentmond sok ellentétes véleménynek.

ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünk az OVF-2020 elnevezésű új magyarországi árvízszámítási segédlettel foglalkozik. A szakajtóban először a Hidrológiai Közlemben ismerteti a Szerző a hazai hegy- és dombvidéki vízgyűjtőkre érvényes empirikus árvízszámítási módszert. Az eljárás a 2000-es évek elején készült OVF-2001 nevű módszer adatbázisában lényegesen bővebb, és elméleti háttérben korszerűbb változata. Alkalmazza az empirikus árvízszámítások legfontosabb alapelveit, a vízgyűjtőnagyságtól függés „Myer-elvét”, a „régiók-elvét”, és a „geográfiai paraméterek alkalmazásának” elvét. A segédletekkel az A=10-6000 km² nagyságú vízgyűjtők különböző valószínűségű árvízhozamai határozhatók meg, hidrológiailag feltáratlan területekre. Az új árvízszámítási segédlet megadja a tervezéshez szükséges mértékadó árvízhozamot vagy árvízhozamokat, a vízgyűjtőterület nagyságának és a lefolyási viszonyok jellegének függvényében. Ez utóbbi megállapításához iránymutatást ad segédlet, de tervezői felelős döntés is szükséges annak megállapításához. Az új segédlet történelmi kategóriába helyezi a korábbi hasonló célú eljárásokat.

IRODALOMJEGYZÉK

- Cleemann, T. M (1879). Proper Amount of Water-Way for Culverts. Proceedings of Engineers' Club of Philadelphia, Vol. 1., pp. 146-149.
- Kontur I., Koris K., Winter J. (2003). Hidrológiai számítások. Linográf Kiadó, pp. 427-468.
- Koris K. (2014). Hidrológia II. Műszaki hidrológia. Budapest, pp. 57-81.
- Koris K. (2000a). Árvízi adatgyűjtemény. (Magyarország kisvízfolyásainak árvizei és azok statisztikai feldolgozása az észlelések kezdetétől 2000-ig.), Kézirat. Edinex Consulting Műszaki Tanácsadó, pp. 1-276.
- Koris K. (2000b). A dombvidéki vízrendezés hidrológiájának fejlesztése. (A nagyvízhozamok új számítási módszerének kidolgozása.), Kézirat. Edinex Consulting Műszaki Tanácsadó, pp. 1-142.
- Országos Vízügyi Főigazgatóság (2001). Árvízszámítási segédlet. A hazai hegy- és dombvidéki kisvízgyűjtők árvízhozamainak meghatározásához. Budapest, pp. 1-22.
- Országos Vízügyi Főigazgatóság (2020a). Magyarország hegy- és dombvidéki kisvízfolyásainak árvízszámítási segédlete. (Összeállította: Koris Kálmán). Budapest, pp. 1-32.
- Országos Vízügyi Főigazgatóság (2020b). Magyarország kisvízfolyásainak árvizei. (Összeállította: Koris Kálmán). Kézirat, szerkesztés alatt. Budapest, pp. 1-579.
- Zsuffa I. (1968). Vízfolyások árvízhozamának számítása. Vízügyi szakmai irodalmi beszámoló. 13. VITUKI, Vízügyi Műszaki Tájékoztató Iroda. Budapest, pp. 1-245.



2. ábra. A korábbi (felső) és az új (alsó) $q_{5\%}=f(A)$ függvény
Figure 2. The previous (upper) and the new (lower) $q_{5\%}=f(A)$ function

A SZERZŐ



KORIS KÁLMÁN 1969-ben védte meg diplomáját a BME-n, és ugyanazon év augusztus 1-től kezdett dolgozni az akkori Vízgazdálkodási Tanszéken, ahol a mai napig oktat. 1972-ben megszerezte második diplomáját matematika-számítástechnika szakon. 1975-ben műszaki doktori címet (dr. techn.) szerzett, témája: Kisvízgyűjtő területek lefolyási viszonyainak vizsgálata. Vendégoktató volt az egykori Ybl Miklós Műszaki Főiskolán, a Bajai Vízügyi Főiskolán, az ELTE TTK Hidrológus szakán. Több tucat hazai és külföldi szakcikk és tanulmány szerzője, az egyetemen számos nappali és szakmérnöki jegyzetet, szakkönyvet írt. 1993-ben jelent meg szerkesztésében a munkatársaival írt egyetemi tankönyve az Akadémia Kiadónál, amelyet szakmai zsargonban „KOKOWIN” néven említenek. A „Hidrológiai számítások” harmadik, bővített kiadása 2003-ban látott napvilágot. 1970-ben, 1974-ben és 2006-ban „Árvízvédelemért érdemérem” kitüntetését kapott. 2014-től címzetes egyetemi docens a BME-n. 2019-ben az OVF Vízügyi Tudományos Tanácsának tagjává nevezték ki. A Hidrológiai Közlemény szerkesztőbizottságának tagja.

A Wisnovszky-féle összefüggés felülvizsgálata hazai vízgyűjtőkön mért összegyülekezési idők és számos morfológiai jellemző vizsgálatával

Nagy Eszter Dóra* és Szilágyi József*

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék
(nagy.eszter@emk.bme.hu és szilagyij.jozsef@emk.bme.hu)

Kivonat

A vízgyűjtők csapadékra adott válaszüzejének számítására mai napig nem dolgoztak ki egységesen alkalmazható módszertant. A mért idősorokból történő meghatározás átfogó vizsgálatának céljából 61 vízgyűjtőre határoztuk meg 8 különböző grafikus definíció alapján az összegyülekezési idő értékét. A vízgyűjtőnként átlagosan 35 eseményt tartalmazó adathalmaz jó alapot szolgáltatott már létező empirikus összefüggések becslési pontosságának vizsgálatára. 47 morfológiai paraméter közül lineáris korreláció számításával és főkomponens analízis segítségével azonosítottunk 4-4 paramétert, melyek alkalmasak egy új összefüggés kalibrálására. Az összes lehetséges paraméterkombináció vizsgálatán keresztül elvégeztük az eredmények átfogó összehasonlítását. Kimutattuk, hogy sem a lineáris korreláció vizsgálat, sem a főkomponens analízis nem vezet az optimális paraméterkombináció azonosításához, illetve megállapítható volt, hogy a leggyakrabban alkalmazott Wisnovszky-féle összefüggés hibája több mint felére csökkenthető a megfelelő morfológiai paraméterek alkalmazásával. Fontos hozadéka a végzett vizsgálatoknak továbbá, hogy az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) re-analízis adatbázisából származó csapadékidősorok megfelelőnek bizonyultak ilyen típusú vizsgálatok végzéséhez. Ennek köszönhetően több mint 60%-kal nagyobb a vizsgált vízgyűjtők és események halmaza, ami a végzett vizsgálatok reprezentativitását nagyban növeli.

Kulcsszavak

Összegyülekezési idő, Wisnovszky, főkomponens analízis, vízgyűjtő-morfológia, csapadék, lefolyás.

Revision of Wisnovszky's equation by a comprehensive analysis of measured time of concentration and catchment morphological parameter values

Abstract

The estimation of watershed response time has no solid methodology up to date. This study compared 8 graphical definitions for the time of concentration for 61 catchments in Hungary. On average, 35 events per watershed were employed to assess the uncertainty of existing and new empirical equations. Based on the results of linear correlation and principal component analyses (LCA and PCA), 4 out of 47 geomorphological parameters were identified for a new empirical equation. Testing all possible parameter combinations led to a comprehensive analysis of the different parameter sets. Based on the results, neither LCA nor PCA leads to the optimal parameter set, though the estimation error of the most often used Wisnovszky equation can be halved using adequate parameters. Another significant outcome of the study is that precipitation time-series from the ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) re-analysis database proved to be practicable to estimate time parameters. Application of the ECMWF data increased the sample size by more than 60%, therefore enhanced the representativeness of the results.

Keywords

Time of concentration, time to equilibrium, Wisnovszky, principal component analysis, morphometric parameters, rainfall, runoff.

BEVEZETÉS

A Wisnovszky-féle összefüggés (Wisnovszky 1958) a leggyakrabban alkalmazott módszer az összegyülekezési idő számítására. Annak ellenére, hogy a módszert több mint 60 éve dolgozta ki Wisnovszky Iván, az összefüggés alkalmazhatóságának vizsgálata a mai napig nem történt meg. A tapasztalat azt mutatja, hogy a változó klíma hatására a szélsőséges csapadékinzintások egyre gyakoribbá válnak (Mattányi és társai 2015). Emellett – amennyiben több évtizedes távlatban gondolkodunk – a vízgyűjtők jellemzői is változhattak, leginkább a vízfolyáshálózat hidraulikai jellemzői és a területhasználat tekintetében. A változó körülmények pedig változó lefolyást eredményeznek. Mindenképp felmerül tehát a kérdés, hogy egy több mint fél évszázada kidolgozott összefüggés vajon megfelelően pontos értékeket szolgáltat-e napjainkban? Emellett felvetődik a technikai fejlődés által adódó előnyök kiaknázatlansága is, hiszen manapság lényegesen szélesebb eszköztár, hosszabb és részletesebb mért idősorok és nagyobb

számítási kapacitás áll rendelkezésre a már egyébként régóta ismert hidrológiai problémák megoldására. Az összegyülekezési idő tekintetében kifejezetten összetett problémáról van szó, mivel a mai napig definíció szintű problémákkal küzd a nemzetközi szakma is (Beven 2020). A paraméter alkalmazása is széleskörű. Mértékadó vízhozam és árhullám számításnál, valamint csapadék-lefolyás modellezésnél is fontos szerepet tölt be (Torma és társai 2014). Az összegyülekezési idő a racionális módszer esetén az alkalmazandó csapadékinzintást determinálja a csapadékmaximum függvényen keresztül. Hosszabb összegyülekezési időhöz kisebb intenzitás tartozik, ami a mértékadó vízhozam alulbecsüléséhez vezethet. Mértékadó árhullám számításánál az árhullám időalapját szolgáltatja az összegyülekezési idő értéke, ebből adódóan annak alulbecsülése alul-méretezéshez vezethet. Csapadék-lefolyás modellezés tekintetében az összegyülekezési idő alulbecsülése a biztonság javára történik, hiszen a rövidebb válaszidő gyorsabban, nagyobb tetőző vízhozammal levo-

nuló árhullámokat eredményez a valósághoz képest. Belátható tehát, hogy az összegyülekezési idő értékének pontos becslése szükségszerű és nagy haszonnal bírhat a tervezőmérnökök számára is. Ez motiválta, hogy szülessen egy átfogó tanulmány a témában, és hazai viszonylatban is képet kapjunk az összegyülekezési idő becslésének pontosságáról. Ahogy *Zsuffa (1996)* is írja „Ma...is csak annyit mondhatunk, hogy a τ összegyülekezési időt megbízható módon kizárólag a vízgyűjtőn szimultán működő csapadék és vízállásirók által regisztrált záporcsapadékok és árhullámok adataiból lehet meghatározni.” Jelen cikkben bemutatjuk hazai vízgyűjtők esetén a grafikus definíciók közötti különbségeket, illetve számszerűsítjük a Wisnovszky-képlet és más empirikus összefüggések megfelelőségét az összegyülekezési idő becslésére. Továbbá számos morfológiai paraméter közül azonosítottuk azokat, amelyek egy új és pontosabb empirikus módszer kidolgozásához alapul vehetők.

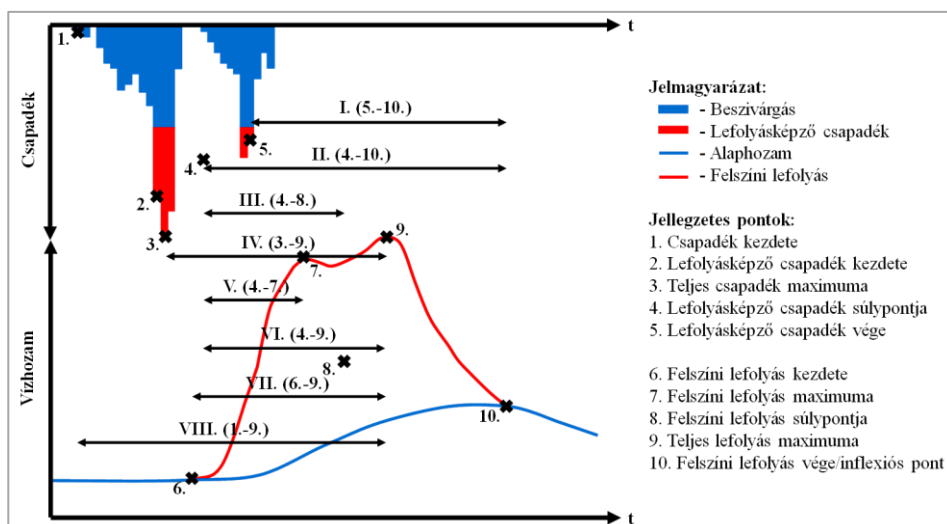
ELMÉLETI ÁTTEKINTÉS

A nemzetközi és hazai szakirodalomban leggyakrabban tárgyalt, vízgyűjtők válaszüdejét jellemző paraméterek az összegyülekezési idő (*Time of Concentration*), késleltetési idő (*Lag Time*), tetőzésig eltelt idő (*Time to Peak*) és az egyensúly beálltaig eltelt idő (*Time To Equilibrium*). Utóbbi a hazai szaknyelvben nem meghonosodott kifejezés, annak ellenére, hogy valójában az egyensúly beállta-hoz köthető időt alkalmazzuk a vízgyűjtő karakterisztika módszerénél is, tehát egyensúly alatt a vízgyűjtő vízszállításának állandósulását értjük. A közelmúltban *Beven (2020)* világított rá arra a problémára, hogy az összegyülekezési idő (nemzetközi szószedetben is szereplő) definíciója, miszerint az egyenlő a leghosszabb hidraulikai úthossz megtételéhez szükséges idővel egy adott vízgyűjtőn, bírálandó. Felvetette, hogy a vízgyűjtők válaszüdejét hidraulikai szempontból érdemesebb az árhullámok terjedési sebessége alapján jellemezni és nem egy vízrézecske sebessége alapján. Előbbi megközelítés köthető az egyensúly beállta-hoz szükséges időhöz, utóbbi takarja az összegyülekezési idő hagyományos definícióját. A nemzetközi és hazai szakirodalom jellemzően összemosza a két fogalmat, annak ellenére, hogy a különbségre már az 1960-as években rámutattak (*Laurenson 1964*).

A vízgyűjtők válaszüdejét leíró paraméterek meghatározása történhet: a) mérésen keresztül, b) fizikai alapon és c) félempirikus/empirikus módszerekkel. Mérések végezhetőek jelzőanyag segítségével a valós vízgyűjtőkön vagy laboratóriumi körülmények között, kisminta modelleken. Ezenfelül mért értékeknek tekinthetők a vízgyűjtőn észlelt csapadék és lefolyás idősorok felhasználásával számított értékek. A fizikai alapú számítások különböző, a mederbeli és/vagy a felszíni áramlást leíró egyenleteken alapulnak. A szakirodalomban fellelhető összefüggések közül legtöbb esetben a Chézy-képlet egyszerűsítésével, átalakításával dolgoznak ki félempirikus összefüggéseket, ahogy azt Wisnovszky is tette. Empirikus módszereknek a tisztán statisztikai módszerekkel előállított összefüggéseket tekintjük. Utóbbi két kategória gyakran összemosódik, emiatt a továbbiakban nem különböztetjük meg a félempirikus módszereket az empirikus egyenletektől. Olyan átfogó tanulmány, amely mindegyik mód-

szert összehasonlítani, jelenleg nem létezik. A jelzőanyaggal végzett kísérletekre és a kisminta modellek használatára kevés példát lehet találni (*Zhang és társai 2007, Azizian 2019*). Az ilyen típusú vizsgálatok végzése vélhetően azok időigényessége és költségessége miatt ritka. *Efstratiadis és társai (2014)* enigmaként hivatkoznak az összegyülekezési időre és kiemelik, hogy a mérnöki gyakorlatban alkalmazott hidrológiai módszerek jelentősen el vannak maradva a hidrológia más, frekvenciátalabb területeihez képest. *Grimaldi (2012) és társai* hangsúlyozzák, hogy a tapasztalati módszerek széleskörű használatának ellenére, azok háttéréről és megbízhatóságáról igen keveset tudni. Ennek vizsgálatára a mért idősorokból meghatározott értékeket hasonlítják össze a gyakrabban használt tapasztalati módszerekkel kapott értékekkel. Ezek közül előbbit tekintik az összegyülekezési idő közvetlen, mért értékének, míg az empiriák révén kapott értékeket származtatott értékeként nevezik meg. Ezzel szemben *Kaufmann (2017) és társai* a mért adatokból való számítást titulálják megbízható közelítésnek az empirikus módszerekkel kapott eredményekhez képest, míg *Michailidi (2018) és társai* egyszerűen lehetetlennek tekintik a mért adatokkal történő igazolását a hidraulikai módszerrel számolt értékeknek, a mért adatokból történő számítás bonyolultságára hivatkozva.

A mért idősorokból történő számítás valóban nem egyértelmű. A különböző fogalmak keveredése és azok fizikai jelentésének mért idősorokhoz való viszonya számos különböző grafikus definícióhoz vezetett. Grafikus definíció alatt a mért idősorok adott pontjai között eltelt idő értendő. Az *1. ábra* szemlélteti, hogy mely definíciók lelhetőek fel leggyakrabban a nemzetközi és hazai szakirodalomban. A felszíni lefolyás kezdete és a teljes lefolyás maximuma között eltelt idő (VII.) a tetőzésig eltelt idő (*Time to Peak*). A késleltetési idő (*Lag Time*) meghatározására leggyakrabban a lefolyásképző csapadék súlypontjától a felszíni lefolyás maximumáig vagy a felszíni lefolyás súlypontjáig vett időt (III. és VI.) használják, bár *Chow (2010)* hangsúlyozza, hogy előbbi a helyes meghatározás. Hazai szakirodalomban (*Wisnovszky 1958, Kontur és társai 2003*) is a súlypontok között eltelt időt (III.) tekintik késleltetési időnek. Az összegyülekezési idő (*Time of Concentration*) két leggyakrabban használt definíciója a lefolyásképző csapadék súlypontjától vagy a lefolyás képző csapadék végétől vett idő a felszíni lefolyás végéig (I. és II.). A *Wisnovszky (1958)* által használt definíció szerint az összegyülekezési idő a csapadék hullás kezdetétől az árhullám tetőzésének időpontjáig tart (VIII.). Ez a definíció nem egyezik a sokat használt két változat egyikével sem, azonban azonos azzal a meghatározással, amit *Beven (2020)* az egyensúly beálltaig eltelt idő (*Time to Equilibrium*) definíciójaként említi. Utóbbiak közül azonban mindegyik definíciót megtalálhatjuk az összegyülekezési idő definíciójaként említve különböző szakirodalomokban (*Wisnovszky 1958, Loukas és Quick 1996, McCuen 2009*). Fontos kihangsúlyozni, hogy a legtöbb meghatározás számításához szükség van az alap-hozam és a lefolyásképző csapadék szétválasztására, ami komoly kétségeket vet fel a vizsgálatok eredményeinek összehasonlíthatóságával kapcsolatban, illetve a levont következtetések általános érvényűségét is megkérdőjelezhetővé teszi.



1. ábra. Az összegyülekezési idő grafikus definíciói
Figure 1. Graphical definitions of time of concentration

A különböző tanulmányok eredményeinek összehasonlíthatóságát tovább nehezíti, hogy azok sokszor eltérő vízgyűjtő-mérettartományra készülnek. A vizsgálatok kiterjednek a laboratóriumi (lejtő szintű) léptékre (Zhang és társai 2007) és a nagy folyók vízgyűjtőire is (Gericke és Smithers 2016). Megkülönböztethető két mérettartomány Beven és Kirkby (1993) megállapítása után, miszerint az 50 km²-nél kisebb területtel rendelkező vízgyűjtők esetében a felületi összegyülekezés ideje dominál, míg ennél nagyobb vízgyűjtők esetén már a mederhálózatban történő összegyülekezés értéke a mértékadó. Másik szempont lehet a mérettartományok elkülönítésére a racionális módszer alkalmazhatósága. Az eredeti formula alkalmazhatósági feltétele, hogy a csapadék lefedje a teljes vízgyűjtőt, illetve intenzitása állandó legyen az összegyülekezési idő időtartamáig. Annak ellenére, hogy a racionális módszert 1 km²-nél kisebb vízgyűjtőkre dolgozták ki, egyes esetekben 500 km²-ig is kiterjesztették az alkalmazhatóság határát, azonban ennél a vízgyűjtő méretnél már nehezen elképzelhető, hogy teljesül mindkét feltétel (Grimaldi és Petroselli 2015). Hazai viszonylatban a 10 km²-es alkalmazhatósági határ jelenik meg a szakirodalomban (Kontur és társai 2003), bár ennek figyelembe vétele sokszor elmarad (Pirkhoffer és Czigány 2010). Jelen tanulmány során, Wisnovszky munkájához hasonlóan, a közepes vízgyűjtő-mérettartományra fókuszáltunk, ami a ~10-1000 km²-es tartományt jelenti.

A Wisnovszky (1958) által kidolgozott összefüggés a hazai viszonylatban leggyakrabban használt képlet, amelynek teljes alakja:

$$\tau = \frac{L^2}{\sqrt{A \cdot S}} \cdot \left(1,04 - \frac{A}{5850}\right),$$

egyszerűsített alakja:

$$\tau = \frac{L^2}{\sqrt{A \cdot S}}$$

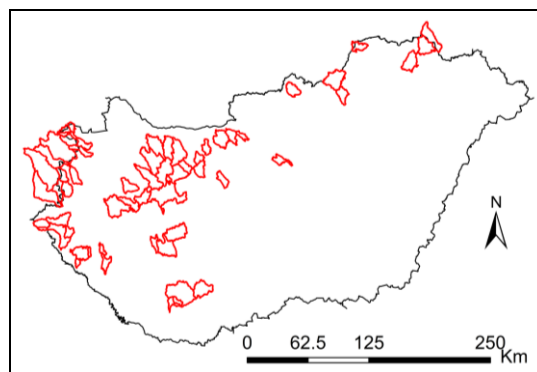
ahol τ [perc] az összegyülekezési idő, L [km] a vízgyűjtő leghosszabb lefolyási úthossza, A [km²] a vízgyűjtő területe és S [-] a lefolyási úthossz átlagos esése. A levezetett összefüggés(ek) háttéréről azonban keveset olvashatunk a

hidrológiai szakkönyvekben. Wisnovszky ugyan megemlíti, hogy az összegyülekezési idő meghatározása mért adatok alapján is lehetséges, azonban munkájában csak az egyszerűsített képlet alkalmazásával foglalkozik. Ezekre hoz példákat a nemzetközi és hazai gyakorlatból, majd Salcher (Rosenauer 1946) összefüggését ($\tau = \frac{1}{600} * \frac{L}{\sqrt{S}}$, ahol τ [perc] az összegyülekezési idő L [m] a leghosszabb lefolyási úthossz, S [-] a lefolyási úthossz átlagos esése) fejleszti tovább egy, a vízgyűjtőt jellemző alaki tényező alkalmazásával, bár hangsúlyozza, hogy a tényező bevezetésének kizárólag elméleti alapja van. Megfogalmazása szerint „az összegyülekezési idő számítására szerkesztett új képletnek csak gondolati alapja van, nem bizonyítható, hogy alkalmazása a valóságot jobban megközelítő eredményt ad, mint az ismert képletek bármelyike” (Wisnovszky 1958). Mégis, a mai napig legtöbbször alkalmazott képletet szolgáltatja az általa levezetett összefüggés, amelynek pontosságáról semmilyen információk nincsen. Érdekesesség továbbá, hogy az összefüggés sokak által ismert, egyszerűbb alakjának használatát csak az 1-500 km²-es mérettartományra javasolja, e felett (2 000 km²-ig) a levezetett összefüggés teljes alakját szükséges használni. Az összefüggés teljes változata egyik hazai szakkönyvben sem lelhető már fel. Wisnovszky összefüggése mellett a Ventura-féle összefüggés használatára találhatunk még javaslatot (V. Nagy 1978), melynek alakja: $\tau = 4 * \sqrt{\frac{A \cdot L}{H}}$, ahol τ [óra] az összegyülekezési idő, L [km] a vízgyűjtő leghosszabb lefolyási úthossza, A [km²] a vízgyűjtő területe és H [m] a maximális lefolyási úthossz végpontjai közti szintkülönbség. Ezt az összefüggést a Pó-vidéken található, természetes vízgyűjtőkre dolgozták ki Olaszországban Kaufmann de Almeida és társai (2017), a módszer alkalmazhatósági határai ismeretlenek. A harmadik összefüggés, amivel találkozni lehet a hazai szakirodalomban a Kerby képlete (Kerby 1959), ez azonban igen kicsi, 4 hektárnál kisebb vízgyűjtőkre alkalmazható, ahol a felszíni összegyülekezés ideje dominál. Alkalmazása városi vagy vízgyűjtők legfelső szakaszát érintő tervezési feladatoknál javasolt, a módszert eredetileg az Amerikai Egyesült Államokban dolgozták ki.

VIZSGÁLT VÍZGYŰJTŐK

A vizsgálatok során 61 hazai vízgyűjtő adatait használtuk fel (2. ábra). A vizsgálatba bevont vízgyűjtők listáját az 1. táblázat tartalmazza.

A vízgyűjtők kiválasztásánál figyelembe vett főbb szempontok, hogy a) az adott vízgyűjtőre minimum órás felbontású vízhozam idősor álljon rendelkezésre, illetve b) ne legyen erős az antropogén hatás az adott vízgyűjtőn. A vízgyűjtők többsége a Dunántúli-középhegységben és az Alpokalján található. A legmagasabb hegycsúcsokkal rendelkező Északi-középhegységben és a lakásabb Dunántúli domboságon csak néhány vízgyűjtő helyezkedik el.



2. ábra. A vizsgálatba bevont vízgyűjtők elhelyezkedése
Figure 2. Location of the selected watersheds

1. táblázat. A vizsgált vízgyűjtők listája
Table 1. List of selected watersheds

Sorszám	Vízfolyásnév	Kifolyási szelvény	Sorszám	Vízfolyásnév	Kifolyási szelvény
1	Alsó-Tápió	Tápióság	32	Kigyós-patak	Veszprémgalsa
2	Alsó-Válicka	Csömödér	33	Kiskomáromi-csatorna	Zalakomár
3	Arany-patak I	Nagycenk	34	Kis-Koppány-patak	Ádánd
4	Arany-patak II	Szombathely-Olad	35	Kozár-Borzó-patak	Bozzai
5	Baranya	Csikóttöts	36	Kürtös-patak	Bocska
6	Béci-patak	Letenye	37	Marcal	Karakó
7	Bózsva	Széphalom	38	Medesi-patak	Pórszombat
8	Bükkösi vízfolyás 1	Hetvehely	39	Ménes-patak	Benczúrfalva
9	Bükkösi vízfolyás 2	Szentlőrinc	40	Mór-Bodajki-vízfolyás	Csókakó
10	Burján-árok	Zámoly	41	Nagy-Koppány	Törökkoppány
11	Concó-patak	Nagyigmánd	42	Nagy-Pándzsa	Győr Kismegyer
12	Cuhai-Bakony-ér 1	Bakonybánk	43	Orosztonyi-patak	Garabonc
13	Cuhai-Bakony-ér 2	Böny	44	Pénzes-patak	Kecskéd
14	Dera-patak	Pomáz	45	Pinka 1	Felsőcsatár
15	Eger-patak I	Almár	46	Pinka 2	Kemestaródfa
16	Eger-víz II	Kapolcs	47	Pinkaág	Kemestaródfa
17	Gaja-patak	Bodajk	48	Rák-patak	Sopron
18	Galla-patak	Tatabánya	49	Rákos-patak	Fertőrákos
19	Gerence-patak	Takácsi	50	Répece	Répecevis
20	Gyöngyös-patak	Kőszeg	51	Ronyva-patak	Sátoraljaújhely
21	Hajagos	Nemesszalók	52	Sokoróaljai-Bakonyér	Győrszemere
22	Hangony-patak	Center	53	Szerencs-patak	Abaújszántó
23	Ikva 1	Fertőszentmiklós	54	Tetves-patak	Visz
24	Ikva 2	Sopron	55	Torna 1	Városlőd
25	Jáki-Sorok	Kisunyom	56	Torna 2	Kolontár
26	Jósua-patak	Szin	57	Únyi-patak	Tokod
27	Kardos-ér	Pusztacsalád	58	Vereb-Pázmándi vízfolyás	Kápolnásnyék
28	Kéki-patak	Balatonfüred	59	Séd	Ósi
29	Kenyérmezei-patak	Kenyérmező	60	Völgységi-patak	Bonyhád
30	Kerka 1	Bajánsenye	61	Zala	Zalalövő
31	Kerka 2	Lenti			

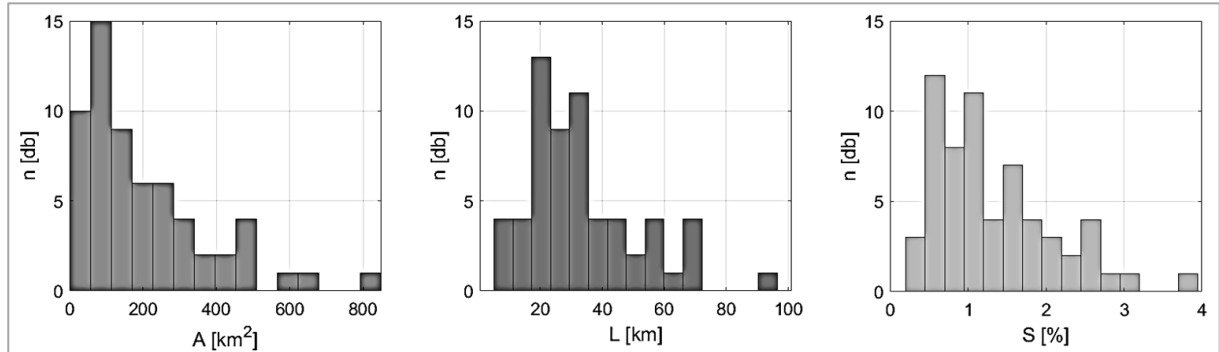
A 3. ábrán látható a vízgyűjtők területének, leghosszabb lefolyási úthosszának és a leghosszabb lefolyási úthossz átlagos esésének hisztogramja. Kisebb területű és esésű vízgyűjtők nagyobb arányban találhatók a vizsgált vízgyűjtők között. A terület, leghosszabb lefolyási úthossz, valamint annak átlagos esése tekintetében lefedett tartományok rendre 8,74-810 km², 8,07-95,1 km és 0,229-3,90%.

Az említett három paramétert gyakran használják a vízgyűjtők jellemzésére. Az összegyűlekezési idő számítására kidolgozott empirikus képletek is sok esetben ezeknek a morfológiai paramétereknek függvényében fejezik ki az összegyűlekezési idő értékét, azonban számos paraméter létezik ezek mellett a vízgyűjtők jellemzésére. A vizsgált paramétereket a 2-4. táblázatok foglalják össze. A tábláza-

tokban megadtuk azok értelmezését, valamint – amennyiben rendelkezésünkre állt – a számítás menetét részletesen tartalmazó publikációt. Összesen 47 paramétert határoztunk meg minden vízgyűjtőre, amelyek három fő csoportba sorolhatók (Abdel-Fattah és társai 2017). Az első csoport a vízgyűjtők méretét és topográfiáját számszerűsítő paramétereket tartalmazza. A második csoport a vízfolyáshálózatot jellemző paramétereket, a harmadik pedig a (túlnyomórészt származtatott) alaki tényezőket foglalja magába. Az egyes paraméterek számítása nem minden esetben egyértelmű, mivel nem minden esetben definiált kellő pontossággal azok értelmezése, ami – a paraméterek szubjektív értelmezéséből adódóan – szintén nehezíti a különböző szerzők által bemutatott eredmények összehasonlíthatóságát. Feltehetően az alább leközölt lista sem teljes,

azonban jó kiindulási alapot szolgáltathat hasonló vizsgálatokhoz. A paraméterek meghatározása során a vízgyűjtőket ArcGIS térinformatikai szoftverrel, valamint annak ArcHydro Tools eszköztárának segítségével, az EU-DEM terepmodellből (*Internet 1*) kiindulva határoztuk meg. A lehatárolás során kapott vízgyűjtő területeket és vízfolyás

hálózatokat ellenőriztük a rendelkezésünkre álló vektoros állományok alapján. Amennyiben szükséges volt, mederbeégetés vagy szintemelés segítségével korrigáltuk a kapott vízgyűjtő határt/mederhálózatot, így összességében a legtöbb vízgyűjtő esetén a valósághoz közel álló eredményt kaptuk.



3. ábra. A vizsgált vízgyűjtők területének (A), leghosszabb lefolyási úthosszának (L) és a leghosszabb lefolyási úthossz átlagos esésének (S) histogramjai

Figure 3. Histograms of watershed area (A), longest flowpath (L) and average slope of the longest flowpath (S)

2. táblázat. Vizsgált morfológiai paraméterek – méret és topográfia

Table 2. List of morphometric parameters – size and topography

Jelölés	Megnevezés (magyar)	Megnevezés (angol)	Mértékegység	Hivatkozás	Számítás/Meghatározás
W	Vízgyűjtő szélessége	Basin width	km	Black (1972)	Leghosszabb lefolyási úthosszra merőleges egyenes, ami átmegy a súlyponton, meghosszabbítva a vízgyűjtő határáig.
L_c	Súlypont és kifolyási pont távolsága	Length from centroid to outlet	km	Black (1972)	Vízgyűjtő súlypontját a kifolyási ponttal összekötő egyenes hossza.
L_b	Vízgyűjtő (völgy) hossza	Basin length	km		Leghosszabb lefolyási úthossz kezdő és végpontja, illetve a súlypont által adott törtvonal hossza.
P	Vízgyűjtő kerülete	Basin perimeter	km		
A	Vízgyűjtő területe	Basin area	km ²		
S	Leghosszabb lefolyási úthossz átlagos esése	Slope of longest flowpath	%		$S = \frac{H}{L} \cdot 100$
S_a	Vízgyűjtő átlagos esése	Average slope of watershed	%		Vízgyűjtő terepmodelljéből előállítható esés mező (ArcHydro Tools/Slope) átlaga.
L	Leghosszabb lefolyási úthossz	Longest flowpath	km		Geometriailag leghosszabb út a vízgyűjtő terepmodellje alapján (ArcHydro Tools/Longest Flowpath).
H_{min}	Legalacsonyabb pont	Minimum elevation	m B.f.		Vízgyűjtő határa által kijelölt terepmodell minimum értéke.
H_{max}	Legmagasabb pont	Maximum elevation	m B.f.		Vízgyűjtő határa által kijelölt terepmodell maximum értéke.
H_{mean}	Vízgyűjtő átlagos szintje	Average elevation	m B.f.		Vízgyűjtő határa által kijelölt terepmodell átlagos szintje.
S_{ms}	Főmeder átlagos esése	Main stream channel slope	%		Leghosszabb lefolyási úthossz meder részének átlagos esése.
H	Maximális szintkülönbség	Relief	m	Schumm (1956)	$H = H_{max} - H_{min}$
$R_{r,2}$	Relief arány	Relief ratio	%	Schumm (1956)	$R_{r,2} = \frac{H}{L_b} \cdot 100$
$R_{r,1}$	Relatív relief	Relative relief	%		$R_{r,1} = \frac{H}{P} \cdot 100$
$R_{r,m}$	Melton-féle relatív relief	Melton relative relief	%	Melton (1965)	$R_{r,m} = \frac{H}{\sqrt{A}} \cdot 100$
HI	Hipszometrikus integrál	Hypsometric integral	-	Pike & Wilson, (1971)	$HI = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H}$
D_i	Töredezettségi index	Dissection index	-	Singh & Dubey (1994)	$D_i = \frac{H}{H_{max}}$
S_r	Esés arány	Slope ratio	-	(Al-Rawas & Valeo (2010)	$S_r = \frac{S_{ms}}{S_a}$

3. táblázat. Vizsgált morfológiai paraméterek – vízfolyáshálózatot leíró paraméterek
Table 3. List of morphometric parameters – channel network parameters

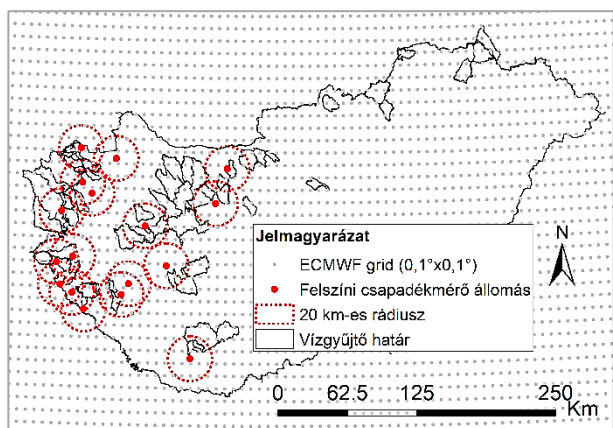
Jelölés	Megnevezés (magyar)	Megnevezés (angol)	Mértékegység	Hivatkozás	Számítás/Meghatározás
SN	Vízfolyásszakaszok száma	Total stream number	db		Vízfolyás szakaszok darabszáma, amiket a torlati pontok különítenek el.
SL	Vízfolyásszakaszok hossza	Total stream length	km		1 km ² vízgyűjtő területtől tekintettünk mederek egy adott pontot.
L_{max}	Főmeder hossza	Length of main stream	km		Leghosszabb lefolyási úthossz meder részének hossza.
u	Legmagasabb mederkategória	Highest stream order	-	Strahler (1957)	Strahler-féle hierarchikus mederkategorizálás alapján. L_u , N_u és A_u a legmagasabb mederkategóriához tartozó mederhossz, meder darabszám és vízgyűjtőterület. L_{u-1} , N_{u-1} , A_{u-1} a maximumnál egyvel alacsonyabb kategóriához tartozó értékek.
L_u	Legmagasabb kategóriájú vízfolyások hossza	Main trunk length (highest stream order length)	km		
Sin	Szinuszosság	Sinuosity	-	Mueller (1968)	$Sin = \frac{L}{L_h}$
S_f	Völgysűrűség	Stream frequency	1/km ²	Horton (1945)	$S_f = \frac{SN}{A}$
D_d	Vízfolyássűrűség	Drainage density	1/km	Horton (1932)	$D_d = \frac{SL}{A}$
D_f	Vízfolyás faktor	Drainage factor	-		$D_f = \frac{S_f}{D_d^2}$
C_m	Medermegtartás	Channel maintenance	km	Schumm (1956)	$C_m = \frac{1}{D_d}$
L_o	Felszíni lefolyás hossza	Overland flow length	km	Horton (1945)	$L_o = \frac{1}{2 \cdot D_d}$
T	Meder textúra	Drainage texture	1/km	Smith (1950)	$T = D_d \cdot D_f$
R_t	Textúra arány	Texture ratio	1/km	Smith (1950)	$R_t = \frac{SN}{P}$
R_f	Finomsági arány	Fineness ratio	-	Melton (1965)	$R_f = \frac{SL}{P}$
R_b	Bifurkációs (elágazási) arány	Bifurcation ratio	-	Singh & Yousuf (2000)	$R_b = \frac{N_u}{N_{u-1}}$
R_l	Vízfolyás hossz arány	Stream length ratio	-	Singh & Yousuf (2000)	$R_l = \frac{L_u}{L_{u-1}}$
R_a	Terület arány	Area ratio	-	Horton (1932)	$R_a = \frac{A_u}{A_{u-1}}$

4. táblázat. Vizsgált morfológiai paraméterek – vízgyűjtők alakját jellemző paraméterek
Table 4. List of morphometric parameters – shape indices

Jelölés	Megnevezés (magyar)	Megnevezés (angol)	Mértékegység	Hivatkozás	Számítás/Meghatározás
L_{sc}	Súlypont távolsága a leg-hosszabb lefolyási úttól	Distance from stream centroid	km		Leghosszabb lefolyási úthosszra mérőleges egyenes hossza a súlypontig.
R_c	Nyúltsági arány	Elongation ratio	-	Schumm (1956)	$R_c = \frac{2 \cdot \sqrt{A/\pi}}{L_h}$
S_b	Alaki tényező	Basin shape factor	-		$S_b = \frac{L^2}{A}$
R_{lw}	Hossz-szélesség arány	Length-width ratio	-		$R_{lw} = \frac{L}{W}$
C	Tömörtség	Compactness	-	Horton (1932)	$C = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}}$
c	Köralakúság	Basin circularity	-	Miller (1953)	$c = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2} = \frac{1}{C^2}$
F	Forma	Form factor	-	Horton (1932)	$F = \frac{A}{L_b^2}$
K	Lemniskáta arány	Lemniscate ratio	-	(Chorley és társai (1957)	$K = \frac{L_b^2 \cdot \pi}{4 \cdot A}$
t	Lapultság	Eccentricity	-	Black (1972)	$t = \frac{\sqrt{ L_c^2 - W^2 }}{W}$
R_N	Egyenetlenségi szám	Ruggedness number	-		$R_N = \frac{H \cdot D_d}{1000}$
CON	Folytonossági index	Contiguity index	-	Lagro (1991)	$CON_{ij} = \frac{\sum_{r=1}^z C_{ijr} - 1}{v - 1}$ A változók részletes ismertetését lásd: Lagro (1991)

HIDROMETEOROLÓGIAI ADATOK

A vizsgálatokhoz minimum órás felbontású csapadék és vízhozam idősorokra volt szükség. A területileg illetékes Vízügyi Igazgatóságok 61 szelvényre bocsájtottak rendelkezésünkre vízhozam idősorokat, valamint 17 felszíni állomásra csapadék idősorokat. A felszíni állomások száma viszonylag kevés a vízgyűjtőkhöz képest és számos esetben nem a vízgyűjtőn, csak annak közelében található állomás adatait tudtuk figyelembe venni. Egy csapadékmérő állomáshoz abban az esetben rendeltünk hozzá egy vízgyűjtőt, amennyiben annak kifolyási szelvénye a csapadékmérő állomás 20 km-es körzetébe esett. A 4. ábrán látható, hogy az Északi-középhegységben egyáltalán nem álltak rendelkezésünkre felszíni csapadék adatok, illetve a 20 km-es tartomány elfogadása mellett sem tudtuk minden dunántúli vízgyűjtőhöz csapadékidősort társítani. Alternatív adatforrásként az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) re-analízis idősorokat használtuk. Az ERA5-Land produktum (Copernicus Climate Change Service 2019) térbeli felbontása $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (~10x10 km, lásd 4. ábra), időbeli felbontása órás. A globális, homogén adatbázist modelledmények és megfigyelések alapján állítják elő. A vízgyűjtők súlypontját használva minden vízgyűjtőhöz hozzárendeltük az ahhoz legközelebb eső cellát.



4. ábra. Felszíni állomások és az ECMWF rácshálójának elhelyezkedése a vízgyűjtőkhöz viszonyítva

Figure 4. Precipitation gauging station locations and the grid of the ECMWF data compared to the location of the target watersheds

MÓDSZERTAN

Legfontosabb lépés a vizsgálatba bevont csapadék-lefolyás események körültekintő kiválasztása volt. A felhasznált eseményeket több lépésben azonosítottuk. Elsőként egy olyan algoritmust dolgoztunk ki, mely a mért vízhozam idősorokból, tetőző vízhozam szerint csökkenő sorrendben kiválogatta minden vízgyűjtőre az árhullámokat. Egy tetőző vízhozam akkor számított árhullámnak, amikor meghaladta a sokéves átlagvízhozam kétszeresét. Az eseményeket akkor tekintettük függetlennek, ha két tetőző vízhozam között a vízhozam a sokéves átlagvízhozam alá csökkent. Az ilyen módon azonosított árhullámok átestek egy kézi szűrésen. Az alakjuk alapján torz árhullámokat kiszűrtük, mérési hibát feltételezve.

Abból kiindulva, hogy a teljes vízhozam felszíni lefolyásból és alaphozamból tevődik össze, rekurzív szűrési folyamattal (Nathan és McMahon 1990) elválasztottuk a felszíni lefolyást az alaphozamtól. A felszíni lefolyás számításának egyenlete:

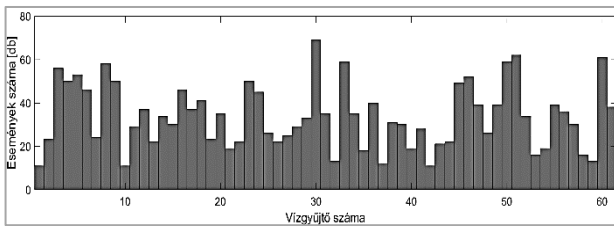
$$Q_d(t) = \beta \cdot Q_d(t-1) + \frac{1+\beta}{2} [Q(t) - Q(t-1)],$$

ahol $Q(t)$ [m^3/s] és $Q(t-1)$ [m^3/s] a teljes vízhozam t és $t-1$ időpontban, $Q_d(t)$ [m^3/s] és $Q_d(t-1)$ [m^3/s] a felszíni lefolyás t és $t-1$ időpontban, β [-] pedig a rekurzív szűrő paramétere. Utóbbit kézzel kalibráltuk minden vízgyűjtő esetén úgy, hogy az alaphozam a lehető legtöbb árhullám esetén illeszkedjen az árhullámok apadó ágán lévő inflexiós ponthoz (amennyiben az azonosítható volt). A szeparálási módszer rekurzív, hiszen a szűrő háromszor halad végig a szeparálandó idősoron ellentétes irányban. Ezzel csökken a fáziseltolódás a teljes vízhozam és az alaphozam tetőzése között (Serinaldi és Grimaldi 2011), bár ez nem garantálja, hogy a valósághoz közelebb álló alaphozam idősort kapunk (Szilágyi és társai 2003). Az általunk kalibrált paraméterek értékei 0,930-0,997 tartományba estek, ami egyezik a szakirodalomban fellelhető értékekkel (Nathan és McMahon 1990; Serinaldi és Grimaldi 2011; Grimaldi és társai 2012). Korábban hazai viszonylatban használták már ezt a szeparálási módszert $\beta = 0,925$ értékkel (Jolánkai és Koncsos 2018), azonban saját vizsgálataink alapján nem láttuk megfelelőnek ennek az értéknek a használatát.

Habár számos módszer rendelkezésre áll a lefolyásképző csapadék számítására (Dingman 2015), annak meghatározása a csapadék-lefolyás modellezés legkritikusabb pontja. Két, kalibrálandó paramétert nem tartalmazó módszer a konstans arányú és a konstans mennyiségű veszteségek módszere. Előbbi esetén, amennyiben nem feltételezünk valamilyen kezdeti veszteséget, a csapadékesemény elején is keletkezik lefolyásképző csapadék. Utóbbi az úgynevezett Φ -index módszer, amelynél a kezdeti veszteségek felvétele elhanyagolható, ez esetben önkényes paraméterválasztás nélkül, a felszíni lefolyás és a lefolyásképző csapadék egyenlőségéből kiindulva felbontható a teljes csapadék idősor veszteségre és hatékony csapadéokra. Vizsgálataink során tehát a Φ -index módszert alkalmaztuk, erre láthatunk példát az 1. ábrán is. Ennek a módszernek a legnagyobb hátránya, hogy a valóságban előforduló, nagyobb kezdeti veszteségeket nem írja le. Előnye azonban, hogy nincs szükség paraméter(ek) kalibrálására, ezzel is növelve a végzett vizsgálatok objektivitását. A lefolyásképző csapadék meghatározása újabb szűrési lehetőséget biztosított: azok az események, amelyeknél nem társult elegendő csapadék a megfigyelt lefolyáshoz, kikerültek a vizsgálandó események köréből.

A felszíni lefolyás és a lefolyásképző csapadék ismeretében meghatároztuk az idősorok jellegzetes pontjait és az 1. ábrán bemutatott grafikus definíciókat. Az események utolsó szűrése az így meghatározott összegyűlekezési idők értékei alapján történt. A kiugró, illetve negatív értékeket produkáló eseményeket eltávolítottuk a vizsgálatba tartozó események közül. Mind a negatív értékek,

mind a kiugró értékek általában a nem megfelelő alaphozam szeparálás eredményeként jöttek létre, azonban az így kiszűrt események száma elenyésző volt (<1%). Végül összesen 2 152 db esemény bizonyult megfelelőnek a vizsgálatok végzéséhez, ezek közül 1 346 db (62,5%) esetén használtuk az ECMWF adatbázis csapadék idősorait. Vízyűjtőnként minimum 11, maximum 69, átlagosan 35 esemény adatai álltak rendelkezésre (5. ábra). Az ECMWF adatok használati arányából látható, hogy kulcsfontosságú azok használhatóságát igazolni, mivel felhasználásukkal számottevően nagyobb adathalmazra végezhető el a vizsgálatok.



5. ábra. Felhasznált események darabszáma vízyűjtőnként
Figure 5. Number of events used per watershed

A kapott értékek vizsgálatával kiválasztható egy olyan grafikus definíció, amely a korábban kidolgozott empirikus összefüggések megbízhatóságának minősítésére alkalmas, illetve egy új összefüggés kidolgozásának alapjául szolgál. Az összegyülekezési idő mért értékeinek tekinthető grafikus definíciók számítása után számba vettük az összehasonlítható empirikus összefüggéseket. Ventura és Wisnovszky összefüggése mellett, az utóbbi alapjául szolgáló Salcher képletet is bevontuk a vizsgálatba. Korábbi modellvizsgálatok során *Haktanir és Sezen (1990)* összefüggése bizonyult hazai körülmények között alkalmasnak az összegyülekezési idő számítására (*Nagy és társai 2016*), ezért jelen esetben is vizsgáltuk az összefüggést, aminek egyenlete:

$$\tau = 0,7473 \cdot L_{max}^{0,841},$$

ahol τ [óra] az összegyülekezési idő és L_{max} [km] a főmeder hossza. Az empirikus összefüggésekkel kapcsolatban felmerülő legfontosabb kérdések, hogy azok a) hány paramétert tartalmaznak, b) milyen matematikai alakban és c) konkrétan mely morfológiai paraméterek használatával adják a legpontosabb eredményt. A hazai és nemzetközi empirikus összefüggéseket vizsgálva azt tapasztalhatjuk, hogy a legtöbb esetben 1-4 paramétert tartalmaznak az egyenletek és általában hatványkitevős formában kifejezhetők, azaz

$$\tau = a_0 + p_1^{a_1} \cdot \dots \cdot p_n^{a_n},$$

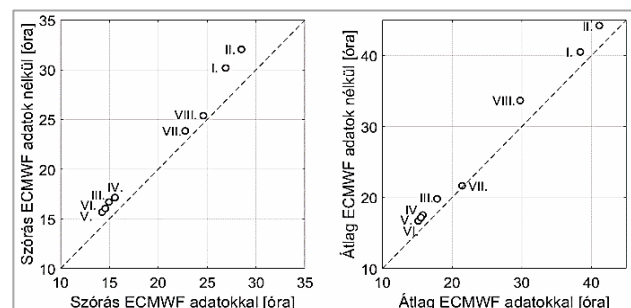
ahol p_1, \dots, p_n a választott morfológiai paraméterek, a_0, \dots, a_n pedig az empirikus összefüggés kalibrálandó együtthatói. Valószínűsítettük, hogy a paraméterek számának növelése nem minden esetben okoz számottevő javulást az eredményekben, hiszen az egyes paraméterek kapcsolata egymással és az összegyülekezési idővel más erősségű és jellegű. Emellett minél több paramétert tartalmaz az egyenlet, annál nehezebb annak alkalmazása a gyakorlatban, tehát az ideális paraméterszám kérdéses. A megfelelő paraméterek kiválasztásához célszerű vizsgálni

a morfológiai paraméterek egymáshoz és az összegyülekezési idő mért értékéhez való viszonyát. Erre alkalmas a lineáris korreláció vizsgálata és a főkomponens analízis, amelyek segítségével előállítottuk a paraméterek és az összegyülekezési idő korrelációs mátrixát, illetve azonosítottuk azokat a paramétereket, melyek legnagyobb arányban felelősek a vizsgált adathalmaz szórásáért. Nem triviális azonban, hogy a legerősebb (lineáris) korrelációs kapcsolattal rendelkező paraméterek, vagy az adathalmaz szórását legjobban reprodukáló paraméterek esetében tudunk jobb összefüggést kalibrálni, esetleg létezik ezen megközelítések eredményénél is kedvezőbb eset. Ennek vizsgálatára elvégeztük az egyenlet kalibrálását minden, véletlenszerűen választható paraméterkombinációra 1-4 paraméter alkalmazása esetén. Utóbbi kombinációkat tekintettük az eredmények értékelése során optimumnak, hiszen ennél jobb eredményt nem tudunk elérni, az imént ismertetett matematikai alakot alkalmazva.

EREDMÉNYEK

Összegyülekezési idő számítása mért időszak segítségével

A 6. ábrán látható a 8 különböző grafikus definíció (lásd 1. ábra) esetén kapott összegyülekezési idők értékeinek szórása, illetve átlaga. Az ECMWF adatok használhatóságát alátámasztja, hogy az ECMWF adatokat nem tartalmazó értékek szórása és átlaga csak kis mértékben (előbbi esetén átlagosan 9%-ban, utóbbi esetén átlagosan 8%-ban) tér el a teljes adathalmaz átlagától, illetve szórásától.



6. ábra. A teljes minta (2152 esemény) szórása (bal) és átlaga (jobb) definícióként az ECMWF adatok figyelembevételével és azok nélkül

Figure 6. Standard deviation (left) and mean (right) of the whole data sample (2152 events) per definition with and without ECMWF data

A gyakran alkalmazott definíciók (I. és II.) átlaga és szórása közel kétszerese a III.-VI. definíciók által adott értékeknek. A Wisnovszky által alkalmazott definíció (VIII.) és a VII. definíció átlaga és szórása utóbbi két csoporté között található. *Beven (2020)* szerint az egyensúly beálltához szükséges idő rövidebb, mint az összegyülekezési idő, mivel a hullámterjedési sebesség általában meghaladja a vízrészecskék áramlási sebességét. Ezt az általunk kapott eredmények is igazolják, hiszen az I. és II. definíciókkal kapott értékek átlaga nagyobb, mint a VIII. definícióval kapott értékek átlaga. Amennyiben a hullámterjedés figyelembevételére helyezzük a hangsúlyt, lehetőségünk van a csapadék és lefolyás idősorok azonos pontjainak – kezdő-, súly-, végpont és maximum – vizsgálatára. Ezek közül a

lefolyásképző csapadék és a felszíni lefolyás súlypontjának különbsége a III. definíció, a teljes csapadék és teljes lefolyás maximumának különbsége a IV. definíció, a lefolyásképző csapadék és a felszíni lefolyás vége között eltelt idő pedig az I. definíció. Árvédelmi szempontból szerencsésebb a rövidebb értékeket adó definícióhoz viszonyítani a létező empirikus módszerek által adott értékeket, illetve azok értékére kalibrálni az új összefüggéseket. Ez alapján nem javasolt az I. definíció használata. A III. és IV. definíció átlaga és sűrűsége között nincs jelentős eltérés, azonban a IV. definíció későbbi alkalmazásának igen nagy előnye, hogy nem igényli az alaphozam és a hatékony csapadék meghatározását, ami kizárja az önkényes módszer és paraméterválasztásból adódó bizonytalanságot. A Wisnovszky képlet hibáját az egyes definíciókkal kapott értékek mediánjához viszonyítva a négyzetes középhiba ($RMSE$), a korrelációs tényező (r) és az átlagos abszolút eltérés ($\Delta\tau_{abs}$) használatával számszerűsítettük (5. táblázat). Ezek számításának módja rendre:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,mod} - y_{i,ref})^2}{n}},$$

ahol $RMSE$ [óra] a négyzetes középhiba, $y_{i,mod}$ [óra] és $y_{i,ref}$ [óra] a számított és a mért értékek, valamint n [db] a minta elemszáma ($n = 61$);

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_{i,mod} - \mu_{mod}}{\sigma_{mod}} \right) \cdot \left(\frac{y_{i,ref} - \mu_{ref}}{\sigma_{ref}} \right),$$

ahol r [-] a korrelációs tényező, μ_{mod} [óra] és μ_{ref} [óra] a számított és mért értékek átlaga, σ_{mod} [óra] és σ_{ref} [óra] a számított és mért értékek szórása, illetve n [db] a minta elemszáma;

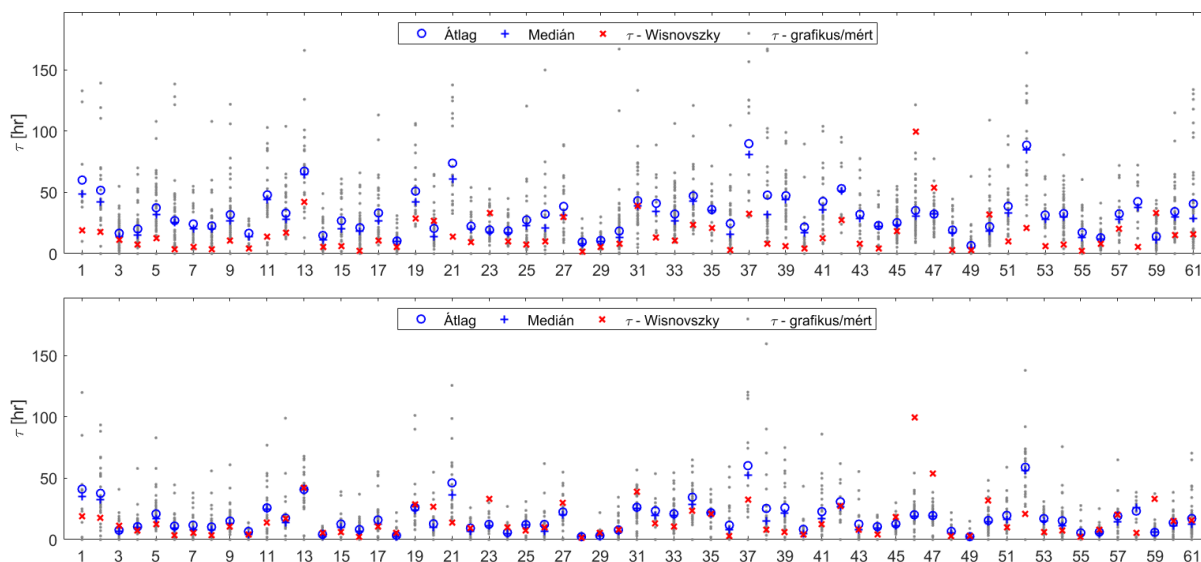
$$\Delta\tau_{abs} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{i,mod} - y_{i,ref}|}{y_{i,ref} \cdot n} \cdot 100,$$

ahol $\Delta\tau_{abs}$ [%] az abszolút eltérés összege.

5. táblázat. A Wisnovszky képlet hibája a grafikus definíciókhoz viszonyítva (négyzetes középhiba – $RMSE$ [óra], korrelációs tényező – r [-] és átlagos abszolút eltérés összege – $\Delta\tau_{abs}$ [óra])
Table 5. Estimation error of the Wisnovszky equation compared to the graphical definitions (root mean square error – $RMSE$ [hr], Pearson correlation – r [-] and sum of absolute errors – $\Delta\tau_{abs}$ [hr])

Definíció	$RMSE$ [óra]	r [-]	$\Delta\tau_{abs}$ [óra]
I.	36.4	0.345	300
II.	40.9	0.321	329
III.	16.3	0.364	90.2
IV.	15.2	0.369	67.6
V.	15.1	0.378	66.2
VI.	15.0	0.389	67.0
VII.	17.5	0.311	101
VIII.	22.2	0.320	196

A különböző mutatók használata nem okoz számottevő eltérést a definíciók rangsorolásában. A legrosszabb egyezést az I., II. és VIII. definíciók esetén kaptuk, míg a IV.-VI. definíciók esetén a legkisebb a becslés hibája, a definíciók közötti minimális eltéréssel. Ugyan Wisnovszky a sebességre alapozva vezette le összefüggését, azonban az mégis közelebb áll a rövidebb, hullámterjedési sebességet tükröző értékekhez. A 7. ábrán láthatók minden vízgyűjtő esetén a VIII. és IV. definíció használatával kapott eredmények. Wisnovszky megállapítása, miszerint egyenlete alulbecsli az összegyülekezési idő értékét, helytállóan bizonyul. A IV. definíció esetében néhány vízgyűjtőnél megfigyelhető szinte tökéletes egyezés (pl. 12-es és 13-as vízgyűjtő) vagy kiugró túlbecslés (pl. 46-os és 47-es vízgyűjtő), azonban az esetek nagyrésztében valamelyest alulbecsli az összefüggés a mért értékek mediánját. Az ismertetett eredményekre alapozva tehát a IV. definíció által adott értékek mediánját választottuk az összegyülekezési idő mért értékének, az empirikus módszerek hibájának számszerűsítésére pedig csak a négyzetes középhiba értékét használtuk a továbbiakban.



7. ábra. A VIII. definíció (fent) és a IV. definíció (lent) használatával kapott eredmények
Figure 7. Values of time of concentration using definition 8 (top) and definition 4 (bottom)

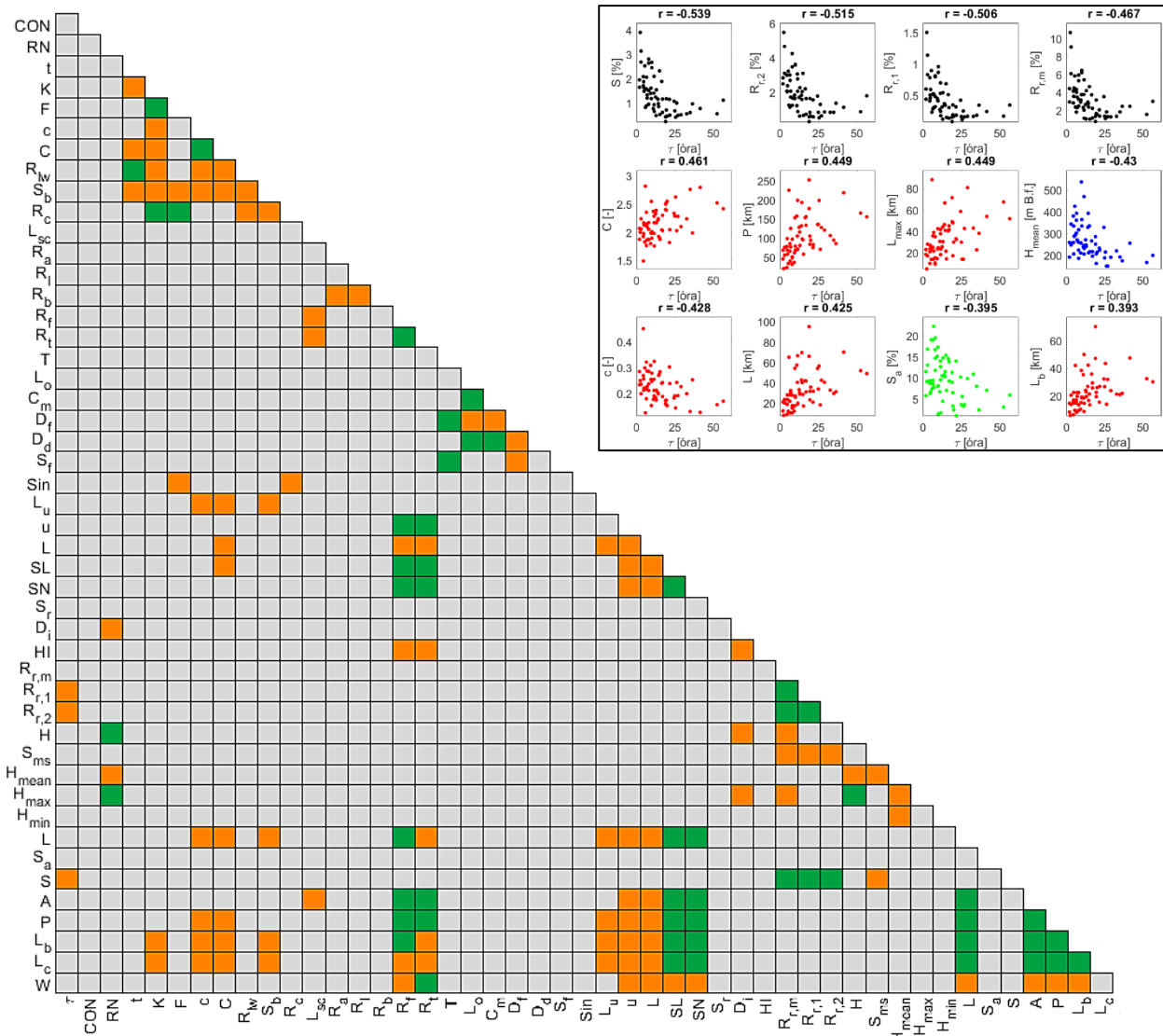
Korreláció számítás és főkomponens analízis

A főkomponens analízis egyik eredményeként előállt korrelációs mátrix a 8. ábrán látható. Szoros ($r > 0,8$) line-

áris korreláció nem fedezhető fel az összegyülekezési idő és a vizsgált morfológiai paraméterek között. Általában olyan esetben áll fenn szoros kapcsolat, amikor függvény-

kapcsolat van két paraméter között vagy viszonylag triviális a kapcsolat megléte (például a különböző hosszak között vagy a terület és kerület között). Közepes korreláció ($0,8 > r > 0,5$) áll fenn az összegyülekezési idő és a leghosszabb lefolyási úthossz esése (S), valamint a relief arány ($R_{r,1}$) és a relatív relief ($R_{r,2}$) között. Utóbbi három paraméter között is szoros a lineáris korrelációs kapcsolat. Azt a 12 paramétert, melyek legjobban korreláltak az összegyülekezési idő mért értékével, szintén a 8. ábra tartalmazza. Ezek közül azt a négy paramétert választottuk új empirikus összefüggés kalibrálásához, melyek függetlennek tekinthetők, tehát nem áll fenn közöttük még közepes lineáris korreláció sem. Azonos színnel ábrázoltuk azokat a paramétereket, amelyek egy csoportba sorolhatók a köztük fennálló kapcsolat alapján (8. ábra, jobb

fent). A négy csoportból kiválasztott paraméterek: a leghosszabb lefolyási úthossz átlagos esése (S), a tömörség (C), a vízgyűjtő átlagos magassága (H_{mean}) és a vízgyűjtő átlagos esése (S_a). A főkomponens analízis másik fontos eredménye azon paraméterek listája, melyek legnagyobb arányban magyarázzák az adathalmaz szórását. A normalizált adatokon főkomponens analízist végezve azt kaptuk, hogy az első négy főkomponens rendre 30,2, 15,1, 12,4 és 8,40%-ban (összesen 66,1%-ban) magyarázza az adatok szórását. A későbbiekben a főkomponenseken legmagasabb pontszámot elérő paramétereket vettük figyelembe az empirikus összefüggések kalibrálásakor, amelyek a leghosszabb lefolyási úthossz (L), a legmagasabb pont magassága (H_{max}), a nyúltsági arány (R_c) és a medermegtartás (C_m).

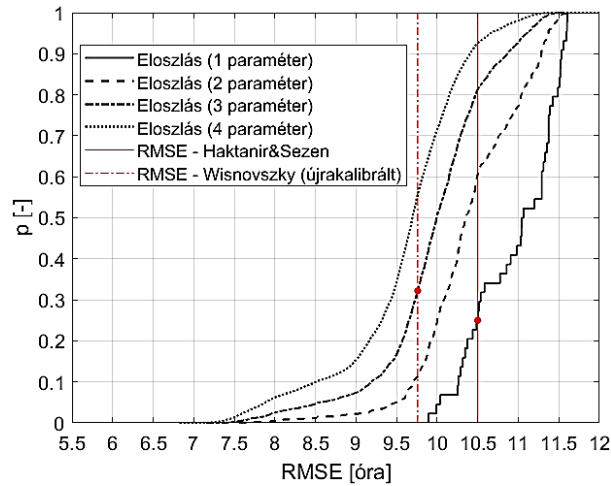


8. ábra. A vizsgált morfológiai paraméterek korrelációs mátrixa (zöld: $r \geq 0,8$, narancs: $0,8 > r \geq 0,5$, szürke: $0,5 > r$) és a leghosszabb lineáris korrelációval rendelkező paraméterek és az összegyülekezési idő grafikonjai (jobb felső sarok)
 Figure 8. Correlation matrix of the morphometric parameters (green: $r \geq 0,8$, orange: $0,8 > r \geq 0,5$, gray: $0,5 > r$) along with the plots of the morphometric parameters and the time of concentration showing the strongest correlation (top right corner)

Véletlenszerű paraméterkombinációk vizsgálata

A 47 elemű paraméterhalmaz elegendően kicsi ahhoz, hogy lehetőség legyen 1-4 paraméter alkalmazásával az összes lehetséges paraméterkombinációt vizs-

gálni. Az összes kombináció vizsgálatával előállítottuk a négyzetes középhibák eloszlásfüggvényeit (9. ábra), amik biztosították az eredmények összehasonlíthatóságát.



9. ábra. A négyzetes középhiba (RMSE) eloszlása 1-4 morfológiai paraméter alkalmazása esetén
 Figure 9. Cumulative distribution functions of the RMSE values using different number of parameters

A 6. táblázat tartalmazza a) a már létező empirikus összefüggések, b) a korreláció vizsgálatával azonosított paraméterek használatával kalibrált összefüggések, c) a fő-

komponens analízis eredményeként azonosított paraméterek használatával és d) a véletlenszerű kiválasztáson keresztül azonosított, optimális paraméterkombinációkat.

6. táblázat. Empirikus összefüggések összehasonlító táblázata
 Table 6. Performance of the different empirical equations

Módszer	RMSE [óra]	AIC [-]	Morfológiai paraméterek száma [db]	Eltérés az optimum-tól [%]	Eltérés a Wisnovszky-képlet hibájától [%]	Jobb paraméter választás esélye [%]	Egyenlet
Wisnovszky	15,2	340	3 <i>L, A, S</i>	52,1	0,0	100	$\tau [perc] = \frac{L^2}{\sqrt{A \cdot S}} \cdot (1,04 - \frac{A}{5850})$
Salcher	12,3	312	2 <i>L, S</i>	38,4	-19,3	100	$\tau [perc] = \frac{1}{600} \cdot \frac{L}{\sqrt{S}}$
Ventura	12,4	315	3 <i>A, L, H</i>	41,1	-18,7	100	$\tau [óra] = 4 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot L}{H}}$
Haktanir&Sezen	10,5	291	1 <i>L_{max}</i>	5,72	-31,0	25	$\tau [óra] = 0,7473 \cdot L_{max}^{0,841}$
Wisnovszky (újralibrált)	9,76	286	3 <i>L, A, S</i>	25,4	-35,8	32,2	$\tau [óra] = \frac{L^{0,281} \cdot A^{0,0068}}{S^{0,38}}$
Főkomponens analízis	10,3	289	1 <i>L</i>	4,35	-32,0	15,9	$\tau [óra] = 2,06 \cdot L^{0,584}$
	9,33	278	2 <i>L, H_{max}</i>	19,0	-38,6	11,7	$\tau [óra] = 2,98 \cdot \frac{L^{0,690}}{H_{max}^{0,371}}$
	9,20	279	3 <i>L, H_{max}, R_c</i>	20,9	-39,5	28,2	$\tau [óra] = 2,39 \cdot \frac{L^{0,859} \cdot R_c^{0,612}}{H_{max}^{0,434}}$
	9,20	281	4 <i>L, H_{max}, R_c, C_m</i>	25,9	-39,5	48,3	$\tau [óra] = 2,44 \cdot \frac{L^{0,857} \cdot R_c^{0,622}}{H_{max}^{0,430} \cdot C_m^{0,0915}}$
Lineáris korreláció	9,99	285	1 <i>S</i>	1,00	-34,3	2,27	$\tau [óra] = \frac{15,6}{S^{0,546}}$
	9,61	282	2 <i>C, S</i>	21,3	-36,8	6,67	$\tau [óra] = 4,65 \cdot \frac{C^{1,545}}{S^{0,395}}$
	8,41	268	3 <i>C, S, H</i>	13,4	-44,7	4,17	$\tau [óra] = 3460 \cdot \frac{C^{2,08}}{S^{0,182} \cdot H_{mean}^{1,288}}$
	8,30	268	4 <i>P, H_{mean}, R_{r,m}, D_i</i>	17,8	-45,4	8,31	$\tau [óra] = 2227 \cdot \frac{P^{2,08}}{H_{mean}^{0,141} \cdot R_{r,m}^{1,15} \cdot D_i^{0,148}}$
Optimum	9,89	284	1 <i>H_{mean}</i>	0,0	-34,9	0	$\tau [óra] = \frac{107204}{H_{mean}^{1,62}}$
	7,56	253	2 <i>H_{mean}, L</i>	0,0	-50,3	0	$\tau [óra] = 14745 \cdot \frac{H_{mean}^{0,771}}{L^{1,74}}$
	7,28	250	3 <i>H_{max}, H_{mean}, S</i>	0,0	-52,1	0	$\tau [óra] = 799 \cdot \frac{H_{max}^{1,66}}{H_{mean}^{2,59} \cdot S^{0,726}}$
	6,82	244	4 <i>P, R_{r,m}, H_{mean}, D_i</i>	0,0	-55,1	0	$\tau [óra] = 1118 \cdot \frac{P^{2,15} \cdot R_{r,m}^{1,79}}{H_{mean}^{3,15} \cdot D_i^{3,61}}$

Az egyes esetekben alkalmazott paraméterek száma mellett megtalálható a táblázatban, hogy a Wisnovszky képlethez képest hány százalékkal tér el az egyes összefüggések becslése, hány százalékban tér el az adott paraméterszám mellett optimumhoz képest az adott összefüggés hibája, illetve hogy az eloszlásfüggvények alapján hány százalék az esély arra, hogy jobb paraméterkombinációt lehet találni az adott összefüggéshez képest. A becslés hibája több mint felére csökkenthető a megfelelő paraméterkombináció használatával a Wisnovszky képlethez képest, de csupán a Wisnovszky képletben szereplő paramétereket megtartva, a kitevők kalibrálásával is 25,4%-kal jobb eredményt kaphatunk. A vizsgált, már létező összefüggések is jobb eredményre vezetnek, mint a Wisnovszky képlet, noha a Salcher képlet, a Ventura-féle összefüggés, illetve Haktanir és Sezen összefüggése esetén is van lehetőség jobb paraméterkombinációk alkalmazására. Haktanir és Sezen összefüggésében egyetlen paraméter szerepel és az eredeti összefüggés is viszonylag közel áll az egy paraméteres optimumhoz. A főmeder hossza helyett azonban a vízgyűjtő átlagos magasságával kapható a legjobb eredmény. Ez a paraméter minden esetben szerepel az optimális összeállításban, közvetlen kapcsolata az összegyülekezési idő értékével azonban nem egyértelmű. Vélhetően az átlagos magasság és az összegyülekezési idő között áll fenn a legszorosabb nem-lineáris kapcsolat. Korábban *Pirkhoffer és Czigány (2010)* is mutatott ki szoros kapcsolatot a vízgyűjtők átlagos magassága és az empiriával számított, 5%-os előfordulási valószínűségű mértékadó vízhozam értéke között (bár kisebb adathalmaz esetén).

Empirikus képletek összehasonlítása

A lineáris korrelációs vizsgálat során kiválasztott paraméterek jobb eredményre vezettek, mint a főkomponens analízis végeredményeként azonosított paraméterek. Előbbi esetében akár 10%-kal is több lehet a hiba javulása a Wisnovszky képlethez képest, azonban mindkét esetben lehetséges jobb paraméterkombinációt találni. Ennek esélye a korreláció elemzés során azonosított paraméterek esetén 2,27-8,31%, míg a főkomponens analízis eredményeként azonosított paraméterek esetén 15,9-48,3%. A különböző modellek relatív információ veszteségének számszerűsítésére alkalmas az Akaike-féle információs kritérium (*Akaike information criterion, AIC*), melynek képlete: $AIC = n \cdot \ln(RMSE^2) + 2 \cdot k$, ahol AIC [-] az Akaike-féle információs kritérium, n [-] a mintaelemszám, $RMSE$ [hr] a négyzetes középhiba, k [-] az adott összefüggésben kalibrálandó paraméterek száma (*Fox 2016*). Utóbbi jelen esetben mindig az egyenletben szereplő morfológiai paraméterek darabszámánál eggyel több, a korábban feltüntetett hatványkitevős, általános alaknak megfelelően. Minél kisebb a mutató értéke, annál hatékonyabb az összefüggés a paraméterszám és a becslés hibája tekintetében. Látható, hogy a Wisnovszky-féle összefüggés a legkevésbé hatékony, míg a négy paraméteres optimum a leghatékonyabb összefüggés. A lineáris korreláció esetén a két-, illetve háromparaméteres, az optimális esetben az egy-, illetve kétparaméteres változat esetén figyelhető meg nagyobb (~10%-os) hatékonyság-növekedés, míg a főkomponens analízis esetén a hatékonyság nem változott számottevően a paraméterszám növelésével.

ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatok eredményei alapján elmondható, hogy az összegyülekezési idő számítására leggyakrabban alkalmazott Wisnovszky-féle összefüggés felülvizsgálata erősen javasolt. A grafikus definíciók vizsgálata során az ECMWF re-analízis adatbázisának csapadék idősorai a vizsgálatok végzésére alkalmasnak bizonyultak. A definíciók vizsgálata során kimutatható különbség mutatkozott az összegyülekezési idő és az egyensúly beálltáig eltelt idő között, ami indokolja a két fogalom hazai szaknyelvben való elkülönítését. A későbbi alkalmazásra javasolt grafikus definíció a csapadék és a vízhozam idősor maximuma között eltelt idő. Ez a definíció ugyan eltér a leggyakrabban alkalmazott definícióktól, azonban előnye, hogy: a) számításához nincs szükség a felszíni lefolyás és a lefolyást kiváltó csapadék szeparálására (ezzel növelve az eredmények összehasonlíthatóságát), és b) rövidebb időket ad eredményül, amelyre felállítva egy új empirikus összefüggést, csökkenthető az árvízi kockázat a tervezés és árvízvédekezés során. A vizsgálatok alapján kimutattuk, hogy az összegyülekezési idő becslésének hibája (a javasolt definícióval számított mért értékekhez képest) több mint felére csökkenthető a megfelelő morfológiai paraméterek alkalmazásával. A paraméterek átfogó vizsgálata rámutatott arra, hogy a főkomponens analízis és a lineáris korreláció vizsgálata nem vezet szükségszerűen az optimális paraméterek kiválasztásához. Az empirikus összefüggésben alkalmazott paraméterek számának változtatása során a három paraméteres egyenletek alkalmazása bizonyult a legjobbnak, több paraméter bevonása csak viszonylag kis javulást eredményezett.

Későbbiekben tervezzük az összegyülekezési idő számításának elvégzését a Chézy-képletre és a kinematikus hullámegyenletre alapozva. A fizikai alapú megközelítés hátránya, hogy olyan hidraulikai paraméterek felvétele is szükséges, amelyekre igen érzékeny lehet az eredmény (pl. Manning-féle érdesség). Azonban ennek hatását érzékenységvizsgálaton keresztül figyelembe véve, az így kapott eredmények érdemben összehasonlíthatók lesznek az itt bemutatott eredményekkel. A továbbiakban célszerű kalibráció helyett keresztvalidációt végezni az összefüggések pontosságának számszerűsítésére. Lehetőség van mindemellett a vízgyűjtők csoportosíthatóságának vizsgálatára, aminek révén várhatóan tovább javítható az összegyülekezési idő becslésének pontossága. Annak érdekében, hogy számszerűsíthetővé váljon a haszna egy pontosabb empirikus összefüggésnek a tervezői gyakorlatban, javasolt az új összefüggés(ek) hatásának vizsgálata különböző gyakorlati alkalmazások esetére.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BMEFIKP-VÍZ tématerületi programja keretében. Köszönet illeti továbbá az adatszolgáltatásban nyújtott segítségéért a Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, az Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, az Észak-magyarországi Vízügyi Igazgatóság, a Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság, a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, és a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság munkatársait.

IRODALOMJEGYZÉK

- Abdel-Fattah M., Saber M., Kantoush S. A. (2017). A Hydrological and Geomorphometric Approach to Understanding the Generation of Wadi Flash Floods. *Water*, 9(7), p. 553.
- Al-Rawas G. A. és Valeo C. (2010). Relationship between wadi drainage characteristics and peak-flood flows in arid northern Oman. *Hydrological Sciences Journal*, 55(3), 377–393.
- Azizian A. (2019). Comparison of salt experiments and empirical time of concentration equations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 172(3), 109–122.
- Beven K. J. és Kirkby M. J. (1993). *Channel Network Hydrology*. Wiley, University of Michigan.
- Beven K. J. (2020). A history of the concept of time of concentration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 2655–2670.
- Black P. E. (1972). Hydrograph Response to Geomorphic Model Watershed Characteristics and Precipitation Variables. *Journal of Hydrology*, 14(7), 309–329.
- Chorley R. J., Malm D. E. G., Pogorzelski H. A. (1957). A new standard for estimating drainage basin shape. *American Journal of Science*, 255(2), 138–141.
- Chow V. T. (2010). *Applied Hydrology*. Reprint. Tata McGraw-Hill Education.
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2019). C3S ERA5-Land reanalysis. Copernicus Climate Change Service. 2019.08.16. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Dingman S. L. (2015). *Physical Hydrology*. 3rd edn, Waveland Press, Long Grove, Illinois.
- Efstratiadis A., Koussis A., Koutsoyiannis D., Mamassis N. (2014). Flood design recipes vs. reality: can predictions for ungauged basins be trusted? *Natural Hazards and Earth System Science*, 14(6), 1417–1428.
- Fox J. (2016). *Applied Regressions Analysis and Linear models*. 3rd edn, McMaster University, Canada.
- Gericke O. J. és Smithers J. C. (2016). Are estimates of catchment response time inconsistent as used in current flood hydrology practice in South Africa? *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 58(1), 02–15.
- Grimaldi S., Petroselli A., Tauro F., Porfiri M. (2012). Time of concentration: a paradox in modern hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 217–228.
- Grimaldi S. és Petroselli A. (2015). Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal*, 60(1), 67–77.
- Haktanir T. és Sezen N. (1990). Suitability of two-parameter gamma and three-parameter beta distributions as synthetic unit hydrographs in Anatolia. *Hydrological Sciences Journal*, 35(2), 167–184.
- Horton R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361.
- Horton R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *GSA Bulletin*, 56(3), 275–370.
- Internet 1: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1?tab=download> [Utolsó megtekintés: 2020.06.14.]
- Jolánkai Zs. és Koncsos L. (2018). Base flow index estimation on gauged and ungauged catchments in Hungary using digital filter, multiple linear regression and artificial neural networks. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(2), 363–372.
- Kaufmann de Almeida I., Kaufmann Almeida A., Garcia Gabas S., Alves Sobrinho T. (2017). Performance of methods for estimating the time of concentration in a watershed of a tropical region. *Hydrological Sciences Journal*, 62(14), 2406–2414.
- Kerby W. S. (1959). Time of concentration for overland flow. *Civil Engineering*, 29(3), 174.
- Kontur I., Koris K., Winter J. (2003). *Hidrológiai számítások*. 3. kiadás, Linográf Kft., Gödöllő.
- Lagro J. (1991). Assessing patch shape in landscape mosaics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(3), 285–293.
- Laurenson E. M. (1964). A catchment storage model for runoff routing. *Journal of Hydrology*, 2(2), 141–163.
- Loukas A. és Quick M. C. (1996). Physically-based estimation of lag time for forested mountainous watersheds. *Hydrological Sciences Journal*, 41(1), 1–19.
- Mattányi Z., Homolya E., Turczy G. (2015). *A klímaváltozás hatása a villámárvíz kockázatra*, D4.10 kutatási jelentés.
- McCuen R. H. (2009). Uncertainty Analyses of Watershed Time Parameters. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(5), 490–498.
- Melton M. A. (1965). The Geomorphic and Paleoclimatic Significance of Alluvial Deposits in Southern Arizona. *The Journal of Geology*, 73(1), 1–38.
- Michailidi E. M., Antoniadi S., Koukouvinos A., Bacchi B., Efstratiadis A. (2018). Timing the time of concentration: shedding light on a paradox. *Hydrological Sciences Journal*, 63(5), 721–740.
- Miller V. C. (1953). A Quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin Characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee. Department of Geology, Columbia University.
- Mueller J. E. (1968). An introduction to the hydraulic and topographic sinosity indexes. *Annals of the Association of American Geographers*, 58(2), 371–385.
- Nagy E. D., Torma P., Bene K. (2016). Comparing Methods for Computing the Time of Concentration in a Medium-Sized Hungarian Catchment. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 24(4), 8–14.
- Nathan R. J. és McMahon T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26(7), 1465–1473.
- Pike R. J. és Wilson S. E. (1971). Elevation-Relief Ratio, Hypsometric Integral, and Geomorphic Area-Altitude Analysis. *GSA Bulletin*, 82(4), 1079–1084.
- Pirkhoffer E. és Czigány S. (2010). Nagy adatbázison alapuló, GIS típusú árvízi előrejelzési modell. *Térinformatikai konferencia és szakkiallítás 2010*, 325–334.
- Rosenauer F. (1946). *Wasser und Gewässer in Oberösterreich – Monografien Allgemein – 0238*.
- Schumm S. A. (1956). Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. *GSA Bulletin*, 67(5), 597–646.
- Serinaldi F. és Grimaldi S. (2011). Synthetic design hydrographs based on distribution functions with finite support. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5), 434–446.
- Singh M. és Yousuf A. (2000). *Watershed Hydrology, Management and Modelling*. CRC Press.
- Singh S. és Dubey A. (1994). Geo-environmental planning of watersheds in India.

Smith K. G. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. *American Journal of Science*, 248(9), 655–668.

Strahler A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920.

Szilágyi J., Harvey F. E., Ayers J. F. (2003). Regional Estimation of Base Recharge to Ground Water Using Water Balance and a Base-Flow Index. *Ground Water*, 41(4), 504–513.

Torma P., Széles B., Hajnal G. (2014). Applicability of different hydrological model concepts on small catchments: Case

study of Bükkös Creek, Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 10(1), 77–90.

V. Nagy I. (1978). *Hidrológia III*. Budapesti Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Budapest.

Wisnovszky I. (1958). Az összegyülekezési idő számítása. *Hidrológiai Közöny*, 38. évf. 3. szám, pp. 195–200.

Zhang S., Liu C., Yao Z., Guo L. (2007). Experimental study on lag time for a small watershed. *Hydrological Processes*, 21(8), 1045–1054.

Zsuffa I. (1996). *Műszaki hidrológia III*. Műegyetemi Kiadó, Budapest.

A SZERZŐK



NAGY ESZTER DÓRA 2018-ban szerzett okleveles infrastruktúra-építőmérnök diplomát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karán. Jelenleg ugyanitt a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék harmadéves doktorandusz hallgatója. Kutatási témája kisvízgyűjtők csapadék-lefolyás kapcsolatának modellezése. 2016 óta a Magyar Hidrológiai Társaság tagja.



SZILÁGYI JÓZSEF Okleveles meteorológus, PhD. 1997-ben doktorált hidrológiai tudományokból a Kaliforniai Egyetemen. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének egyetemi tanára, a Journal of Hydrology szerkesztőbizottsági tagja. Fő kutatási témája a területi párolgás.

Egydimenziós nempermanens számításokhoz szükséges minimális folyóhossz közelítő meghatározása. 2. rész: A feladat gyakorlati megoldása

Rátky István

nyugalmazott egyetemi docens (Email: iratky@gmail.com)

Kivonat

A szabadfelszínű, fokozatosan változó 1D nempermanens vízmozgás számítása során az alsó határfeltétel pontatlansága folyásirányba felfelé terjedve, egyre hosszabb folyószakaszon hibás számításokat eredményezhet. Ezt számszerűen is bizonyítottuk egy előző tanulmányunkban. A hullámél folyásirányban vagy ellentétesen terjedő sebességeit (v_{el} , v_{ell}) és a hullámtetőpont ($v_{tető}$) haladási sebességét széles geometriai és hidraulikai jellemzőket átölelő (1. táblázat) 1D-s nempermanens számítások alapján határoztuk meg. Ezek alapján v_{el} , v_{ell} és $v_{tető}$ becsléseire a geometriai és a hidraulikai változóktól (S_o , k_{st} , H_{min} , int stb.) függő többváltozós lineáris regressziós összefüggéseket adtunk. A 2-4. táblázatok a felvett – prizmatikus medrű – geometriai változók mellett a nempermanens számítás alapján meghatározott levonulási sebességeket mutatják, melyeket a 3. ábrában valamint az 5. és 6. táblázatban közölt regressziós együtthatók felhasználásával becsültünk. Az eredmények alapján gyakorlati kérdésekre tudtunk becslést adni:

- Egy adott árhullámnál milyen hosszú (jelenség) ideig számolhatunk, ha azt szeretnénk, hogy a teljes számításba bevont folyóhosszon az alsó határfeltétel pontatlansága ne okozzon hibát a számított vízszintekben?
- Mekkora folyóhosszt kell bevonni a számításba ahhoz, hogy egy adott árhullámnál, egy kívánt hosszra ne kövessünk el hibát a Z_{max} -ok számításában (2. egyenlet)?
- Adott hosszúságú folyón, egy adott árhullám tetőző vízszintjeit milyen hosszra tudjuk hiba nélkül meghatározni, és ehhez milyen hosszú jelenség ideig lehet számolnunk (3. és 4. egyenletek)?

Kulcsszavak

Szabadfelszínű fokozatosan változó, egydimenziós, nempermanens vízmozgás, numerikus módszer, határfeltételek, hullámél-sebesség, tetőpont-sebesség, Tisza.

Approximate determination of the minimum river length required for one-dimensional unsteady flow calculation. Part 2: A practical solution to the problem

Abstract

When calculating the free-surface, gradually varying 1D non-permanent water flow, the inaccuracy of the lower boundary condition propagating upstream, can result in erroneous calculations over a long river section. This was numerically demonstrated in a previous study. The velocities of the wave edge propagating in the flow direction or in the opposite direction (v_{el} , v_{ell}) and the wave peak ($v_{tető}$) were determined from 1D non-permanent calculations embracing a wide range of geometrical and hydraulic characteristics (Table 1). To estimate the velocities calculated in this way, multivariate linear regression relationships depending on the geometric and hydraulic variables (S_o , k_{st} , H_{min} , int , etc.) were given. Tables 2-4 show the travelling velocities determined from non-permanent calculation, using the regression coefficients given in Figure 3 and Tables 5 and 6. Based on the results, we were able to give estimation for practical questions:

- For how long (phenomenon) can we calculate for a given flood wave if we want the inaccuracy of the lower boundary condition on the river length included in the total calculation not causing an error in the calculated water levels?
- How much river length should be included in the calculation in order not to make an error in the calculation of Z_{max} for a given flood wave at a desired length (Equation 2)?
- On a river of a given length, for how long can the peak water level of a given flood wave be determined without error and for how long can we calculate the time for this phenomenon (Equations 3 and 4)?

Keywords

Free-surface gradual, one-dimensional, unsteady flow, numerical method, boundary conditions, flood-wave travel velocities.

BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

Arra keressük a választ, hogy szabadfelszínű egydimenziós (1D) fokozatosan változó nempermanens vízmozgások numerikus számításánál, *milyen hosszú folyó-szakaszt kell bevonni a számításba ahhoz, hogy az alsó határfeltétel elkerülhetetlen közelítése ne okozzon a vízszintek meghatározásában elfogadhatatlan hibát?* Egy korábban megjelent szakcikkből azonos főcímmel, „A feladat és annak elméleti megoldási lehetősége” alcímmel ismertettük a kialakuló jelenség főbb jellemzőit, a felmerülő nehézségeket és bemutattuk, hogy elméletileg szabatos megoldás nem lehetséges (Rátky 2020), továbbiakban erre ’előző tanulmány’ vagy ’előző cikk’-ként hivatkozunk). Jelen tanulmányban az általunk ajánlott közelítő, gyakorlatban alkalmazható

megoldást mutatjuk be. Ha sikerül megbecsülni az árhullám két jellegzetes pontjának, az árhullám körömpontjának, más néven hullámélnek (folyás iránnyal megegyező v_{el} vagy azzal ellentétes irányú v_{ell}) és a tetőpontjának (azonos irányú $v_{tető}$) a hossz menti előrehaladási sebességét, akkor a számítandó jelenségidő ismeretében a szükséges hossz meghatározható.

A SZÁMÍTÁS MATEMATIKAI ALAPJA

A levonulási sebességeket az 1D szabadfelszínű, fokozatosan változó nempermanens vízmozgás alapegyenleteinek megoldása után kapott eredmények felhasználásával határoztuk meg. A számításokat a HEC-RAS programcsomag futtatásával, $\Delta x = 1000$ m és $\Delta t = 60$ s tér és időbeni diszkrétizációt alkalmazva végeztük. Az alap-eredm-

nyekből – a vízhozam, $Q(x,t)$ és a vízszint, $Z(x,t)$ függvények diszkrét pontbeli értékeiből – a geometria ismeretében minden számunkra szükséges hidraulikai paraméter meghatározható (*Delft3D-Flow 2016, HEC-RAS 2016, HEC-DSSVue 2010*).

Előzetes vizsgálataink megmutatták, hogy egy 500 km-es folyóhossz esetén („500 km-es számítások”) 0 km-nél megadott alsó határfeltétel pontatlansága (hibája) biztosan nem befolyásolja a felső 300 km-es folyószakasz számított jellemzőit. Az extrém kis fenékeséseket is figyelembe véve, az alsó-határfeltétel hibájától mentes *levonulási sebességeket* – biztonságból – *csak a legfelső 100 km-es folyószakasz számított vízszint eredményeiből határoztuk meg*. Ezt hasonlítottuk össze a rövidebb ($L < 500$ km) vízfolyásokon végzett számítások szint eredményeivel.

Fontossága miatt megismételjük az előző tanulmányunkban a hibáról írottakat: mindig két vízszint vagy vízmélység (dZ vagy dH) különbséget értünk alatta. Általánosságban egy pontosabb, a valóságot jobban közelítő és egy pontatlanabb – több közelítést megengedő – feltételezés alapján, *mindig 1D nempermanens modellekből számított szintek különbségeként értelmezzük* a hibát. Tehát az összehasonlítás alapja soha sem a tényleges, valós ár hullám levonulása alatt előforduló, csak mérési hibával terhelt (mért, észlelt) érték, vagy az elméletileg „helyes” érték volt.

A később megadott eredmények értelmezéséhez egy *nagyon lényeges körülményt* kell hangsúlyozni: az *500 km-es számításoknál* azt tételeztük fel, hogy *a hidraulikai jelenség alulról befolyásolatlan*. Nincs műtárgy vagy mellékfolyó által okozott duzzasztó vagy leszívó hatás, még a természetben meglévő geometriai nemprizmatikuság sem befolyásolja a levonulási sebességeket. A természetben előforduló fokozatos mederszűkület – leegyszerűsítve – egyrészt a duzzasztás

által lassítja a levonulást, majd a szűkületben a nagyobb sebesség miatt gyorsítja azt. A hirtelen vagy fokozatosan változó meder-bővület vagy -szűkület nagyon összetett hatást gyakorol a levonulási sebességekre. Ezen alapvető egyszerűsítés mellett is – mint később látni fogjuk – nagyon szóródó nehezen algoritmizálható levonulási sebességeket kaptunk.

ADATOK

Miután (az előző tanulmányunkban) láttuk, nem tudunk olyan zárt összefüggést meghatározni, mely elfogadható pontossággal megadja a v_{el} hullámél vagy $v_{tető}$ tetőpont előrehaladási sebességét, ezért más utat kerestünk a hibamentes (legalábbis az alsó határfeltétel hibájától mentes) számításokhoz szükséges, elégséges folyóhossz becsléséhez. *Széles geometriai és hidraulikai jellemzőt átölelő számításokat végeztünk*, melyek eredményeiből *statisztikai módszerrel* próbálunk *általánosítható, közelítő összefüggéseket* előállítani. Nem gondoljuk, hogy a természetben előforduló összes lehetséges, a hossz mentén nemprizmatikus csatorna, természetes folyó vagy folyam (továbbiakban közös névvel: folyó) esetére tudunk adni előrehaladási sebességeket. Számításainkat *prizmatikus, egyszerű* (hullámtér nélküli) és *összetett* (hullámterest) keresztmetszvényű folyókon végeztük. A felvett geometriai és hidraulikai jellemzőket az *1. táblázatban* foglaltuk össze. Fenékesés széles tartományban mozgott $S_o = 2,5-30$ cm/km (ezek a hegyi patakok kivételével gyakorlatilag átölelik a leggyakoribb hazai viszonyokat). A *főmeder* szélessége a partélnél $B_{fm,max} = 45-95, 100, 150$ és 200 m, mélysége $H_{fm,max} = 5,5-12,5$ m, simasága (simasági együtthatója) $k_{St,fm} = 25-41$ m^{1/3}/s között változott. A *hullámtér* szélessége $B_{ht,max} = 45-95, 520, 1400$ és 1500 m, maximális mélysége $1,5-11,5$ m, simasága $k_{St,ht} = 5-35$ m^{1/3}/s között változott. A táblázat két utolsó sorában a számított v_{el} és v_{ell} értékek intervallumait is megadtuk.

1. táblázat. A számításokhoz felhasznált folyók geometriai és hidraulikai változóinak intervallumai
Table 1. Intervals of geometric and hydraulic variables of the rivers used for the calculation

Paraméter		„Egyszerű” (26 db)	„Fm-ből induló” (16 db)	„csak Hullámtér” (16 db)
S_o	cm/km	2,5; 5,0; 30	2,5; 5; 20; 30	2,5; 5; 10; 15; 20; 30
B (vítükör sz.)	m	45-95; 100; 200	150/1400; 200/1500	45-95; 1500
$k_{Str,fm}$	m ^{1/3} /s	25; 30; 37; 40	30; 33; 40	30; 35; 40
$k_{Str,ht}$	m ^{1/3} /s		5; 10; 20	10; 20; 25; 30; 35
T_{Qrad}	d	1,0 - 9,0	2,0 - 10,0	2,0 - 5,0
$H_{pr,min}$	m	1,0 - 4,0	2,0 - 7,5	3,0 - 8,75
$H_{pr,max}$	m	5,5 - 12,5	6,0 - 12,5	10,0 - 14,5
ΔH	m	4,0 - 9,0	3,0 - 9,5	4,0 - 11,5
int (intenzitás)	m/d	0,8 - 5,5	0,5 - 2,5	0,95 - 4,25
$Q_{pr,min}$	m ³ /s	25 - 446	102 - 962	64 - 1346
$Q_{pr,max}$	m ³ /s	543 - 3521	1485 - 8155	837 - 8938
$v_{fm,min}$	m/s	0,12 - 1,11	0,33 - 1,13	0,58 - 1,25
$v_{fm,max}$	m/s	0,42 - 2,40	0,71 - 2,13	0,86 - 3,03
$v_{ksz,max}$	m/s	0,42 - 2,40	0,33 - 1,04	0,36 - 2,51
v_{el}	km/h	2,69 - 9,37	4,33 - 13,64	3,08 - 8,28
$v_{tető}$	km/h	2,52 - 12,37	4,40 - 26,61	1,53 - 11,65

A számítást, minden folyóhossz esetében azonos típusú peremfeltétel mellett végeztük. *Felső határfeltétel*ként – a legfelső szelvényben – a $Q(t)$ vízhozamot koszinusz függvényvel közelítettük. Ennek általános formáját „A feladat és annak elméleti megoldási lehetősége” alcímű tanulmányunkban adtuk meg. A vízhozam áradási idő $T_{Qárad}$ 2-10 nap között változott, az apadási idő általában $(2-3) \cdot T_{Qárad}$ volt, (de volt egy-két számítás $4 \cdot T_{Qárad}$ idővel is). A minimális és maximális vízhozamokat ($Q_{pr,min}$, $Q_{pr,max}$) az előre felvett vízmélységekhez ($H_{pr,min}$, $H_{pr,max}$) permanens állapotot feltételezve határoztuk meg. Az átfogott vízmélység és vízhozam intervallumok: 1-14,5 m és 25-8938 m³/s voltak. *Alsó határfeltétel* a vízhozamhoz és a fenékesítéshez tartozó normál mélység volt – ami most megegyezik a permanens $Q-H$ görbével. *Kezdeti feltétel* minden változatnál a fenékesítésnek és a geometriának megfelelő H_{min} és $Q_{pr,min}$ -hoz tartozó permanens egyenletes állapot volt. A nempermanens számítás előtt, a felvett permanens változókból még egy jellemzőt származtattunk, az áradás intenzitását $int = (H_{pr,max} - H_{pr,min}) / T_{Qárad}$ összefüggésből számítottuk ($int = 0,5-5,5$ m/d). Meg kell jegyezni, hogy ezek az értékek a teljes áradási időre vonatkozó átlagos értékek, a pillanatnyi intenzitás értékek ezekről nagyon eltérőek lehetnek. A számított vízmélység változás eltér a tényleges nempermanens $H_{np,max} - H_{np,min}$ értéktől. A nempermanens hurokgörbe természetéből adódóan a $H_{np,max}$ mindig kisebb, min $H_{pr,max}$ (lásd az előző tanulmány 3. ábráját). A $T_{Qárad}$ a maximális vízhozam áradás idejére vonatkozik, ami szintén eltér a maximális nempermanens vízszint értékek áradási idejétől. Összességében a nempermanens vízszintekre vonatkozó átlagos intenzitás érték mindig kisebb lenne, mint a fenti módon megadott érték.

A számítási változatok meder-geometriai és a nempermanens peremfeltételi adatait a 2-4. táblázatok az 1-13. oszlopaiban láthatjuk. Az adatok alapján megkülönböztetett *változatok száma 58 db*, ugyanakkor több változatnál nem csak az 500 km-es számítást végeztük el, hanem 100, 200, 300 km-est is, így *több mint 120 db 1D nempermanens számítást* végeztünk.

A NEMPERMANENS SZÁMÍTÁS EREDMÉNYEI

A hullám levonulási sebességek szempontjából érdemes külön vizsgálni három jelenséget:

- a csak a főmederben levonuló, „Egyszerű”,
- a főmederből induló, de a hullámtérre is kijutó, „ F_m -ből induló” és
- a csak a hullámtéren levonuló „csak Hullámtér” ár-hullámokat,

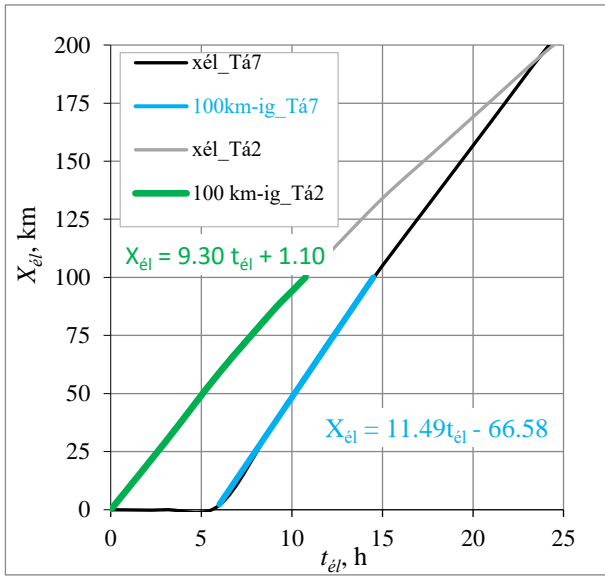
melyekre a továbbiakban az idézőjeles nevekkel hivatkozunk.

A 2-4. táblázatokban összefoglaltuk a vizsgált változatok *főbb jellemzőit és a lényegesebb eredményeket* is. A

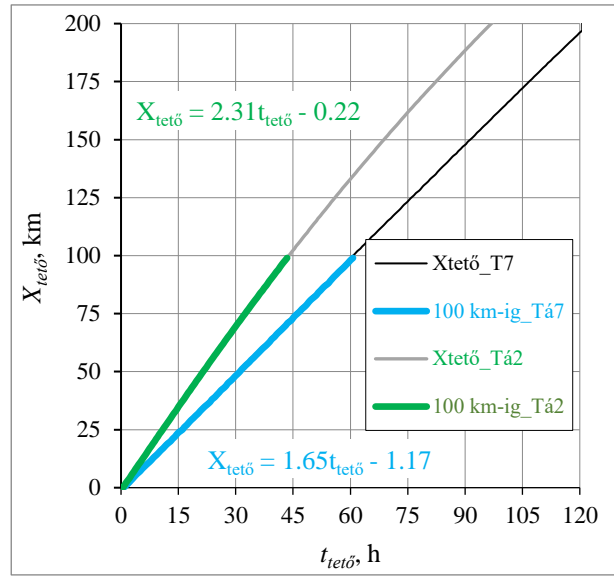
táblázatok szerkezete hasonló, kisebb eltérés csak a hullámtér léte vagy nem léte miatt van. Úgy gondoljuk, hogy a fejlécben megadott jelölések egyértelműen azonosítják az oszlop tartalmát. Az első 13 oszlopban, a sorszám mellett, az 1. táblázattal kapcsolatban már ismertetett változók vannak, melyek – geometriailag és a peremfeltételek szempontjából – egyértelműen azonosítják a változatokat. Ezek, a részletes számítások előtt felvett változók egy vastagított függőleges, szaggatott vonallal vannak elválasztva a nempermanens számításokból kapott értékektől. A nempermanens számításokból a középsebességek a szelvényrészekre és a teljes keresztmetszetre lettek meghatározva, v_{min} , v_{max} , $v_{fm,0}$, $v_{tot,0}$, $v_{tot,max}$, $v_{ht,max}$, ahol az alsó indexek jelentése: min és max a szélső értékekre, fm a főmederre, ht a hullámtérre, 0 a kezdeti értékre, tot a teljes keresztmetszvény középsebességére utal, (az *Egyszerű* mederalaknál külön nem jelöltük fm -et). A következő oszlopban a $T_{Zet0,500}$ a felső határfeltételi szelvényben (500. km) a vízszint tetőzésének idejét adjuk meg. A „nempermanencia” miatt ennek mindig nagyobbak kell lenni, mint a vízhozam tetőzést $T_{Qárad}$ előírt értéke (lásd a nempermanens $Q-H$ görbén az előző tanulmányunk 3. ábráján).

A $v_{él}$ fejlécű oszlopban az előbb hivatkozott tanulmányunkban definiált *hullámél* számított *levonulási sebességeit* adtuk meg. A koszinusz függvényvel közelített felső határfeltétel különösen akkor, amikor $T_{Qárad} > 3$ d, lassan, több napon keresztül kevesebb, mint 1 cm-t emeli a vízszintet (pontosabban most a hidraulikus közép mélységet). Ennek eredményeként – ilyen esetben – az első 3-6 napon az általunk definiált hullámél még „nem indult el”. Példaként az 1. ábrán bemutatjuk egy $T_{Qárad} = 2$ d és egy $T_{Qárad} = 7$ d változat esetén – a felső határfeltételi szelvény alatt – 100 km-ig érvényesnek tekintett a $v_{él}$ meghatározását. A függőleges tengelyre a hullámél 500. km-től számított relatív helyét ($x_{él}$), a vízszintes tengelyre az oda érkezés időpontját ($t_{él}$) adtuk meg. Láthatjuk, hogy 7 napos áradásnál ($x_{él_Tá7}$ jelű görbe) kb. 5 óra után jelenik meg az 500. km alatti első szelvényben ($\Delta x = 1000$ m volt) az 1 cm-es vízszintemelkedés (hidraulikus sugár növekedése). A trendvonalat mindig attól az időponttól indítottuk, amikor valóban történt már vízszintemelkedés, így kaptuk a lineáris trend iránytangenséből 100 km-ig érvényesnek tekinthető $v_{él}$ értéket. A $x_{él_Tá2}$ jelű görbe azt mutatja, hogy 100 km-en túl már általában csökken a hullámél előrehaladási sebessége az ellapulás miatt (az adott változatnál lényegesen, 9,3 km/h-ról 5,5-6,0 km/h értékre).

A *tetőpont előrehaladási sebessége* sokkal kiegyenlítettőbb. A 2. ábrán bemutatjuk a már említett áradásidejű $T_{Qárad} = 2$ d és $T_{Qárad} = 7$ d változatoknál a v_{tet0} származtatását. A gyorsabb áradásnál 100 km után most is lassul a tetőpont előrehaladása (2,31 km/h-ról 350 km után már csak 1,16 km/h).



1. ábra. $v_{él}$ meghatározása $T_{Qárad}=2$ h és $T_{Qárad}=7$ h esetén
 Figure 1. Determination of wavefront velocity for $T_{Qflood} = 2$ h and $T_{Qflood} = 7$ h



2. ábra. $v_{tető}$ meghatározása $T_{Qárad}=2$ h és $T_{Qárad}=7$ h esetén
 Figure 2. Determination of flood wave velocity for $T_{Qflood} = 2$ h and $T_{Qflood} = 7$ h

2. táblázat. „Egyszerű” medernél a vizsgált változatok főbb jellemzői és a számított $v_{él}$ és $v_{tető}$

Table 2. In the case of the “simple” bed, the main features of the studied variants and the calculated $v_{él}$ and $v_{tető}$

m	cm/k	m	m ^{1/3} /s	Hidr. köz.				perm-ből			nper		abs	k, H _{min} , int, V _{min}	V _{min} , V _{max}	100 km-ig	
				d	d	m	m	m	m/d	m ³ /s	m/s	m/s				m/s	d
B	S ₀	k _{str}	T _{Qárad}	T _{Qápad}	H _{min}	H _{max}	ΔH	intz	Q _{min}	Q _{max}	v _{min}	v _{max}	T _{Ztető,500}				
45-95	15	25	2	4	3,0	10,0	7,0	3,50	56	756	0,53	1,09	2,19	5,49	5,78	4,37	5,08
45-95	15	37	2	4	3,0	10,0	7,0	3,50	83	1117	0,79	1,61	2,13	6,73	8,29	6,27	7,58
200	2,5	25	1	3	1,0	6,5	5,5	5,50	25	543	0,12	0,42	1,63	2,84	2,32	2,82	2,52
200	2,5	25	2	4	3,0	12,0	9,0	4,50	153	1458	0,26	0,61	2,66	6,20	3,34	6,12	4,20
200	2,5	25	4	8	3,0	12,0	9,0	2,25	153	1458	0,26	0,61	5,28	5,41	3,34	5,50	3,68
200	2,5	25	5,5	11	2,0	11,0	9,0	1,64	78	1269	0,20	0,58	7,04	3,33	3,06	3,63	3,18
200	2,5	25	9	18	3,0	12,0	9,0	1,00	153	1458	0,26	0,61	11,08	4,97	3,34	4,39	3,09
200	2,5	40	1	3	1,0	6,5	5,5	5,50	40	868	0,20	0,67	1,58	4,72	3,38	3,93	3,80
200	2,5	40	2	4	3,0	12,0	9,0	4,50	245	2333	0,41	0,97	2,68	7,98	5,02	8,43	6,10
200	2,5	40	4	8	3,0	12,0	9,0	2,25	245	2333	0,41	0,97	5,08	7,19	5,02	8,41	5,38
200	2,5	40	5,5	11	2,0	11,0	9,0	1,64	125	2030	0,31	0,92	6,75	5,16	4,57	5,10	4,74
200	2,5	40	9	18	3,0	12,0	9,0	1,00	245	2333	0,41	0,97	10,63	6,75	5,02	6,04	4,50
45-95	30	25	2	4	3,0	10,0	7,0	3,50	79	1120	0,75	1,66	2,08	5,19	8,34	5,86	7,66
45-95	30	25	4	8	3,0	10,0	7,0	1,75	79	1120	0,75	1,62	4,07	4,58	8,20	4,24	8,35
45-95	30	37	2	4	3,0	10,0	7,0	3,50	117	1666	1,11	2,40	2,04	6,30	11,88	6,46	12,4
45-95	30	37	4	8	3,0	10,0	7,0	1,75	117	1666	1,11	2,40	4,04	5,69	11,88	5,73	12,4
200	3	30	5	10	4,0	8,0	4,0	0,80	323	999	0,40	0,63	5,03	7,31	3,86	7,37	3,44
200	5	25	1	3	1,0	5,5	4,5	4,50	35	585	0,18	0,53	1,48	2,42	2,85	2,69	2,66
200	5	25	2	5	2,0	7,9	5,9	2,95	111	1053	0,28	0,67	2,66	3,69	3,61	4,10	3,35
200	5	25	2	5	3,5	12,5	9,0	4,50	279	2201	0,40	0,88	2,71	6,98	4,68	6,97	4,55
200	5	25	5,5	11	2,0	11,0	9,0	1,64	111	1794	0,28	0,82	6,41	3,23	4,11	3,67	3,86
200	5	40	1	3	1,0	5,5	4,5	4,50	56	935	0,28	0,85	1,40	4,27	4,23	3,96	4,10
100	5	40	2	4	3,8	9,65	5,8	2,92	250	1100	0,66	1,14	2,05	8,66	6,32	7,90	7,04
200	5	40	2	5	2,0	7,9	5,9	2,95	177	1685	0,44	1,07	2,52	5,45	5,44	5,81	5,05
200	5	40	2	5	3,5	12,5	9,0	4,50	446	3521	0,64	1,41	2,60	8,65	7,16	9,37	6,75
200	5	40	5,5	11	2,0	11,0	9,0	1,64	177	2871	0,44	1,30	6,15	4,99	6,24	5,05	5,90

3. táblázat. „Fm-ből induló” típusú medernél a vizsgált változatok főbb jellemzői és a számított $v_{él}$ és $v_{tető}$

Table 3. For the "Main_bed_first" type, the main features of the tested variants and the calculated wavefront and flood wave velocities

m	cm/km	$m^{1/3}/s$		d	d	Hidr. kmély. per			perm. szám.		nemp-ből		abs	100 km-ig		
						m	m	m/d	m^3/s	m/s	d	$k_{fm}, H_{min}, int, v_{fm,0}$				$int, v_{tot,max}, v_{ht,max}$
B	S_o	$k_{Str,fm}$	$k_{Str,ht}$	$T_{Qárad}$	T_{Qapad}	H_{min}	H_{max}	$intz$	Q_{min}	Q_{max}	$v_{fm,0}$	$v_{tot,max}$	$v_{ht,max}$	$T_{Ztető,500}$	$v_{él}$	$v_{tető}$
200-1500	20	30	20	2	5	5,0	10,0	2,50	946	8155	1,13	1,04	0,78	2,16	9,70	4,47
150-1400	30	33	5	6	12	2,0	6,0	0,67	191	1874	0,84	0,50	0,15	6,17	4,73	1,57
150-1400	30	40	10	6	12	2,0	6,0	0,67	232	2622	1,02	0,70	0,30	6,10	6,53	2,38
200-1500	2,5	30	10	10	20	7,5	12,5	0,50	680	2414	0,53	0,33	0,13	13,1	9,15	1,24
200-1500	2,5	30	10	4	8	7,5	10,5	0,75	680	1485	0,52	0,38	0,07	5,71	9,39	1,12
200-1500	2,5	30	10	5	10	5,0	12,5	1,50	340	2414	0,41	0,37	0,12	5,56	7,32	1,24
200-1500	2,5	40	20	3	9	3,0	10,0	2,33	191	1823	0,40	0,56	0,12	4,59	8,12	1,52
200-1500	2,5	40	20	4	8	7,5	12,5	1,25	907	3672	0,70	0,52	0,25	5,38	12,3	1,92
200-1500	2,5	40	20	4	8	3,0	12,5	2,38	191	3672	0,40	0,53	0,25	5,31	8,17	1,91
200-1500	2,5	40	20	7	14	7,5	11,5	0,57	907	2842	0,70	0,49	0,21	8,97	11,6	1,76
200-1500	5	30	10	4	8	7,5	10,5	0,75	962	2100	0,74	0,49	0,11	5,23	9,81	1,42
200-1500	5	30	10	4	16	7,5	10,5	0,75	962	2100	0,74	0,48	0,11	6,33	9,81	1,40
200-1500	5	30	10	4	16	3,0	12,5	2,38	202	3414	0,42	0,47	0,18	6,10	6,12	1,58
200-1500	5	30	10	5,5	11	2,0	11,0	1,64	102	2394	0,33	0,48	0,13	6,93	4,14	1,45
200-1500	5	30	10	5	10	5,0	12,5	1,50	480	3414	0,58	0,47	0,18	6,27	7,64	1,60
80/600	3	37	25	2	5	4,0	10,0	3,00	96	1541	0,43	0,52	0,39	2,84	9,29	2,34

4. táblázat. „csak Hullámtér” típusú medernél a vizsgált változatok főbb jellemzői és a számított $v_{él}$ és $v_{tető}$

Table 4. For the "only_Floodplain" type, the main features of the tested variants and the calculated wavefront and flood wave velocities

m	cm/km	$m^{1/3}/s$		d	d	Hidr. kmély. per			perm. szám.		nemp-ből		100 km-ig			
						m	m	m/d	m^3/s	m/s	d	$int, v_{fm,max}, v_{tot,max}$		$v_{tot,max}, v_{tot,0}$		
B	S_o	$k_{Str,fm}$	$k_{Str,ht}$	$T_{Qárad}$	T_{Qapad}	H_{min}	H_{max}	$intz$	Q_{min}	Q_{max}	$v_{tot,0}$	$v_{tot,max}$	$T_{Ztető,500}$	$v_{él}$	$v_{tető}$	
45-95	10	35	25	3	8	3,00	10,0	2,33	64	837	0,61	1,21	3,4	5,81	5,04	4,85
200-1500	10	40	20	4	8	4,70	10,5	1,45	901	8938	0,72	0,91	4,3	3,70	3,87	3,13
45-96	15	30	20	2	6	6,00	14,5	4,25	290	1767	0,92	1,58	2,3	7,01	6,89	7,60
45-95	15	30	20	3	8	3,00	14,5	3,83	67	1767	0,64	1,58	3,3	6,83	6,63	5,75
45-95	15	40	20	2	5	3,00	11,0	4,00	89	1312	0,85	1,66	2,2	6,82	7,17	7,05
45-95	15	40	30	3	6	3,00	11,0	2,67	89	1434	0,85	1,82	3,2	6,86	7,84	6,66
200-1500	2,5	30	10	5	10	8,75	13,5	0,95	909	2969	0,45	0,36	6,9	3,23	1,29	3,14
200-1500	2,5	40	20	4	8	8,75	14,5	1,44	1220	5650	0,60	0,57	5,3	3,61	2,32	4,39
200-1500	20	30	20	2	5	5,75	10,0	2,13	1346	8155	0,90	1,04	2,2	4,43	4,59	3,52
45-95	30	35	25	2	5	3,00	10,0	3,50	111	1449	1,05	2,09	2,1	7,60	9,17	8,09
200-1500	5	30	10	5	10	8,75	14,5	1,15	1286	5064	0,63	0,49	6,3	3,14	2,01	3,08
45-98	15	40	30	3	5	3,0	10,0	2,33	89	1185	1,03	1,71	3,1	6,58	7,55	6,49
45-97	15	40	35	2	4	3,0	10,0	3,50	89	1232	1,21	1,78	2,1	7,35	8,01	7,00
45-95	30	40	20	2	4	3,0	10,0	3,50	126	1541	1,20	2,22	2,1	7,38	9,86	8,23
45-96	30	40	35	2	4	3,0	10,0	3,50	136	1742	1,20	2,51	2,0	8,50	11,09	8,28
45-95	5	30	10	4	8	8,5	12,5	1,00	1203	3414	0,18	0,47	5,2	3,23	1,50	3,91

KÖZELÍTŐ ÖSSZEFÜGGÉSEK $v_{él}$ és $v_{tető}$ MEGHATÁROZÁSÁRA

Az előző tanulmányunkban bemutatott analitikus, „pon-tos” összefüggések az egyszerűsítések miatt a gyakorlatban még prizmatikus medrek esetén sem adnak elfogadható pontosságú eredményt (eltekintve az elméleti problémától és attól, hogy egyáltalán van-e a gyakorlatban hosszú folyószakaszon prizmatikusnak tekinthető meder). Ezért, mi az egyes változatoknál az árullám levonulása előtt, az általunk felvett – a gyakorlati használat során becsülhető, becsülendő – paraméterek pl. (S_o , k_{st} , H_{min} , int stb.) azon súlyozott lineáris kombinációját kerestük, amelyek a legszorosabb korrelációs kapcsolatban vannak a $v_{él}$ és $v_{tető}$ értékekkel. A matematikai statisztika nyelvén ez

öbbsváltozós lineáris regressziós számítást jelent. Általános formában:

$$y = m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \dots + m_nx_n + b \quad (1)$$

Az m_i regressziós együtthatókkal szorzott x_i független változók azon lineáris kombinációját keressük, amelynél az y függőváltozót legkisebb négyzetes hibával tudjuk közelíteni, ahol b a hibatag. Esetünkben a függő (cél) változó a $v_{él}$ vagy a $v_{tető}$ számított értéke, a független (magyarázó) változók a felvett paraméterek. Mechanikusan szemlélve a szóba jöhető paraméterek száma az Egyszerű medernél 12 db, hullámterésnél 13 db (azok a paraméterek, melyeket a nempermanens számítás előtt vettünk fel). Természetesen ezek nem mindegyike releváns. Magyarázó változó-

ként való alkalmazás feltétele, többek között a paraméterek lineárisan függetlensége, ez minden paraméterre nem teljesül, multikollinearitás áll fenn. Ennek statisztikai bizonyítását mellőzzük, műszaki ismereteink alapján egyértelmű, ha nem is mindig lineáris, a köztük lévő kapcsolat. A paraméterek kiválasztásánál sem tartottuk szükségesnek alkalmazni az ismert módszereket (pl. stepwise, forward, backward, remove, *Hunyadi és társai 1996, Sajtos-Mitev 2007*). Műszaki, logikai megfontolások alapján nagymértékben szűkíthetők a figyelembe veendő változók száma. Statisztikai számítások nélkül is biztosak lehetünk abban, hogy pl. a v_{el} értékét lényegesen egyik mederalak esetén sem befolyásolja a T_{Qpad} vagy a Q_{max} értéke. Ugyanakkor nem nehéz belátni, hogy pl. az *Egyszerű* mederalak esetén S_o , k_{St} , H_{min} , int és v_{min} lehetnek a v_{el} értékét alapvetően befolyásoló paraméterek. (Itt figyelembe vettük azt, hogy T_{Qpad} és H_{max} értékeit – több más paraméter mellett – impliciten már tartalmazza az int értéke, azonkívül a mederalak és a Q_{min} valamennyire tükröződik a v_{min} -ben). Választásunknál az alábbiakat vettük figyelembe: az R^2 determinációs (meghatározottsági) mutató értéke, és a célváltozó standard hibája (sey), valamint nem utolsósorban a számítás egyszerűsége. Tekintettel arra, hogy a gyakorlati alkalmazás során, a számítás előtt – a nemprizmatikus és az

alulról befolyásoltság miatt is – szinte minden induló paraméter becslés alapján lesz meghatározva, csak látszat pontosságot adna, ha túl sok magyarázó változót vonnánk be a számításba. A kiválasztásuknál a becslési-pontosság és az egyszerűség kompromisszuma (az „Occam borotvája” elv) alapján döntöttünk.

A 2-4. táblázatok v_{el} és $v_{tető}$ jelű oszlopai tartalmazzák a nempermanens számítás alapján meghatározott levonulási sebességeket. Az előttük levő két oszlopban pedig, a legjobb illeszkedést adó regressziós együtthatók és a paraméterek szorzat-összegét adtuk meg (az (1) egyenlet jobb oldala). Az oszlopok fejlécében csak azt jeleztük, hogy mely (1. egyenlet x_i) paraméterekből számítottuk a v_{el} és $v_{tető}$ értékeket, a konkrét m_i értékeket a b hiba tagokkal együtt az 5. táblázatban foglaltuk össze. Az 5. táblázat tartalmazza nem csak a legjobb R^2 , determinációs mutatót és a legkisebb standard hibát (sey) adó összefüggések regressziós együtthatóit, megadtuk még az egy független változóval kevesebb figyelembevételével számított közelítéseket is. E tanulmányban nem részletezzük a paraméterválasztás szükségességét igazoló t -próba statisztikát és a felállított kapcsolat statisztikailag szoros – nem véletlennek tudható – voltát igazoló F -próbákat.

5. táblázat. v_{el} és $v_{tető}$ levonulási sebesség-függvények regressziós együtthatói
Table 5. Regression coefficients of wavefront and flood wave velocity-functions

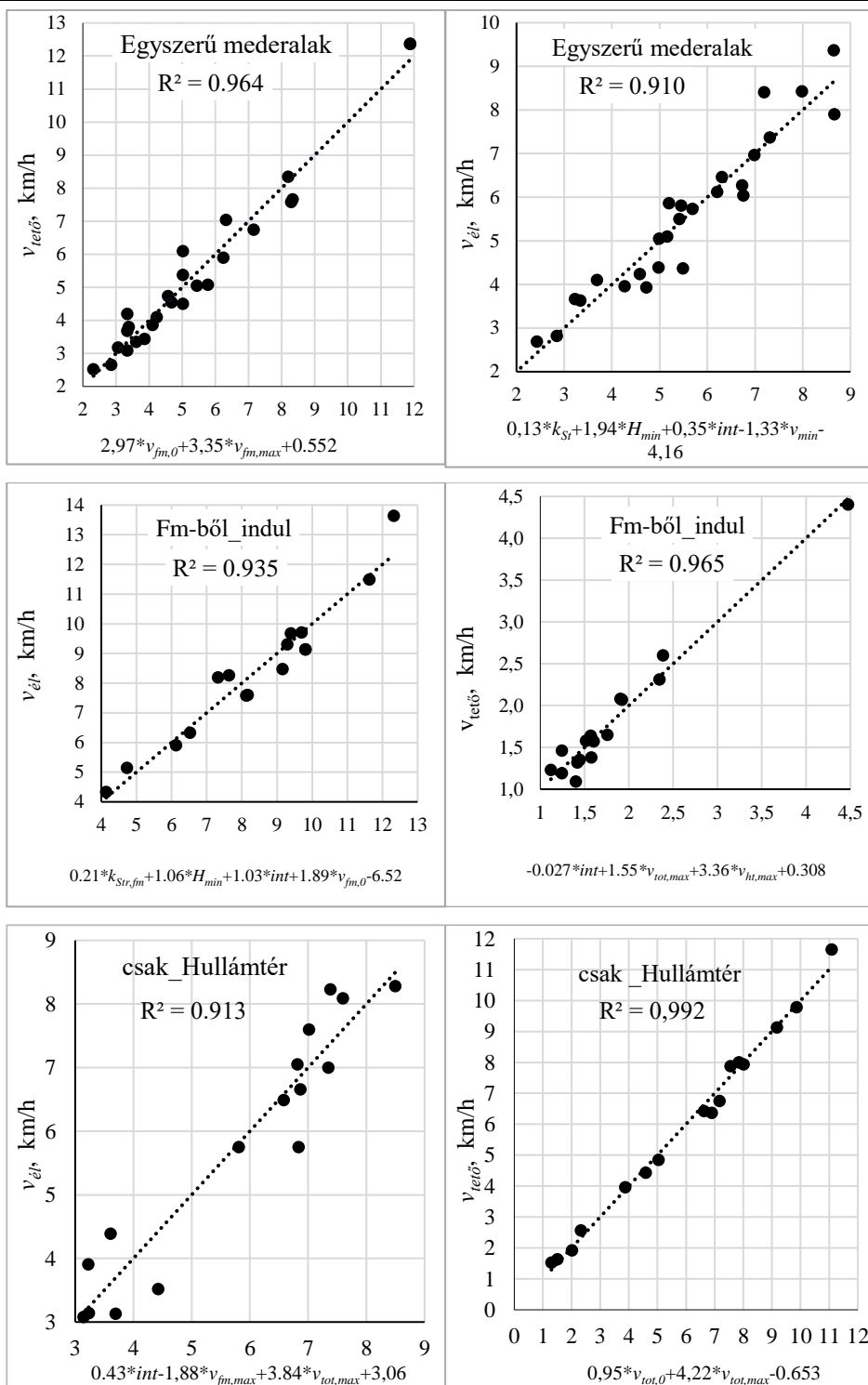
Típus		k_{St}	H_{min}	int	$v_{fm,0}$	$v_{fm,max}$	$v_{ht,max}$	$v_{tot,0}$	$v_{tot,max}$	b	R^2	sey , stand. hiba
		$m^{1/3}/s$	m	m/d	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s			
regressziós együtthatók												
<i>Egyszerű</i>	v_{el}	0,132	1,941	0,351	-1,326					-4,164	0,910	0,58
		0,118	1,726	0,338						-3,728	0,884	0,64
<i>Fm-ből indul</i>	v_{el}	0,208	1,055	1,027	1,887					-6,516	0,935	0,69
		0,216	1,050	0,835						-5,315	0,903	0,81
<i>csak Hullámtér</i>	v_{el}			0,426		-1,882			3,842	3,063	0,913	0,65
									2,693	2,051	0,863	0,75
<i>Egyszerű</i>	$v_{tető}$				2,972	3,347				0,552	0,964	0,51
						4,811				0,364	0,959	0,54
<i>Fm-ből indul</i>	$v_{tető}$			-0,027			3,357		1,552	0,308	0,9652	0,17
							3,249		1,602	0,266	0,9646	0,16
							4,599			0,807	0,944	0,20
									4,675	-0,626	0,869	0,30
<i>csak Hullámtér</i>	$v_{tető}$							0,949	4,224	-0,653	0,992	0,30
									4,574	-0,361	0,990	0,33

Néhány megjegyzés az eredményekkel kapcsolatban:

- A legjobb illeszkedést adó kombinációknál a legkisebb $R^2 = 0,91$ azt jelzi, hogy igen szoros kapcsolat van a kiválasztott paraméterek és a cél-változó között, tehát a számított v_{el} és $v_{tető}$ értékek szórásának több mint 90%-át magyarázzák a lineáris regressziós kapcsolatban lévő regressziós együtthatókkal szorzott paraméterek.
- Még ha egy paraméterrel kevesebbet is veszünk figyelembe, akkor is $R^2 > 0,88$.
- Láthatjuk, hogy a tetőpont előrehaladási sebességét még kevesebb paraméterrel is jobb R^2 és standard hibával tudjuk számítani, mint v_{el} értékét 4 db paraméter bevonásával.
- A legnagyobb bizonytalanság a főmederből induló árhullámoknál van. Gyakorlatban nehéz megadni

(becsülni) a $v_{ht,max}$ -ot, a hullámtéren kialakuló maximális sebességet, ezért *Fm-ből induló* esetben a $v_{tető}$ számítását 4 különböző paraméter kombinációval is megadtuk. Látható, hogy még az egy paraméteres függvények esetén is elérhető $R^2 \sim 0,94-0,87$ determinációs mutató (ehhez „csak” jól kell megbecsülni a $v_{ht,max}$ vagy $v_{tot,max}$ értéket).

A 3. ábrán mind a három jelenség-típusra megadtuk a $v_{el} = f(\text{paraméterek})$ és $v_{tető} = f(\text{paraméterek})$ függvényeket grafikusán is. Természetesen a szóródó pontokra illesztett trendvonalak ($y = x$) mindegyike az origón átmenő 45°-os egyenes. Az ábrákat csak azért adtuk meg, hogy szemléletesen is mutassuk a kapcsolat szorosságát, és azt, hogy még a legkisebb $R^2 = 0,91$ esetén is – a vízmérnöki gyakorlatban – nagyon jónak mondhatók a közelítő függvények.



3. ábra. 1D nempermanens modellel számított és regressziós összefüggésekből meghatározott v_{ell} és v_{ret} sebességek illeszkedése
 Figure 3. Fitting of velocities calculated from a 1D non-permanent model and determined from regression relationships

AZ ELLENTÉTESEN TERJEDŐ HULLÁMÉL-SEBESSÉGÉNEK BECSLÉSE

Az 1D számításaink eredményei alapján statisztikai alapú becslést adtunk a v_{ell} értékekre is. Hasonlóan a v_{ell} és v_{ret} számításához meghatároztuk a v_{ell} -et befolyásoló releváns geometriai és hidraulikai paramétereket, majd a legjobb illeszkedést adó lineáris regressziós együttható értékeket. A becsült együtthatókat a 6. táblázatban – az 5. táblázatnál már ismertetett formában – adtuk meg.

6. táblázat. Az ellentétes hullámél-sebességek becsült regressziós együtthatói
 Table 6. Estimated regression coefficients for opposite wavefront velocities

Típus	S_0	$k_{St, fm}$	$k_{St, ht}$	b	R^2	sey, stand. hiba
	cm/km	$m^{1/3}/s$	$m^{1/3}/s$			
regressziós együtthatók						
Egyszerű	-0,0315	0,0450	-	0,137	0,95	0,18
Fm-ből indul	-0,0229	-0,0045	0,0063	0,557	0,88	0,10
csak_Hullámtér	-0,0682	-0,0360	0,0553	1,381	0,87	0,16

A becslés jellegét azért is hangsúlyozzuk, mert az együtthatókat nem az összes 58 db változat alapján határoztuk meg. Az 58 db változathoz kiválasztva v_{ell} szempontjából releváns változókat, majd kibővítve még 7 db olyan változattal, hogy összességében S_0 tekintetében 1-20 cm/km-t, $k_{St, fm}$ -nél 45-25 $m^{1/3}/s$ és $k_{St, ht}$ esetében 10-25 $m^{1/3}/s$ intervallumot öleljenek át. A gyakorlati tapasztalatok és számításaink is azt mutatták, hogy $S_0 > 20$ cm/km esetén nagyon kicsi (másban elkövethető hibákhoz képest elhanyagolható) az ellentétes-irányú hullámfront sebessége. Az *Egyszerű*-nél 5 db, a *Fm-ből induló*-nál és a *csak Hullámtér*-nél 6-6 db nempermanens számítás alapján – csak nagyon közelítő – becsléssel határoztuk meg a 6. táblázatban adott regressziós együtthatókat.

GYAKORLATI ALKALMAZÁS

Az eredmények alapján az alábbi kérdésekre adhatunk választ:

a.) Egy adott árhullámnál milyen hosszú (jelenség-) ideig számolhatunk, ha azt szeretnénk, hogy a teljes számításba bevont folyóhosszon az alsó határfeltétel pontatlansága ne okozzon hibát a számított vízszintekben? Ezt a medergeometria és az árhullám ismeretében megbecsülhetjük. (A későbbiekben, amikor hibát említünk, mint eddig, csak az alsó határfeltétel pontatlansága miatt keletkező vízszint számításában elkövetett hibáról beszélünk, – természetesen másból is adódik számítási hiba, de most csak erre fókuszálunk.) Példaként egy hullámtér nélküli *Egyszerű*, a 2. táblázat 2. sorszámú adataival jellemzett medret és árhullámot választottuk ki: $S_0 = 15$ cm/km, $k_{St} = 37$ $m^{1/3}/s$, $T_{Qarad} = 2$ d, $T_{Qapad} = 4$ d, $H_{min} = 3,0$ m, $int = 3,5$ m/d, $v_{fm,0} = 0,79$ m/s, és legyen a számításra előkészített folyóhossz $L_{max} = 500$ km. A megadott paraméterekkel és az 5. és 6. táblázatban adott együtthatók ismeretében: $v_{él} = 6,72$ km/h, $v_{tető} = 8,29$ km/h és $v_{ell} = 1,33$ km/h. Ha a teljes 500 km-en szeretnénk hiba nélkül számítani az aktuális vízszintet, akkor $T = L/v_{él} = 500/6,72 = 74,4$ h = 3,1 d ideig számolhatunk. Csak 3,1 nap jelenségideig számolhatunk úgy, hogy Z -kben nem követünk el hibát az 500 km-es folyó egyetlen szelvényében sem, és bizonyos hosszokon még Z_{max} -ok is hiba nélküliek. Mivel $T > T_{Ztető,500} = 2,13$ d (2. táblázat $T_{Ztető,500}$ fejlécű oszlopa) ezért a felső szakasz egy részén már „letetőzött” a vízszint. Ez a hossz: $8,29 \cdot (2,13 \cdot 24 - 48) = 25,9$ km ($v_{tető} \cdot \Delta T$). Tehát közel 26 km-en Z_{max} -okat is hiba nélkül kapjuk.

A felvett 500 km igen nagy távolság, a gyakorlatban nagyon sokszor nincs lehetőség ilyen hosszú szakaszt egyforma geometriai paraméterekkel jellemezni. Ha pl. 200 km-es folyóhosszt tudunk csak bevonni a modellezésbe és a 3. táblázat 30. sorszámú adataival jellemzett árhullámunk van, akkor már csak kb. 1 napig tudjuk számítani a jelenséget, ekkorra a hullámél leér az alsó határfeltételhez és ez az idő csak a tizede az hullám (felsőszelvénybeli) áradási idejének. Megállapíthatjuk, hogy a gyakorlatban *csak nagyon rövid jelenségidőt tudunk numerikusan modellezni, úgy hogy a figyelembe vett folyószakasz teljes hosszán ne kövessünk el hibát a vízszint-számításban.*

Becslésünk – mint említettük – sok közelítést tartalmaz. A $v_{él}$ értékeit a felső határfeltétel alatti 100 km folyóhossz eredményei alapján határoztuk meg, és mint azt láttuk az 1. ábrán a hullám ellapulás miatt a levonulás lassul, tehát 500 km-re a hullámél biztosan később ér le, mint az itt becsült érték. *A 100 km-nél nagyobb hosszakat eredményező becslések esetében ez – az ellapulásból adódó – a levonulási sebességek tekintetében kedvező hatás mindig fenn áll.*

b.) Sokszor meglepedünk azzal, ha nem követünk el hibát a legnagyobb vízszintek számításában. Gyakorlati feladat lehet, meghatározni mekkora folyóhosszt (L) kell bevonni a számításba ahhoz, hogy a kívánt (X_{j0}) hosszokon ne kövessünk el hibát a Z_{max} -ok számításában? Becsüljük meg, – az *Fm-ből indul* esetben 3. táblázat 36. sorszámú adataiból – ha $X_{j0} = 100$ km hosszokon szeretnénk az alsó határfeltétel hibája nélkül számítani a $Z_{max}(X)$ felső burkoló felszínigörbét, akkor mekkora folyóhosszt kell bevonni a számításba. A 3. táblázat adataival és az 5. táblázatbeli együtthatókkal $v_{él} = 11,62$ km/h és $v_{tető} = 1,76$ km/h értékeket kaptunk. A felső határfeltételnél 8,97 nap múlva jelenik meg a vízszinttetőzés (3. táblázat $T_{Ztető,500}$ fejlécű oszlop), $v_{tető}$ -vel számolva 100 km megtételéhez még 56,8 óra szükséges, összesen $8,97 \cdot 24 + 56,8 \approx 272$ óráig kell biztosítani azt, hogy a 100. km alatt elhelyezkedő, az alsó határfeltételben az elkövetett hiba következménye (hibája) ne fusson a 100. km fölé. Az alsó határfeltételt $L = X_{j0} + X$ km-re kell felvenni. Ehhez ismernünk kell az alsó határfeltételi hiba felvív irányába való terjedésének, v_{ell} -nek az értékét. A 3. táblázat 36. sorszámú adataival ($S_0 = 2,5$ cm/km, $k_{St, fm} = 40$ $m^{1/3}/s$ és $k_{St, ht} = 20$ $m^{1/3}/s$) és a 6. táblázat – *Fm-ből indul* – adatai alapján $v_{ell} = 0,45$ km/h. A szükséges folyóhossz számításának általános összefüggése

$$L = X_{j0} + \frac{\left[(T_{Ztető,500} \cdot 24 + \frac{X_{j0}}{v_{tető}} \cdot \frac{X_{j0}}{v_{él}}) v_{ell} v_{él} \right]}{v_{ell} v_{él}} \quad (2)$$

Az adatok behelyettesítése után $L = 214$ km-t kaptunk.

c.) Harmadik típusú feladat: adott L hosszúságú folyón – ahol alsó határfeltételként permanens Q - H görbét alkalmazunk – adott árhullám tetőző vízszintjeit milyen hosszban tudjuk hiba nélkül meghatározni és ehhez meddig (milyen hosszú jelenségideig, T_{j0}) lehet számolnunk. (Természetesen most is csak az alsó határfeltétel okozta hibáról beszélünk.) A gondolatmenetet most is egy konkrét példán mutatjuk be. *Egyszerű* medernél: $L = 400$ km folyóhossz, $T_{Ztető,500} = 11,08$ d, $v_{él} = 4,97$ km/h, $v_{tető} = 3,37$ km/h (2. táblázat, 7. sorszámú adatai és a 5. táblázat adatai alapján), továbbá az ellentétes hullámterjedési sebesség, $v_{ell} = 1,19$ km/h (2. és 6. táblázat segítségével). A 400 km-re lévő alsó határhoz az indulás után $L/v_{él} = 80,5$ óra múlva ér a hullám éle, ha tovább számolunk, az alsó határfeltétel hibája elkezd felfelé terjedni. Ha feltételezzük azt, hogy ezek után még addig futtatnánk, míg az ellentétes irányú hiba egészen a felső szelvényig terjed, ez $L/v_{ell} = 400/1,185 = 337,6$ óráig tartana, a kezdeti időponttól $337,6 + 80,5 = 418,1$ óra. Ez idő alatt már elindul a tetőzés a felső határfeltételi szelvénytől lefele ($418,1 > T_{Ztető,500} \cdot 24 = 266$), tehát nem jó az a feltételezés,

hogy a hiba egészen a felső szelvényig terjed, *van olyan folyószakasz, amelyet nem befolyásol az alulról felfelé terjedő hiba*. Keressük azt a fentről számított X_{j0} távolságra lévő szelvényt, ahol találkozik a fentről lefelé terjedő tetőzés, Z_{max} , az alulról felfelé terjedő hiba szelvényével. Az X_{j0} távolság számításának általános összefüggése

$$X_{j0} = \left(T_{Ztet0,500} - \frac{L}{v_{el}} - \frac{L}{v_{ell}} \right) \frac{v_{tet0} \cdot v_{ell}}{-v_{tet0} - v_{ell}} \quad (3)$$

Behelyettesítések után $X_{j0} = 133,4$ km-t kapunk. A találkozás kezdeti időtől számított időpontja

$$T_{j0} = T_{Ztet0,500} \cdot 24 + \frac{X_{j0}}{v_{tet0}} \quad (4)$$

$T_{j0} = 305,5$ h. Tehát – az adott geometriájú – 400 km hosszú folyón egy $T_{Qárad} = 9$ napig (216 h) áradó árhullámot 305,5 óráig és csak a felső ~133 km-es folyószakaszon tudjuk Z_{max} hiba nélkül számítani.

Alkalmazás Tisza-i adatokra

Nagyon erős kritikával fogadva e tanulmány eredményeit az mondhatják, hogy ezek csak azt mutatják meg, hogy az alsó határfeltételnek lényeges hatás lehet a számított vízszintekre, de pontos értéket nem ad a címbe ígért hossza, (elsősorban a prizmatikus geometriai adatok miatt). Véleményünk szerint, *ha megfelelő kritikával, szakmai hozzáértéssel, tapasztalattal használjuk az itt leírtakat, akkor nagyon hasznos lehet*. Ezt a Tisza adatainak kerestül mutatjuk be. Célunk meghatározni, hogy a Tisza Tiszabecs-Tiszalök közötti szakaszán egy adott árhullám tetőző vízszintjeit milyen hosszan tudjuk hiba nélkül megbecsülni és ehhez meddig (milyen hosszú jelenségeig) lehet számolnunk. A következő átlagos geometriai és hidraulikai paramétereket vettük fel illetve becsültük: $Q_{min} = 250$ m³/s, $Q_{max} = 3000$ m³/s $H_{min} = 3,0$ m, $S_0 = 10$ cm/km, $k_{St, fm} = 25$ m^{1/3}/s, $k_{Str, ht} = 10$ m^{1/3}/s, $T_{Qárad} = 6$ d, $int = 1,0$, $v_{fm, 0} = 0,518$ m/s, $v_{fm, max} = 1,07$ m/s, $v_{tot, max} = 0,702$ m/s, $v_{ht, max} = 0,2$ m/s. Ezekkel a paraméterekkel a levonulási sebességek $v_{el} = 3,86$ m/s és $v_{tet0} = 2,04$ m/s, majd a (3) és (4) összefüggéseket felhasználva $X_{j0} = 153$ km, $T_{j0} = 219$ h. Tehát becslésünk alapján csak kb. 9 napig és 566 fkm-ig (kb. Tiszabercel 569,0 fkm-ig) lehet hiba nélkül számítani Z_{max} -okat.

Nem szabad mechanikusan alkalmazni a módszert. A Tiszán, ha hosszabb folyószakaszt vonva be a számításba (bár a képletből kaphatunk nagyobb X_{j0} -t, de) biztosan hibás paraméterekkel számolunk. Például Szeged térségében már a fentiekől nagyon eltérőek lesznek a levonulási sebességeket meghatározó paraméterek. Ezért ha a szegedi szelvényenél tételezzük fel a permanens Q - H görbével adott alsó határfeltételt, akkor maximum csak Szolnok-Szeged közötti átlagos geometriával ajánlott számolni. Mi, a következő átlagos geometriai és hidraulikai paramétereket vettük fel illetve becsültük: $Q_{min} = 300$ m³/s, $Q_{max} = 3000$ m³/s $H_{min} = 5,0$ m, $S_0 = 3$ cm/km, $k_{St, fm} = 29$ m^{1/3}/s, $k_{Str, ht} = 15$ m^{1/3}/s, $T_{Qárad} = 7$ d, $int = 0,2$, $v_{fm, 0} = 0,48$ m/s, $v_{fm, max} = 0,88$ m/s, $v_{tot, max} = 0,54$ m/s, $v_{ht, max} = 0,22$ m/s. Ezekkel a paraméterekkel a levonulási sebességek $v_{el} = 6,06$ m/s és $v_{tet0} = 1,88$ m/s, így $X_{j0} = 78$ km, $T_{j0} = 209$ h. Tehát becslésünk alapján csak kb. 8,7 napig és 257 fkm-ig (Tiszaug felett 10 fkm-ig, kb. a Mámairéti órházig) lehet hiba nélkül számítani Z_{max} -okat.

Szeged felett ~83 fkm folyóhosszon hiba lehet a számított maximális vízszintekben. Meglepő, hogy ha Zentáig visszük le az alsó határfeltételt, még akkor is Szeged felett ~40 fkm-en hibás Z_{max} -okat kapunk.

ÖSSZEFOGLALÁS

Miután az előző tanulmányunkban bizonyítottuk, hogy nem tudunk (nem lehet) a gyakorlatban alkalmazható, elméletileg szabatos összefüggést előállítani a címbe feladat megoldásához, széles geometriai és hidraulikai jellemzőket átölelő számításokat végeztünk, melyek eredményeiből statisztikai módszerrel meghatározott általánosítható, közelítő összefüggéseket adtunk v_{el} , v_{tet0} és v_{ell} -re. A levonulási sebességeket az ID szabadfelszínű, fokozatosan változó nempermanens vízmozgás alapegyenleteinek megoldása után kapott eredmények felhasználásával határoztuk meg. A geometriai és hidraulikai jellemzőket, az adat-intervallumokat a 1. táblázatban ismertettük.

A 2-4. táblázatokban összefoglaltuk a vizsgált változatok főbb jellemzőit és a lényegesebb eredményeket is. Az 1. és 2. ábrákon két konkrét változatnál a v_{el} és a v_{tet0} sebességek meghatározásának módját szemléltettük.

A következő fejezetben a hidraulikai folyamat szempontjából eltérően viselkedő *i.*) csak a főmederben levonuló, „Egyszerű”; *ii.*) a főmederből induló, de a hullámterre is kijutó, „*Fm-ből induló*” és *iii.*) a csak a hullámtéren levonuló, „*csak_Hullámter*” nevekkel jellemzett árhullámok v_{el} és v_{tet0} becslő összefüggéseinek statisztikai meghatározását ismertettük. Az egyes változatoknál az árhullám levonulása előtt általunk felvett független változók pl. (S_0 , k_{st} , H_{min} , int stb.) és v_{el} vagy v_{tet0} számított értékek, mint függő változók többváltozós lineáris regressziós kapcsolatot határoztuk meg. A 2-4. táblázatok az alapadatokon kívül tartalmazzák a nempermanens számítás alapján meghatározott levonulási sebességeket is. Az 5. táblázatban azokat a regressziós együtthatókat adtuk meg, melyek felhasználásával becsülhetők a folyásiránnyal megegyező sebességek. A kapcsolat statisztikai szorosságára jellemző R^2 determinációs (meghatározottsági) mutatók és a célváltozó standard hibái (sey) alapján, a vízmérnöki gyakorlatban nagyon jónak mondható közelítő függvényeket kapunk (3. ábra).

A folyásiránnyal ellentétesen terjedő hullámél-sebességeket, v_{ell} -et az azonos irányba terjedő v_{el} -nél alkalmazott módon határoztuk meg. A fő célkitűzésünk szempontjából kisebb súlya miatt, és mivel a figyelembe veendő fenékesés intervallumot is szűkíthettük ($S_0 < 20$ cm/km), 17 db nempermanens számítás eredményeit felhasználva csak nagyon közelítő becslését adtuk v_{ell} -re. A 6. táblázat tartalmazza az ellentétes hullámél-sebességek becsléséhez ajánlott regressziós együtthatókat.

Az eredmények használhatóságát 3 teszt példán keresztül mutattuk be. Az alábbi gyakorlati kérdésekre tudunk feleletet, becslést adni:

- Egy adott árhullámnál milyen hosszú (jelenség) ideig számolhatunk, ha azt szeretnénk, hogy a teljes számításba bevont folyóhosszon az alsó határfeltétel pontatlansága ne okozzon hibát a számított vízszintekben?

- *Mekkora folyóhosszt kell bevonnunk a számításba ahhoz, hogy egy adott árhullámnál, egy kívánt hosszra a Z_{max} -ok számításában ne kövessünk el hibát?*
- *Adott L hosszúságú folyón, egy adott árhullám tető vízszintjeit milyen hosszra tudjuk hiba nélkül meghatározni és ehhez meddig (milyen hosszú jelenségideig) lehet számolnunk?*

Végül a Tisza geometriai és hidraulikai adatait felhasználva egy feltételezett árhullámnál számítottuk ki, hogy milyen hosszra tudjuk a tető vízszinteket számítani Tiszabecs-Tiszalök, majd Szolnok-Szeged folyószakaszok számításba való bevonása esetén.

A bevezetőben tett ígértünknek megfelelően sikerül meghatározni az árhullám két jellegzetes pontjának, – az árhullám körömpontjának és a tetőpontjának hossz menti előrehaladási sebességét, és az ellentétesen terjedő hullámél-sebességét is becsültük. Így a jelenségidő ismeretében meg tudjuk határozni azt a szükséges számítási folyóhosszt, melynél nem kapunk elfogadhatatlan számítási hibát. Újból hangsúlyozni kell, egy lényeges körülményt: az eredmények prizmatikus, szabályos medrekben – az alsó határfeltétel hatásától eltekintve – az alulró befolyásoltan folyószakaszokon történő számításokból származnak.

Nincs geometriai nemprizmatikusság, műtárgy vagy mellékfolyó által okozott duzzasztó vagy leszívó hatás. Ezek a természetben elkerülhetetlen hatások nem csak növelhetik, csökkenthetik is a hibamentesnek számított folyóhosszakat. Mindezek figyelembevételével, ha megfelelő kritikával, szakmai hozzáértéssel, tapasztalattal alkalmazzuk az itt leírtakat, akkor nagyon hasznos lehet. További vizsgálatok dönthetik el, hogy az alkalmazott egyszerűsítések mekkora és milyen irányú hibát eredményeznek a számításokban.

IRODALOMJEGYZÉK

Hunyadi L., Mundruczkó Gy., Vita L. (1996). Statisztika. Aula Kiadó, Budapest.

Delft3D-Flow (2016). User Manual. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena including sediments. Version 5.0.1.

HEC-DSSVue (2010). User's Manual. Version 2.01.16.

HEC-RAS (2016). <https://www.hec.usace.army.mil/>

Rátky I. (2020). Egydimenziós nempermanens számításokhoz szükséges minimális folyóhossz meghatározása. 1. rész: A feladat és annak elméleti megoldási lehetősége. Hidrológiai Közlöny, 100. évf. 4. szám. pp 70-77.

Sajtos L.-Mitev A. (2007). SPSS kutatási és adatelemzési kézikönyv. Alinea Kiadó, Budapest.

A SZERZŐ



RÁTKY ISTVÁN Okleveles mezőgazdasági gépészmérnök, okleveles építőmérnök. "IHE,Delft", NUFFIC ösztöndíjjal 10 hónapot töltött Delft-ben, az International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, "Experimental and computational hydraulics" posztgraduális képzésen. PhD fokozatot 1998-ban szerzett. 1970-től 2009-ig a BME oktatója, egyetemi docensként ment nyugdíjba. Nyugdíjazása után vendég-előadóként a Szent István Egyetem Mezőgazdaság- és Környezettudományi Karán, az Eötvös József Főiskola Műszaki Fakultás szakmérnök képzésében, valamint az ELTE Természettudományi Karán hidrológus szakirányú továbbképzésben előadóként vett részt. 1974-től a Magyar Hidrológiai Társaság (MHT) tagja. Társasági kitüntetései: Pro Aqua-emlékérem (2001), Schafarzik Ferenc-emlékérem (2016), négy alkalommal részesült Vitális Sándor szakirodalmi díjában. Hidrológiai Közlöny szerkesztőbizottsági tag. 2000-től az MHT Hidraulikai és Műszaki Hidrológiai Szakosztálynak elnöke. Kutatási területe: árvízmentesítés, árvízvédelem, folyó és tószabályozás, sík- és dombvidéki vízrendezés, belvízvédelem.

Mennyire örvénymentes a lefolyó örvény?

Sándor Balázs*, Szabó K. Gábor*, Hajnal Géza*

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Kivonat

A lefolyó örvényt vizsgáljuk mélységátlagolt sekélyvízi formalizmusban. A mennyiségek melyeket összehasonlítunk, a mélységátlagolt örvényesség és a spirális áramvonalak menetemelkedése. Arra keressük a választ, hogy az örvénymentességi határesethez képest mekkora menetemelkedés változást eredményez a mélységátlagolt örvényesség megjelenése.

Kulcsszavak

Lefolyó örvény, spirális áramlás, mélységátlagolt örvényesség.

How irrotational is the sink vortex?

Abstract

We analyse the sink vortex flow invoking depth-averaged shallow-water formalism. The quantities have been compared are the depth-averaged vorticity and the pitch distribution of the spiral streamlines. The limit case of irrotational state is related to the appearance of the depth-averaged vorticity via the changes in the pitch of the spiral streamlines.

Keywords

Sink vortex, spiral flow, depth-averaged vorticity.

BEVEZETÉS

Dolgozatunk címe hatásvadásznak is mondható, hiszen a természetben megfigyelhető örvénylő mozgások és az örvényesség, mint matematikai struktúra jellemzői között nem mindig van egyértelmű kapcsolat. A nyíróréteg párhuzamos áramvonalai mellé nemnulla örvényesség társul, míg a szabad örvény (pontörvény vagy potenciális örvény) körkörös áramvonalai mellé nulla örvényességet számíthatunk. Utóbbi természetesen közelítő matematikai modell, ahol az örvényközpontban végtelen nagy örvényesség összpontosul, azon kívül pedig nulla; ugyanakkor ezzel a modellel vagy ennek egy nyelővel kombinálásával jól közelíthetők egyes természeti jelenségek. Az örvényesség a folyadékreszecskek saját tengely körüli forgási szögsebességével azonosítható, ezért fordulhat elő, hogy örvényességgel rendelkező folyadékhalmozban nem realizálódik makroszkopikus léptékben forgó, köröző mozgás.

Vizsgálatunk tárgya az úgynevezett lefolyó örvény vagy nyelő örvény, amelynek talán legegyszerűbb, kinematikai modellje éppen egy potenciális örvény és egy nyelő szuperpozíciója. Az így kialakult áramlás áramvonalai logaritmikus spirálisok. Ezen modellel indulunk ki és vezetjük be vizsgálati eszközeinket, amelyek az örvényesség és a spirális áramvonalak menetemelkedései lesznek. Így aztán a további modellek összehasonlítása a logaritmikus spirális áramlással a nulla örvényességhez és az állandó menetemelkedéshez való viszonyítást jelenti majd.

Spirális áramvonalakkal jellemezhető örvények nemcsak a lefolyók és vízkivételi művek körüli áramlásokban fedezhetők fel, hanem geofizikai és kozmológiai léptékekben is. A logaritmikus spirális áramlás modellje ilyen léptékekben is felbukkan, például légköri ciklonok (*Niu és társai 2017*) vagy galaxisok (*Lou 2002*) leírásában. A legtöbb modell azonban a logaritmikus spirálistól eltérő áramképet mutat, mind az összes említett jelenség eseté-

ben. A lefolyó örvények leírásában széles körben alkalmazott modellt először Rankine vezetett le (*Rankine 1858*), amely az áramlást egy szabad örvény és egy merevtest-szerű örvény együtteseként írja le. Burgers a három térdimenzióra értelmezett Navier-Stokes egyenletekre talált analitikus megoldást, (*Burgers 1940*), amely a Rankine örvény tulajdonságait egyetlen folytonos függvénnyel valóítja meg. Ez a megoldás szintén széles körben alkalmazott úgy a lefolyó örvények, mint a ciklonok vizsgálatában. A lefolyó örvények vizsgálata hidraulikai mérnöki szempontból a vízkivételi műtárgyak körüli áramlások ismerete miatt fontos. A Burgers modell alkalmazása (*Odgaard 1986, Stepanyants 2008*) mellett különböző más analitikus, numerikus és kísérleti modellek is rendelkezésre állnak, lásd például (*Hite 1994, Sun 2015, Azarpira 2019, Duinmeijer és társai 2020*). Ezen tanulmányok a háromdimenziós áramlási jelenség vizsgálatát célozzák meg.

Jelen dolgozatban a sekélyvízi hidrodinamika formalizmusát használjuk, vagyis horizontális leírásra szorítókunk. Megfeleltetjük a síkáramlási logaritmikus spirálist állandó vízmélységű víztestre, vagyis arra az estre, amikor sem a mederfenéken, sem a vízfelszínen nem veszünk figyelembe gradienseket. A jól ismert nulla örvényességű megoldást kapjuk (állandó menetemelkedésű) logaritmikus spirális áramvonalakkal. Ezután definiáljuk a fizikai modellt, egy végtelen kiterjedésű sekély víztestet, amelynek a közepén egy kifolyót helyezünk el. Egy advekción modellel vezetünk be állandó örvényességgel rendelkező megoldásokat. A menetemelkedés függvényét ezen állandó örvényességéből és más fizikai paraméterekből alkotott dimenziótlan csoport függvényeként elemezzük, és kizárjuk a nem realizálható megoldásokat. A realizálható eseteket csoportosítjuk a menetemelkedés alapján. Végül két konkrét esetre numerikus szimuláció eredményeivel hasonlítjuk össze az advekción modellünket.

A LOGARITMIKUS SPIRÁLIS ÁRAMLÁS KINEMATIKAI MODELLJE SEKÉLYVÍZI FORMALIZMUSBAN

Síkáramlásban a logaritmikus spirális előállítás jól ismert, és a szakirodalomban megtalálható, például (Németh 1963). Legyenek $u(r, \varphi)$ és $v(r, \varphi)$ a permanens síkáramlás sugárirányú és érintőirányú sebességkomponensei polárkoordinátákkal megadva. Jelölje \mathbf{v} a sebességmezőt tömör alakban és legyen $\omega(r, \varphi)$ a (skalárértékű) örvényesség. Az örvénymentesség feltétele a sebességmező rotációmentessége:

$$\omega = \nabla \times \mathbf{v} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(rv)}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) = 0. \quad (1)$$

A folytonossági egyenlet

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) = 0 \quad (2)$$

alakban írható. Könnyű belátni, hogy az

$$\mathbf{u} = \frac{c_0}{r}, \quad \mathbf{v} = \frac{c_1}{r} \quad (3)$$

alakú, vagyis logaritmikus spirális áramvonalakhoz tartozó sebességmező kielégíti az (1) és a (2) egyenletet, vagyis az összenyomhatatlanság és örvénymentesség feltételét. Az áramlás forgásszimmetrikus, amelynek sugár- és érintőirányú sebességkomponense a középponttól távolodva a sugár reciproka szerint csökken, a középponthoz közeledve pedig a végtelen értékhez tart. Ez a szingularitás egyszerre jelent divergenciát és végtelen nagy örvényességet ezen az egyetlen pontból álló halmazon. A divergencia vertikális áramlásnak feleltethető meg a modellel közelített jelenségekben. A középpontbeli végtelen erősségű örvény a középponton kívül örvényességmentes áramlásban pedig a potenciális örvény modellje.

A logaritmikus spirális áramlás tehát egy forrás vagy nyelő és egy potenciális örvény lineáris kombinációja. A forrás vagy nyelő erőssége c_0 , az örvényerősség c_1 . A logaritmikus spirális egyik különlegessége az állandó menetemelkedés: minden pontban a spirálisnak a spirális középpontjával egyező középpontú és a spirális az adott pontban metsző körrel bezárt szöge állandó. Forgásszimmetrikus sebességeloszláshoz az áramvonalak $\alpha(r)$ menetemelkedése a radiális és tangenciális sebességek hányadosaként adható meg:

$$\tan \alpha(r) = \frac{u}{v} \quad (4)$$

Behelyettesítve a (3) sebességkomponenseket, a

$$\tan \alpha(r) = \frac{c_0}{c_1} \quad (5)$$

állandó értéket kapjuk. Nevezzük az ehhez tartozó menetemelkedési szöget A -val, vagyis

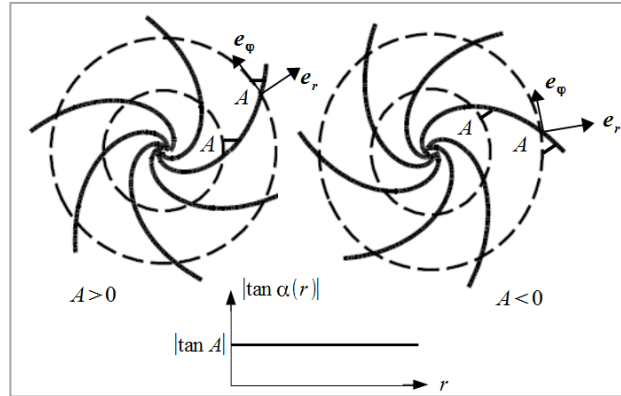
$$\alpha(r) = A = \arctan \frac{c_0}{c_1} \quad (6)$$

A (3) sebességmezőből és az áramvonalak (6) menetemelkedéséből az látszik, hogy négyféle áramlás valósulhat meg, amelyekhez páronként egyértelmű menetemelkedés tartozik. Adott értelmű menetemelkedés egy forrásos ($c_0 > 0$) és egy nyelő ($c_0 < 0$) esetet tartalmaz:

$A > 0$, ha $c_0 > 0$ és $c_1 > 0$, vagy $c_0 < 0$ és $c_1 < 0$,

$A < 0$, ha $c_0 > 0$ és $c_1 < 0$, vagy $c_0 < 0$ és $c_1 > 0$ (7)

A logaritmikus spirális áramvonalak és a menetemelkedés az 1. ábrán látható, ahol az egyértelműség kedvéért a poláris bázisvektorokat is feltüntettük.



1. ábra. Logaritmikus spirális áramvonalak síkáramlásban, a menetemelkedés kétféle értelmével

Figure 1. Streamlines of logarithmic spiral plane flow with two meanings of pitch

A sekélyvízi formalizmusban vertikálisan összegzett vagy átlagolt módon értelmezhetjük a horizontális sebességmező komponenseit. Egy adott pontban az adott h mélységű folyadékoszlop,

$$h \geq 0, \quad (8)$$

mélységintegrált sebességmezőjének vagy fajlagos vízhozammezőjének komponensei legyenek p és q , vektoros jelölésben \mathbf{q} . A mélységátlagolt sebességmező komponenseit jelölje U és V , vektorosan \mathbf{V} . A kapcsolat a két mező komponensei között (Józsa 2001)

$$p = hU, \quad q = hV. \quad (9)$$

Az áramlás mellett a folyadék mélységét is időben állandónak tekintjük, vagyis a felszíni hullámzástól eltekintünk, a vízfelszín vízszintes sík. A h mélységeloszlással így maga a topográfia is közvetlenül értelmezhető, ennek megfelelően a mélységeloszlás hatása és a topográfia hatása alatt ugyanazt értjük.

Az örvényességet, amit ζ -val jelölünk, a \mathbf{V} mélységátlagolt sebességmezőhöz rendeljük, amely így egy h mélységű folyadékszál forgási szögsebességével azonosítható (Borthwick 1993, Józsa 2001):

$$\zeta = \nabla \times \mathbf{V} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(rV)}{\partial r} - \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right). \quad (10)$$

Meg kell említenünk, hogy értelmezhető örvényesség a \mathbf{q} fajlagos vízhozammezőhöz is (Flokstra 1976), jelölje ezt Ω :

$$\Omega = \frac{1}{h} \nabla \times \mathbf{q} = \frac{1}{rh} \left(\frac{\partial(rq)}{\partial r} - \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right). \quad (11)$$

Az Ω mélységintegrált örvényesség egy fluxus jellegű mennyiség rotációjával azonos, így a folyadékszál forgási szögsebessége nem rendelhető hozzá. Ráadásul – ahogyan Flokstra is fogalmaz (Flokstra 1976) – a hidrodinamikai egyenletek örvényesség változóra átirat formája, az örvénytranszport egyenlet a ζ mélységátlagolt örvényesség változóra írható fel konzervatív alakban, vagyis ζ lehet megmaradó mennyiség. A mélységváltozás hatása is ζ segítségével

vel vizsgálható, mert Ω magába foglalja azt, ζ pedig változik a mélységgradiens hatására (egy áramlásban utazó, forgó folyadékcsál forgási sebessége változik a folyadékcsál nyúlásával-zsugorodásával, de az időben állandó örvényesség-eloszlás vizsgálatának esetében is fontos különbséget tenni).

A síkáramlási (1) örvénymentességi feltétel sekélyvízi megfelelőjét a ζ mélységátlagolt örvényesség (10) képlete alapján értelmezzük:

$$\zeta = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(rv)}{\partial r} - \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) = 0. \quad (12)$$

A folytonossági egyenlet a (2) síkáramlási megfelelőjéhez képest egy folyadékoszlopra, vagyis a \mathbf{q} fajlagos vízhozammezőre teljessül:

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(rp)}{\partial r} + \frac{\partial q}{\partial \varphi} \right) = 0. \quad (13)$$

A logaritmus spirális (3) sebességmezőjéhez hasonló, forgás-szimmetrikus megoldást keresünk, és a mélységeloszlást is forgásszimmetrikusnak tételezzük fel:

$$U = U(r), \quad V = V(r), \quad h = h(r). \quad (14)$$

Behelyettesítjük a (14) forgásszimmetrikus változókat a (12)-(13), mélységátlagolt örvénymentességi és folytonossági feltételekbe, és a fajlagos vízhozamok és mélységátlagolt sebességek kapcsolatát leíró (9)-es formula felhasználásával utóbbiakra írjuk fel a problémát:

$$\frac{1}{r} \frac{d(rV)}{dr} = 0 \quad (15)$$

az örvénymentességi feltétel, és

$$\frac{1}{r} \frac{d(rhU)}{dr} = 0 \quad (16)$$

a folytonossági feltétel. Az immár közönséges differenciálegyenlet-rendszer megoldása

$$U = \frac{c_0}{rh}, \quad V = \frac{c_1}{r}, \quad (17)$$

amelyből (9) alapján a fajlagos vízhozammező komponensei

$$p = \frac{c_0}{r}, \quad q = \frac{c_1 h}{r}. \quad (18)$$

A megoldást a h mélységeloszlás átskálazza a logaritmus spirálishoz tartozó (3) megoldáshoz viszonyítva. Ez a spirálisok menetemelkedésében jól látszik, amely a (4) képlet alapján:

$$\tan \alpha(r) = \frac{p}{q} = \frac{U}{V} = \frac{c_0}{c_1 h}. \quad (19)$$

A (19) menetemelkedés a vízmélység határeseiben:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \tan \alpha = \infty, \quad \lim_{h \rightarrow \infty} \tan \alpha = 0, \quad (20)$$

ami rendre radiális és körző áramlást jelent. Növekvő vízmélységre tehát az áramvonalak válasza csökkenő menetemelkedés, és fordítva.

Megjegyezzük, hogy amennyiben az örvénymentességi feltételt a (10) mélységátlagolt örvényesség helyett a (11) mélységintegrált örvényességre mondtuk volna ki, úgy a megoldást a mélységeloszlás nem skálázta volna át

és tetszőleges h mellett a logaritmus spirális megoldásra vezetett volna a sekélyvízi kiterjesztés.

Megoldásaink ezzel szemben csak az állandó mélységű határesetben vezetnek a logaritmus spirális áramvonalakra. A (17) sebességmező és a (19) menetemelkedés a

$$h = H, \quad (21)$$

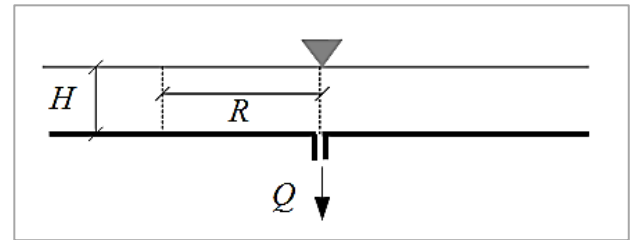
állandó mélységű folyadéktestre matematikailag analóggá válik a síkáramlási logaritmus spirális (3) sebességmezőjével és (5) menetemelkedésével, ez utóbbi esetben a kapcsolatot:

$$\tan A = \frac{c_0}{c_1} = \frac{c_0}{c_1 H}. \quad (22)$$

Megadtuk a logaritmus spirális síkáramlás kiterjesztését sekélyvízi környezetben. A mélységátlagolt sebességmezőre értelmezett (12) örvénymentességi feltételtől indultunk ki. Változó vízmélységre változó menetemelkedésű megoldásokat kapunk, ezek azonban továbbra is örvénymentes áramlások a (10) mélységátlagolt örvényesség értelmében. Az utolsó fejezetben visszatérünk a változó vízmélység kérdéséhez a vízszintes siktól eltérő mederfenék figyelembevételével, előtte azonban definiáljuk lefolyó modellünket, először topografikus hatások nélkül.

A LEFOLYÓ MODELLJE, ÖRVÉNYMENTES KÖZELÍTÉS

Fizikai modellünk egy nagy kiterjedésű tározótérnek és a benne elhelyezett vízkivételi műnek feleltethető meg. Egy olyan hipotetikus esetet írunk le, amikor $Q = \text{állandó}$ vízhozam áramlik keresztül $2r\pi H$ területű hengerpalástokon, majd távozik a lefolyón át. A vízmélység a teljes víztérben H , vagyis nem számolunk a lefolyó körüli leszívódással, amely egyébként a szabad felszín görbében jelenik meg, mélységgradienseket idézve elő vízszintes mederfenék esetén is. Ez jó közelítés lehet kellően nagy kiterjedésű tározó esetén, ahol a horizontális kiterjedés akár több nagyságrenddel nagyobb a lefolyó nyílásméreténél. A modell oldalnézetből a 2. ábrán látható.



2. ábra. A víztározó és lefolyó oldalnézeti rajza

Figure 2. Side view drawing of the reservoir and drain hole

Forgásszimmetrikus áramlást feltételezve, annak radiális komponensére minden r sugárnál igaz, hogy

$$U(r) = -\frac{Q}{2r\pi H}, \quad (23)$$

ahol a kifolyó irányú (a radiális bázisvektorral ellentétes értelmű) áramlást a negatív előjel juttatja érvényre. Az áramvonalak menetemelkedése az $r = R$ helyen legyen adott,

$$\alpha(R) = A. \quad (24)$$

Rögtön látszik, hogy az örvénymentes megvalósítása lefolyómodellünknek a sekélyvízi logaritmikus spirálissal lehetséges, vagyis az $r = R$ helyen definiált (24) menetemelkedés lesz minden r -ben jellemző. A (17) mélységátlagolt radiális sebesség képletéből $h = H$ állandó vízmélység és a (23) feltétel behelyettesítésével

$$C_0 = -\frac{Q}{2\pi} \quad (25)$$

érték adódik. Ezt felhasználva az állandó menetemelkedés (22) képletéből számíthatjuk, hogy

$$C_1 = -\frac{Q}{2\pi H} \cot A. \quad (26)$$

Mindezek után, a (25)-(26) állandók behelyettesítésével a (17) mélységátlagolt sebességmező

$$U = -\frac{Q}{2\pi H} \frac{1}{r}, \quad V = -\frac{Q}{2\pi H} \frac{\cot A}{r} \quad (27)$$

alakban fejezhető ki. Az áramvonalak képe és a menetemelkedés az 1. ábrán látható szerint alakul. A következő modellben megnézzük, hogy milyen változást eredményez az állandó örvényesség megjelenése.

ADVEKCIÓS MODELL ÖRVÉNYTRANSPORT EGYENLETTEL

Az örvénymentességen és összenyomhatatlanságon alapuló kinematikai modellek után ebben a fejezetben már hidrodinamikai egyenlet adja a számítás alapját. Egy tisztán advekción modellet definiálunk, vagyis azt feltételezzük, hogy az áramlást elsődlegesen a folyadék tömeg tehetetlensége vezérli. A mélységátlagolt sekélyvízi egyenletekből indulunk ki, amelyekben az advekción tag struktúrájában a síkáramlási egyenletekkel egyezően írható fel (Flokstra 1976, Borthwick 1993, Vreugdenhil 1994, Józsa 2001). Nem vesszünk figyelembe sem diffúziós tagokat, sem pedig határfelületi csúszatófeszültségeket, amelyek szintén a sekélyvízi egyenletek részét képezik. Ennek a közelítésnek a pontossága érzékenységi vizsgálatokat igényel. Itt és most csak annyit jelentünk ki, hogy kellően nagy tározótér és vízhozam esetén valóban az advekción irányíthatja az áramlást a diffúzióval szemben, a fenécsúszató-feszültség közreműködésének elhanyagolása már kevésbé megalapozott.

A dinamikai egyenlet értelmezéséhez vegyünk fel egy víztestet általánosan, a 3. ábrán jelölt változók szerint. A

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rU \frac{\partial V}{\partial r} + V \left(\frac{\partial V}{\partial \varphi} + U \right) \right] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[U \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{V}{r} \left(\frac{\partial U}{\partial \varphi} - V \right) \right] = 0. \quad (30)$$

A jobb oldal a vegyes második deriváltak felcserélhetősége miatt esett ki, így a (30) örvénytransport egyenlet tetszőleges mélységeloszlásra érvényes. Belátható, hogy a (30) örvénytransport egyenlet a (10) összefüggéssel definiált, ζ mélységátlagolt örvényesség megmaradását fejezi ki. Az általános eset helyett azonban ismét forgásszimmetrikus, (14) alakú megoldást keresve a (30) örvénytransport egyenlet az alábbi, az r változóra nézve közönséges differenciálegyenletre redukálódik:

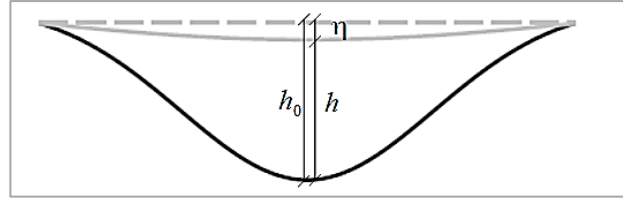
$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(rU \frac{dV}{dr} + UV \right) = 0. \quad (31)$$

A (10) mélységátlagolt örvényesség a (14) forgásszimmetrikus változókkal

h vízmélységet egy nyugalmi h_0 vízmélységnek és egy, a mozgás során a dinamikus egyensúly szerint kialakult η felszínalaknak az együtteseként definiáljuk, jelen példa alapján

$$h = h_0 - \eta \quad (28)$$

összefüggés szerint. Ekkor h_0 a mederalakot leíró függvény lesz, η pedig a nyugalmi vízszinttől való eltérést fejezi ki.



3. ábra. Sekély víztest oldalnézetből, a vízmélység értelmezésével

Figure 3. Side view of a shallow water body with interpretation of water depth

Az advekción sekélyvízi egyenletei mélységátlagolt sebességváltozókkal, polárkoordinátákban:

$$U \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{V}{r} \left(\frac{\partial U}{\partial \varphi} - V \right) = -g \frac{\partial \eta}{\partial r},$$

$$U \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} \left(\frac{\partial V}{\partial \varphi} + U \right) = -\frac{g}{r} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi},$$

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial(rhU)}{\partial r} + \frac{\partial(hV)}{\partial \varphi} \right) = 0, \quad (29)$$

ahol az első két egyenlet a dinamikai egyenletpár, a harmadik pedig a folytonossági egyenlet, valamint g a nehézségi gyorsulási állandó. A dinamikai egyenletek csúszatófeszültségek híján alakilag a permanens Euler egyenletekre emlékeztetnek, a különbség a mélységátlagolt változókkal és a nyomásgradiensben van. A nyomásgradiens helyén a nyugalmi vízszinthez viszonyított η felszínalak gradiense szerepel, vagyis önmagában a mederalak nem ad járulékot ehhez a taghoz. Ezt azért hangsúlyozzuk, mert később lemondunk a felszínalak figyelembevételéről, ennek következményeit pedig a következő fejezetben tárgyaljuk.

A dinamikai egyenletpár rotációját véve áttérünk azok úgynevezett örvénytransport alakjára:

$$\zeta = \frac{1}{r} \frac{d(rV)}{dr} = \frac{1}{r} \left(r \frac{dV}{dr} + V \right) \quad (32)$$

alakot ölt, amit beírva (31)-be, az örvénytransport egyenlet konzervatív alakjához jutunk:

$$\frac{1}{r} \frac{d(rU\zeta)}{dr} = 0. \quad (33)$$

A folytonossági egyenlet a (14) forgásszimmetrikus változókkal:

$$\frac{1}{r} \frac{d(rhU)}{dr} = 0. \quad (34)$$

A mélységátlagolt örvénymentességi modell (15)-(16) egyenleteivel összevetve a jelen advekción modell leíró

egyenleteit, a különbség a (33) örvénytranszport egyenletben jelenik meg, ami már dinamikai megfontolásokból került felírásra. A lefolyóhoz rendelt (23)-(24) feltételek alapján a következő peremfeltételeket rendeljük a (32)-(34) egyenletrendszerhez $r = R$ -ben:

$$U(R) = -\frac{Q}{2R\pi h(R)}, \quad (35)$$

$$U(R) = V(R) \tan A. \quad (36)$$

A (32)-(34) egyenletrendszer tetszőleges $h(r)$ mélységeloszlással, mint változó együtthatófüggvénnyel, a mélységátlagolt sebességekre a következő, szimbolikus megoldást adja:

$$U = \frac{C_0}{rh}, \quad V = \frac{C_1}{r} + \frac{C_2}{r} \int r h dr. \quad (37)$$

Megoldásunk az örvénymentes modell (17) mélységátlagolt sebességmezéjétől az érintőirányú, V sebesség második tagjában tér el, amelyben a tetszőleges $h(r)$ mélységeloszlásnak és a sugár szorzatának az integrálja jelent meg. Az állandó, $h = H$ vízmélységet a (28) definíció értelmében

$$h_0 = H, \quad \eta = 0 \quad (38)$$

feltételek mellett rögzíthetjük, vagyis a vízszintes mederfenék mellett nyugalmi vízfelszín előírásával. Ekkor a (37) sebességmező

$$U = \frac{C_0}{rH}, \quad V = \frac{C_1}{r} + C_3 r \quad (39)$$

alakban írható, ahol

$$C_3 = \frac{C_2 H}{2}. \quad (40)$$

A megoldás egy potenciális örvény és egy merevtestszerű örvény együttese. A mélységátlagolt örvényesség (32) alapján

$$\zeta = \frac{1}{r} \left(r \frac{dV}{dr} + V \right) = 2C_3, \quad (41)$$

vagyis állandó értéket kaptunk, ami a merevtestszerű forgás következménye (a potenciális örvény pedig örvénymentes).

A (39) sebességmező sugárirányú komponenséhez rendeljük a (35) peremfeltételt, ismét a

$$C_0 = -\frac{Q}{2\pi} \quad (42)$$

összefüggésre jutunk. A (36) peremfeltételből a következőt írhatjuk fel a (39) sebességkomponensekre, immár a (42) állandó felhasználásával:

$$C_1 + C_3 R^2 + \frac{Q}{2\pi H} \cot A = 0. \quad (43)$$

Szükséges egy további feltétel a feladat korrekt kitzéséhez. Választásunk az állandó mélységátlagolt örvényességre esik, jelöljük ezt ζ_0 -val; így a (41) összefüggés alapján

$$C_3 = \frac{\zeta_0}{2}, \quad (44)$$

amelyet beírva (43)-ba, kapjuk hogy

$$C_1 = -\frac{Q}{2\pi H} \cot A - \frac{\zeta_0 R^2}{2}. \quad (45)$$

Behelyettesítjük az állandókra kapott (42), (44) és (45) összefüggéseket a (39) sebességkomponensekbe:

$$U = -\frac{Q}{2\pi H} \frac{1}{r}, \quad V = -\left(\frac{Q}{2\pi H} \cot A + \frac{\zeta_0 R^2}{2} \right) \frac{1}{r} + \frac{\zeta_0 r}{2}. \quad (46)$$

A (27) sebességekkel összevetve a megoldást az lát-szik, hogy az állandó, ζ_0 mélységátlagolt örvényesség előjelétől függően változtatja a szabad örvényhez tartozó örvényerősséget, illetve rendeli a merevtestszerű örvény járulékát a megoldáshoz. A menetemelkedés-tangens függvény (az U/V hányados) rendezés után

$$\tan \alpha = \frac{\tan A}{1 + \frac{\pi R^2 H \zeta_0}{Q} \tan A \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)} \quad (47)$$

alakban írható fel. A (47) összefüggés nevezőjében lévő dimenziótlan kifejezésre vezessük be az

$$\varepsilon = \frac{\pi R^2 H \zeta_0}{Q} \quad (48)$$

jelölést. Az ε mennyiség a mélységátlagolt örvényesség, a térfogat és a vízhozam kombinációja. Mivel utóbbi két mennyiség biztosan pozitív, ezért ε előjelét egyértelműen meghatározza az örvényesség előjele. Vezessük még be az

$$r^* = \frac{r}{R} \quad (49)$$

dimenziótlan sugarat. A (48)-(49) összefüggések felhasználásával a (47) menetemelkedés függvényét

$$\tan \alpha = \frac{\tan A}{1 + \varepsilon \tan A (1 - r^{*2})} \quad (50)$$

alakban írhatjuk, ahol $-\infty < \tan A < \infty$, $0 < r^* < 1$. Átírjuk a (46) sebességeket is dimenziótlan alakba:

$$U^* = -\frac{1}{\varepsilon r^*}, \quad V^* = -\left(\frac{\cot A}{\varepsilon} + 1 \right) \frac{1}{r^*} + r^*, \quad (51)$$

ahol

$$U^* = \frac{2}{R\zeta_0} U, \quad V^* = \frac{2}{R\zeta_0} V, \quad (52)$$

a sebességek a sugárral és a mélységátlagolt örvényességgel dimenziótlanodtak. A kifolyó áramlásban a vízhozam, a geometriai paraméterek és a mélységátlagolt örvényesség összefüggenek. Megoldásaink tetszőleges ε -ra tartalmazhatnak fizikailag nem megvalósulható eseteket. Fizikailag realizálható megoldásokhoz az (50) menetemelkedés függvénynek a vizsgált tartományon, vagyis $r^* \in (0,1)$ -en folytonos függvénynek kell lennie. Ezzel egyenértékűen azt is mondhatjuk, hogy az (51) érintőirányú sebességnek nem lehet zérushelye, hiszen akkor az áramlás iránya megfordulna. Ezen megállapítások a

$$D = 4\varepsilon \tan A (\varepsilon \tan A + 1), \quad (53)$$

diszkriminánsnak és az

$$r_{1,2}^* = \pm \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon \tan A}} \quad (54)$$

zérushelyeknek a vizsgálatára vezetnek. A kimerítő vizsgálathoz nemcsak azokat az eseteket kell megvizsgálunk amikor egyáltalán nincs zérushely, hanem meg kell engednünk a zérushelyeket az $r^* \in (0,1)$ -en kívül. Az egyszerű-

ség kedvéért, és mert fizikai modellünk egy lefolyó áramlás, vizsgáljuk csak a lefolyáshoz tartozó eseteket, amelyek az (51) sebességmező radiális komponense alapján az

$$\varepsilon > 0 \quad (55)$$

megszorítást jelentik. Az U^* dimenziótlan radiális sebesség (52) definíciójából azonban látszik, hogy a mélységátlagolt örvényességgel együtt előjelet vált, így a dimenziós megoldás $\varepsilon < 0$ -ra is jelenthet lefolyó áramlásokat. Ezek ellentétes menetemelkedéssel valósulnak meg, ezért az (54) feltételből kapott megoldások vizsgálatával az összes lehetséges megoldástípust feltérképezhetjük.

Nézzük először azokat az eseteket, amikor az (51) érintőirányú sebességnek egyáltalán nincs zérushelye. Ez az (52) diszkrimináns alapján az (55) feltétel mellett a

$$0 < \varepsilon < |\cot A|, \quad A < 0 \quad (56)$$

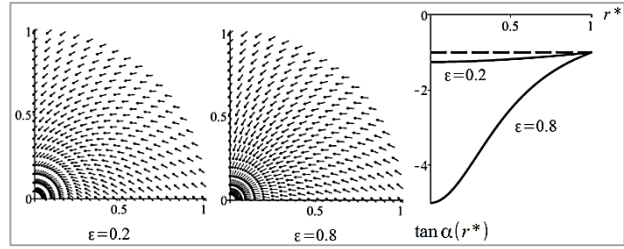
relációra vezet. Az (54) zérushelyek az (55) feltétel mellett úgy kerülhetnek az $r^* \in (0,1)$ -en kívül, hogy a négyzetgyökök alatt egynél nagyobb szám áll, vagyis

$$\varepsilon > 0, \quad A > 0. \quad (57)$$

Az (56) és az (57) feltételeknek eleget tevő megoldások más jellegű áramlást valósítanak meg, nem egyszerű „tűrképei” egymásnak tehát, ellentétes értelmű menetemelkedési szöggel. Az (56) feltételhez tartozó két megoldást láthatunk a 4. ábrán, a sebességmezőket (a vektorok hossza nem utal a sebesség nagyságára a szemléletesebb ábrázolás miatt, továbbá csak egy negyedkörnyi tartományt ábrázolunk) és a menetemelkedéseket. Az ε paraméter a mélységátlagolt örvényességgel egyenes, a vízhozammal pedig fordított arányosságban áll. A nagyobb örvényesség és a kisebb vízhozam az áramlás radiális komponensében okoz növekedést, $\varepsilon = 0$ a logaritmus spirális határeset, nála nagyobb tangenciális komponensű áramlás nem alakul ki az (56) feltételnek eleget tevő megoldások esetében. Az (57) feltételnek eleget tevő két megoldást mutat az 5. ábra. Az áramlás viselkedése itt éppen fordított: a nagyobb örvényesség és a kisebb vízhozam az áramlás tangenciális komponensében jelent növekedést.

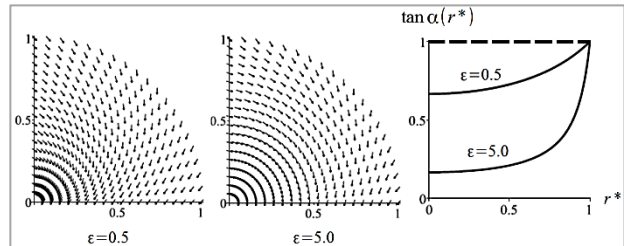
Ahogy már említettük, mindezen megoldások ellentétes értelmű menetemelkedéssel és előjelű mélységátlagolt örvényességgel is előállíthatók. Az (56) és (57) feltételekhez tartozó megoldások közül az előbbiek (4. ábra) lehetnek a fizikailag megvalósíthatók, amennyiben az áramlást nem éri gerjesztő hatás a $0 < r^* < 1$ tartományon. Gerjesztés hiányában ugyanis a folyadék tömeg a radiális sebességkomponensében növekedve igyekezhet elhagyni a tartományt a kifolyón át. Ezt a feltevést természetesen igazolni kell, valamint a kimozdult felszínalak elhanyagolásának következményeit is tisztázni szükséges.

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) &= -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{wx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \nu \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) &= -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{wy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \nu \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (58)$$



4. ábra. Az (51) sebességmezők (a vektor hossza nem utal a sebesség nagyságára) és az (50) menetemelkedések (jobbra) az (56) feltételhez tartozó megoldások két esetében, mindkettőhöz a $\tan A = -1$ határ-menetemelkedés tartozik

Figure 4. The velocity fields (51) (the length of the vector does not indicate the magnitude of the velocity) and the polar slopes (50) (to the right) for two cases satisfying condition (56), both of which have the limit polar slope of $\tan A = -1$



5. ábra. Az (51) sebességmezők (a vektor hossza nem utal a sebesség nagyságára) és az (50) menetemelkedések (jobbra) az (57) feltételhez tartozó megoldások két esetében, mindkettőhöz a $\tan A = 1$ határ-menetemelkedés tartozik

Figure 5. The velocity fields (51) (the length of the vector does not indicate the magnitude of the velocity) and the polar slopes (50) (to the right) for two cases satisfying condition (57), both of which have the limit polar slope of $\tan A = 1$

AZ ADVEKCIÓS MODELL KRITIKÁJA ÉS ÖSSZEHASONLÍTÁSA NUMERIKUS SZIMULÁCIÓVAL

A sebességmezőt úgy állítottuk elő, hogy a vízfelszín kimozdulásától a (38) feltétel szerint eltekintettünk, vagy talán érzékletesebb, ha azt mondjuk, megtiltottuk. Ha megoldásunkat visszahelyettesítenénk a (29) impulzusegyenletekbe, ellentmondásra jutnánk. A bal oldalon fellépő impulzuserőnek kimozdult vízfelszín híján nincs ellenereje, hiszen $\eta = 0$ mellett az impulzusegyenlet jobb oldalán is nulla áll. Ezzel együtt maga a megoldás sem tartalmazza a kimozdult vízfelszín hatását.

Elemezhetnénk algebrai úton, hogy mekkora az impulzuserő, amely miatt az impulzusegyenletek nem teljesülnek, helyette numerikus modell eredményeivel hasonlítjuk össze megoldásainkat. A modell mélységintegrált impulzusegyenleteket és folytonossági egyenletet old meg, derékszögű koordinátákkal:

Az egyenletekben p, q, h, η a már definiált fajlagos vízhozammező komponensek, teljes vízmélység, és vízfelszín kilendülés a nyugalmi szinthez képest; g, ρ, ν a nehézségi gyorsulási állandó, a víz sűrűsége és örvényviszkózitási együtthatója. Az örvényviszkózitási együttható a Reynolds-féle pótfeszültségek kifejezésének analógja a mélységintegrált leírásban. További tagok a szél- és meder-csúsztatófeszültségek komponensei, τ_{wx} és τ_{wy} , valamint τ_{bx} és τ_{by} . A szimuláció során szél-csúsztatófeszültséget nem aktiválunk, a fenék-csúsztatófeszültség pedig a mélységátlagolt sebesség kvadrátikus függvényeként kerül értelmezésre.

A feladat implementációja az állandó, Q vízhozam átáramlásával valósul meg. A vízhozam, mint be- és kifolyó térfogatáram lett definiálva. A beáramlásnál rávezető csatornákon (összesen 100 darab) keresztül érkezik a víz, az $\alpha(R) = A$ menetemelkedési szög rávezető csatornák irányításán keresztül jut érvényre. A modell az állandósult állapot beálltáig fut, ami azt jelenti, hogy az (58) egyenletekben az időfüggő tagok súlya nullává válik, és a többi tag között áll be dinamikus egyensúly, amely a vízfelszín gra-

diens tagon keresztül egy (leszívási) felszingörbe kialakulásával is együtt jár.

Két modellváltozatot vizsgálunk, a tartomány kiterjedése mindkét esetben

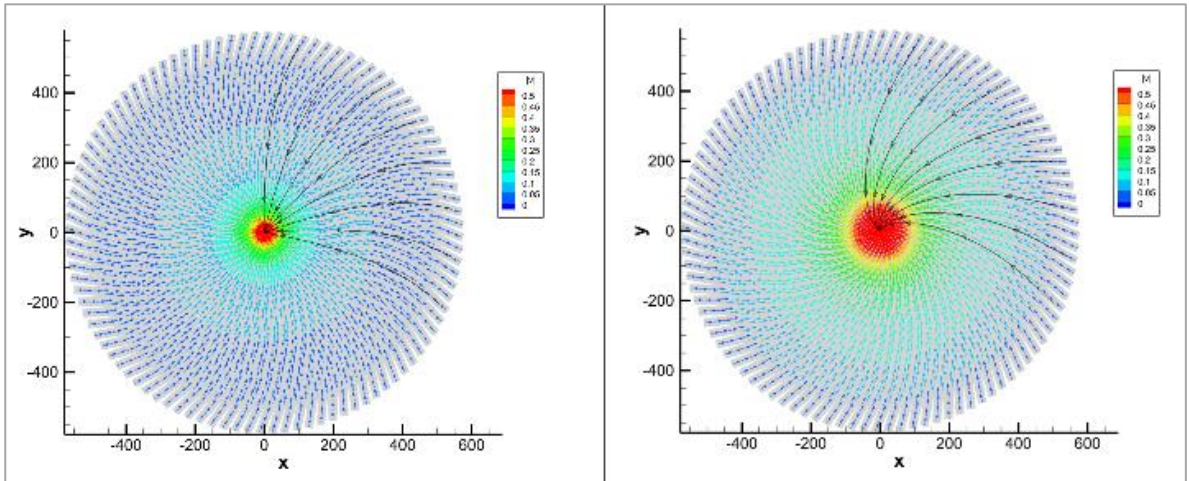
$$R = 500 \text{ m}, \quad (59)$$

a csatornák szögét a körhöz képest mínusz 70° -ra vesszük fel. Két különböző vízhozammal hajtjuk meg a modellt, ezek és a hozzájuk tartozó (a szimulációból eredményeiből kiolvasott) menetemelkedések és vízmélységek $r = R$ -ben a következők:

$$Q_1 = 100 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \quad A_1 = -70^\circ, \quad H_1 = 1 \text{ m},$$

$$Q_2 = 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \quad A_2 = -66^\circ, \quad H_2 = 4.5 \text{ m}. \quad (60)$$

A szimulációból kapott sebességmezők a 6. ábrán láthatók, dimenziós ábrázolásban. A kisebb vízhozam esetében a radiális komponens markánsabban érvényesül, hiszen kisebb impulzuserő hajtja az áramlást tangenciális irányban. Az eredményeket advékiós modellünkkel összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy azok jellegükben a 4. ábrán látható, az (56) feltételhez tartozó megoldásokhoz hasonlítanak.



6. ábra. Sebességmezők a numerikus szimulációval számítva, bal oldalon $Q_1 = 100 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ vízhozamhoz, jobb oldalon $Q_2 = 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ vízhozamhoz. (Megjegyzés: A színskála a sebesség nagyságára utal m/s mértékegységgel. A fekete vonalak áramvonalakat jelentenek.)

Figure 6. Velocity fields calculated by numerical simulation for $Q_1 = 100 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ on the left and $Q_2 = 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ on the right. (Note: The colour scale refers to the magnitude of speed in m/s. Black lines represent streamlines.)

Kvantitatív összehasonlításához a numerikus eredményekhez tartozó menetemelkedés-eloszlásokat vetjük össze az advékiós modell kapcsolódó menetemelkedés függvényével. A modellek összekapcsolását a mélységátlagolt örvényességeken keresztül tesszük meg. Mivel advékiós modellünkre állandó örvényesség jellemző, a numerikus modellből számított örvényességeloszlásból egy átlagértéket számítunk és rendeljük azt az advékiós modellhez. A numerikus modell meglehetősen homogén és mindenhol 10^{-5} 1/s nagyságrendű örvényességeloszlást mutat. Az átlagot a cellaméretre súlyozva adjuk meg,

$$\zeta_{01} = 3.7 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{s}}, \quad \zeta_{02} = 6.1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{s}}. \quad (61)$$

Behelyettesítjük a (61) örvényességeket az (59)-(60) jellemzőkkel együtt advékiós modellünk dimenziótlan csoportját jelentő (48) kifejezésbe:

$$\varepsilon_1 = \frac{\pi R^2 H_1 \zeta_{01}}{Q_1} = 0.291, \quad \varepsilon_2 = \frac{\pi R^2 H_2 \zeta_{02}}{Q_2} = 0.216. \quad (62)$$

Kiszámítjuk a menetemelkedés kotangenseket is (60) alapján:

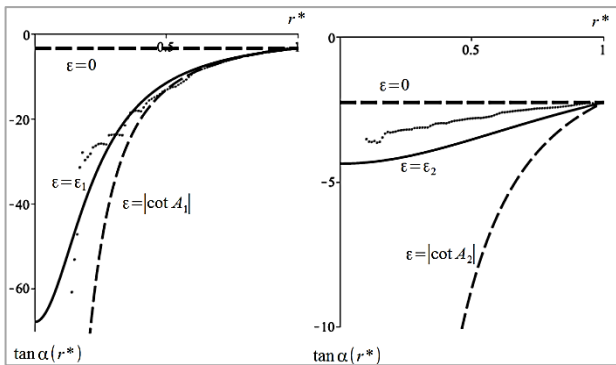
$$|\cot A_1| = 0.364, \quad |\cot A_2| = 0.445. \quad (63)$$

A numerikus eredményekből kapott (62)-(63) értékek kielégítik az (56) feltételt, amely az advékiós modell megoldásainak fizikailag lehetséges részeseteire tesz megszorítást:

$$0 < \varepsilon_1 < |\cot A_1|, \quad 0 < \varepsilon_2 < |\cot A_2|. \quad (64)$$

Végül ábrázoljuk a numerikus eredményekből közvetlenül kinyert menetemelkedés-eloszlásokat (az ábrán pontsorozattal jelöljük), valamint a (62)-(63) értékekkel paraméterezett, az advékiós modellhez tartozó (50) analitikus

menetemelkedés függvényét (folytonos vonal), és az $\varepsilon = 0$ és $\varepsilon = |\cot A|$ határesetekhez tartozó menetemelkedés függvényeket (szaggatott vonalak); ez látható a 7. ábrán.



7. ábra. Menetemelkedés eloszlások bal oldalon $Q_1 = 100 \frac{m^3}{s}$ vízhozamhoz, jobb oldalon $Q_2 = 1000 \frac{m^3}{s}$ vízhozamhoz. (Megjegyzés: Pontsorozattal a numerikus szimulációból közvetlenül kinyert menetemelkedéseket ábrázoljuk, a folytonos és szaggatott vonalakkal az analitikus, (50) menetemelkedés függvényt rajzoltuk ki a (62)–(64) feltételekhez tartozó esetekre.)

Figure 7. Polar slope radial distributions on the left side for $Q_1 = 100 \frac{m^3}{s}$ water flow, on the right side for $Q_2 = 1000 \frac{m^3}{s}$ water flow

(Note: The series of points is used to plot the solar slopes obtained directly from the numerical simulation, and the solid and dashed lines are used to draw the analytical solar slope (50) function for the conditions (62) to (64).)

ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat címében feltett kérdésre – miszerint mennyire örvénymentes a lefolyó örvény – a rövid válasz az lehetne, hogy majdnem. Ez a kis örvényesség azonban szignifikánsan eltérő menetemelkedésű spirális áramvonalakhoz vezet, mint az örvénymentes esethez tartozó (állandó menetemelkedésű) logaritmus spirális áramvonalak. Az örvénymentes modell után definiált advekciós modellel beláttuk, hogy az áramlás jellegét elsősorban a folyadék tethetlensége határozza meg. Dimenziómentes feltételt vezetünk le az áramlás fizikai és geometriai paramétereinek kapcsolatáról, amelyet numerikus kísérletek is igazoltak.

Az advekciós modellhez tartozó örvényesség érzékeny paraméternek bizonyul, az ε dimenziómentes állandót úgy befolyásolja, hogy a 7. ábrán látható szaggatott görbék közötti síktartományban mindenhol realizálható menetemelkedés eloszlások vannak. A valóságban persze egyetlen görbén realizálódik egy megoldás, ezeket kerestük meg a két vizsgált esetre numerikus modellezéssel. Ahhoz, hogy modellünk általánosan felhasználható legyen, az örvényesség konkrét megadása szükséges a numerikus adatok nélkül. Ehhez további, adott esetben aszimptotikusan illesztett (Stepanyants 2008) peremfeltétel szükséges. Fontos lenne továbbá az eredmények kvantitatív összevetése szakirodalmi adatokkal is.

Modellünk alkalmas lehet különböző mederalakok hatásának vizsgálatára. Például konvex és konkáv vezérgörbéjű, forgásszimmetrikus mederformák (kifolyó körül alakítható mesterséges topográfia) hatása az áramvonalak menetemelkedésére, a vízhozam-vízszint-örvényesség kapcsolatra, esetleg a karakterisztikus időkre. Ezen további megfontolások műszaki szempontból is értékes eredményekre vezethetnek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők hálással köszönik dr. Kalmár-Nagy Tamásnak és dr. Torma Péternek a numerikus modellezést és az eszmecsereket.

A cikkben bemutatott eredmények a 2018-1.2.1-NKP-2018-00011 számú, „Tiszta ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” elnevezésű NKFIH Nemzeti Kiválósági Program projekt keretében készültek.

IRODALOMJEGYZÉK

Azarpira M., Zarrati A.R. (2019). A 3D analytical model for vortex velocity field based on spiral streamline pattern. *Water Science and Engineering*, 12, 244-252.

Borthwick A.G.L., Kaar E.T. (1993). Shallow flow modelling using curvilinear depth-averaged stream function and vorticity transport equations. *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 17, 417-445.

Burgers J.M. (1940). Application of a model system to illustrate some points of the statistical theory of free turbulence. *Nederl. Akad. Wetensch. Proc.*, 43, 2-12.

Duinmeijer A., Oldenzien G., Clemens F. (2020). Experimental study on the 3D-flow field of a free-surface vortex using stereo PIV. *Journal of Hydraulic Research* 58, 105-119.

Flokstra C. (1976) *Generation of two-dimensional horizontal secondary currents: research report*. Delft Hydraulics Laboratory, Delft.

Hite Jr. J.E., Mih W.C. (1994). Velocity of air-core vortices at hydraulic intakes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120, 284-297.

Józsa J. (2001). *Sekély tavak szél keltette cirkulációs áramlásai*. MTA-doktori értekezés, Budapest.

Németh E. (1963). *Hidromechanika*. Tankönyvkiadó, Budapest.

Lou Y.Q., Fan Z. (2002). Stationary models for fast and slow logarithmic spiral patterns in disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 329, L62-L66.

Niu H. és társai (2017). An analytic model of a typhoon wind field based on spiral trajectory. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 231 (4), 818-827.

Odgaard A.J. (1986). Free-surface air core vortex. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112, 610-620.

Pedley T.J. (1969). The viscous vortex induced by a sink on the axis of a circulating fluid in the presence of a plane free surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 36, 219-238.

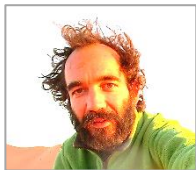
Rankine W.J.M. (1858). *A Manual of Applied Mechanics*. Charles Griffin, London.

Stepanyants Y.A., Yeoh G.H. (2008). Stationary bathtub vortices and a critical regime of liquid discharge. *Journal of Fluid Mechanics*, 604, 77-98.

Sun H., Liu Y. (2015). Theoretical and experimental study on the vortex at hydraulic intakes. *Journal of Hydraulic Research*, 53, 787-796.

Vreugdenhil C.B. (1994). *Numerical methods for shallow-water flow*. Springer Science+Business Media, Dordrecht.

A SZERZŐK



SÁNDOR BALÁZS, okleveles vízmérnök, a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék tudományos segédmunkatársa.

SZABÓ K. GÁBOR, PhD (fizikai tudományok), a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék egyetemi docense.

HAJNAL GÉZA, PhD (építőmérnöki tudományok), a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék egyetemi docense.



Illusztráció: Víznyelőben kialakuló örvénylő áramlás

Forrás: <https://pixabay.com/photos/vortex-water-flow-water-surface-4291434/>

Hullámmódosított turbulens impulzusáram mérése és becslése a Balaton légkör-víz határfelületén

Lükő Gabriella*, Torma Péter*, Weidinger Tamás**, Krámer Tamás*

* Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. (E-mail: torma.peter@emk.bme.hu)

** Meteorológiai Tanszék, Eötvös Loránd Tudományegyetem, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

Kivonat

A szél keltette hullámmódosított turbulens impulzusáram kialakuló turbulens cserefolyamatoknál. A turbulens impulzus- és hőáramok profil-alapú, fluxus-gradiens eljárással lokálisan számíthatók, ami a Monin-Obukhov-féle hasonlósági elméleten (Monin-Obukhov similarity theory - MOST) alapszik. Az oceanográfiai mérések alapján levezetett összefüggések nem helytállóak kisebb léptékű és erősen meghajrási hossz-limitált sekély tavi környezetben, ahol a kialakuló hullámok jellemzően fiatalabbak, így nagyobb merevedésgűek, valamint a fázissebességük is kisebb, mint az óceáni nyílt vízi környezetben. Jelen kutatás alapját a Balaton Keszthelyi-öblében telepített nyíltvízi hidrometeorológiai mérőállomás adatai képezik. Az impulzus- és hőáramokat örvény-kovariancia műszeregyüttes mérte, míg a hullámmódosított akusztikus vízfelszínkövető rögzítette. A mérések alapján új, sekély tavi, meghajrási hossz-limitált körülményekre alkalmazható légkör-víz határfelületen kialakuló impulzusáramra becslési összefüggéseket vezetünk le. Az eredmények összevetése releváns, hullámmódosítási paramétereket is figyelembe vevő eljárásokkal (pl. a hullámmódosított Charnock-féle összefüggésekkel) megmutatta, hogy az ellenállási tényező és érdességi magasság általunk levezetett paraméterezései jelentősen eltérnek az oceanográfiai összefüggésektől.

Kulcsszavak

Impulzusáram, hullámmódosítás, szél, érdességi magasság, örvény-kovariancia, Balaton.

Wave-driven turbulent momentum exchange measurement and parameterization at the air-water interface of Lake Balaton

Abstract

Wind-induced waves play a key role in air-lake momentum and heat exchange. Turbulent momentum and heat fluxes can be calculated locally using the profile based, flux-gradient method following the Monin Obukhov Similarity Theory (MOST). The water surface of fetch-limited shallow lakes differ significantly from open ocean circumstances since the wave field is characterized by young and growing waves that are steeper and can collapse by whitecapping at lower wind speeds, and travel with a lower phase velocity. Consequently, momentum (and heat) flux estimation methods arising from oceanographic observations cannot be directly applied. However, few attempts have been made to describe air-water turbulent exchange in case of large, but still fetch-limited shallow lakes. Turbulent flux measurements were performed in the basin of Keszthely in Lake Balaton. Momentum and heat fluxes were measured with eddy-covariance technique at an offshore station, while waves were simultaneously recorded with an underwater, upward looking acoustic surface tracking instrument. In this study, we derive new momentum flux estimation formulations based on the measured wind stress and surface waves which are applicable to strongly fetch-limited conditions. We compare our results with relevant model formulations that attempt to estimate momentum flux using different wave state parameterizations (i.e. wave age and wave steepness modified Charnock formulations) and show that derived drag and roughness length parameterizations differ significantly from oceanographic formulas.

Keywords

Momentum flux, surface waves, wind, roughness length, eddy-covariance, Lake Balaton.

BEVEZETÉS

A légkör-víz határfelületen kialakuló impulzusáram ($\rho \cdot u_*^2$, ahol ρ a levegő sűrűsége) meghatározására két módszert alkalmaznak leggyakrabban. A szél-csúsztatósebesség (u_*) számítható: (i) ellenállási tényező segítségével a szélesebesség függvényében, vagy (ii) a vízfelszín felett kialakuló (stabilitási függvényekkel korrigált) logaritmikusság alapján. Ez utóbbi módszert a Monin-Obukhov-féle hasonlósági elmélet (Monin-Obukhov Similarity Theory - MOST) írja le (Weidinger és társai 2000, Kiss és Torma 2014). Az ellenállási tényező (C_D) használata egyszerű, azonban értéke széles skálán mozog 0,0005-0,004 [-] között (lásd a hivatkozásokat a lentebbi ábrákon). A szél-sebesség-profilra épülő módszer esetében a számítás összetettebb, mivel mind az impulzusáram, mind a hullámmódosított vízfelszín érdességi magassága (z_0) ismeretlenek.

A legelterjedtebb érdességi magasság-becslési módszer a Charnock-féle összefüggés, $z_0 = \alpha \cdot u_*^2/g$, ahol g a nehézségi gyorsulás, α a Charnock-féle tényező, melynek átlagos értéke 0,012-0,018 [-] között változik az irodalomban (Charnock 1955, Garratt 1977, Wu 1980). Vickers és Mahrt (1997) különválasztotta a RASEX program méréseit meghajrási hossz szerint és az ezekből levezetett Charnock-tényezőre $\alpha = 0,018$ -at kapott nagy (15-25 km), $\alpha = 0,073$ -at rövid (2-5 km) meghajrási hossz jellemezte körülmények között. Ismereteink szerint ez az eddigi legmagasabb mért Charnock- α érték. Továbbá, Taylor és Yelland (2001) azt tapasztalta, hogy a meglévő összefüggések, amelyeket oceanográfiai adatsorokra fejlesztettek ki, nem tudják előrejelezni a mért nagyobb felszíni ellenállást az Ontario tóban a nagyon fiatal hullámmódosított hullámok esetére.

Utóbbi már számszerűen is rámutat arra, hogy az ellenállási tényező és az érdességi magasság kapcsolatban áll a hullámmási viszonyokkal. A hullámmást jellemezhetjük a hullámmkorral (c_p/u_*) vagy az inverz hullámmkorral (u_*/c_p), ahol c_p a hullámm fázissebessége. Az inverz hullámmkor $u_*/c_p = 0,02-0,2$ [-] között változik az oceanográfiai irodalomban, ehhez képest a saját méréseink során, a rövid meghajtási hossz (~3 km) esetén $u_*/c_p = 0,02-0,5$ [-] között alakult. A hullámmkor-alapú paraméterezés fontosságát igazolja, hogy *Lin és társai (2002)* kutatásukban megmutatták, hogy az ellenállási tényező jobban korrelál a hullámmkorral, mint a szélességgel. Több tanulmány pedig előnyben részesíti a hullámmási paraméterek és a *Charnock-féle* összefüggés kombinációját hullámmási-függő α -egyenletek levezetésével, habár előnyösebb a hullámmkort közvetlenül összefüggésbe hozni a z_0 érdességi magassággal (vagy annak normalizált értékével), mint az α -tényezővel, mert utóbbi eset önkorrelációval terhelt (*Smith és társai, 1992, Johnson és társai, 1998, Drennan és társai 2003, Fisher és társai 2015*). A hullámmási viszonyokat a hullámmkor mellett a hullámmmeredekséggel is jellemezhetjük (H_s/L), ahol H_s a szignifikáns hullámmmagasság és L a hullámmhossz. A hullámmmeredekség $H_s/L = 0,02-0,06$ [-] között változik mind az irodalomban, mind saját méréseinknél.

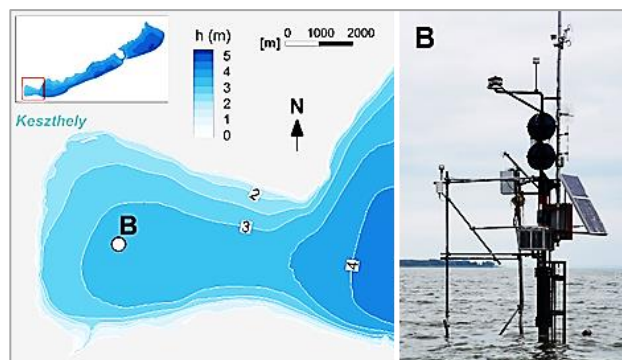
Összefoglalva, a legfőbb különbség a Balaton és az óceáni viszonyok között a rövid meghajtási hossz (*Luettich és társai 1990*). Emiatt a hullámmmezőt nagyon fiatal és magas frekvenciájú hullámmok jellemzik, és a mért inverz hullámmkorok is jóval az irodalmi értékek felett helyezkednek el. Következésképpen, a jelenleg rendelkezésre álló oceanográfiai irodalomból származó összefüggések általánosan nem alkalmazhatók az impulzusáram becslésére erősen meghajtási hossz-limitált környezetben. Az a hipotézisünk, hogy nagyobb a légáramlás ellenállása a fiatalabb és meredekebb hullámmok esetén, mint amilyen nyíltvízi vagy akár partmenti óceáni körülmények között jellemző. Tanulmányunkat az ösztönözte, hogy meghatározzuk az impulzusáramot nagy kiterjedésű, de meghajtási hossz-limitált tóra, illetve olyan becslési összefüggéseket vezessünk le, amelyek közvetlenül alkalmasak hidrodinamikai, illetve meteorológiai modellekben történő alkalmazásra. A tanulmányban meghatározzuk a Balatonra jellemző ellenállási tényezőket és érdességi magasságokat örvény-kovariancia mérés adatainak felhasználásával, majd összevetjük és kiértékeljük a levezetett és az irodalomban fellelhető impulzusáram-becslő összefüggéseket.

TEREPI MÉRÉSEK

A BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéke, más hazai és nemzetközi egyetemekkel együttműködve, 2018-ban másfél hónapig, 2019-ben pedig öt hónapon keresztül üzemeltetett a Balaton Keszthelyi-medencéjében egy nagyfrekvenciájú víz alatti nyomás-, áramlás- és vízszintmérővel kiegészített meteorológiai mérőállomást (*1. ábra*).

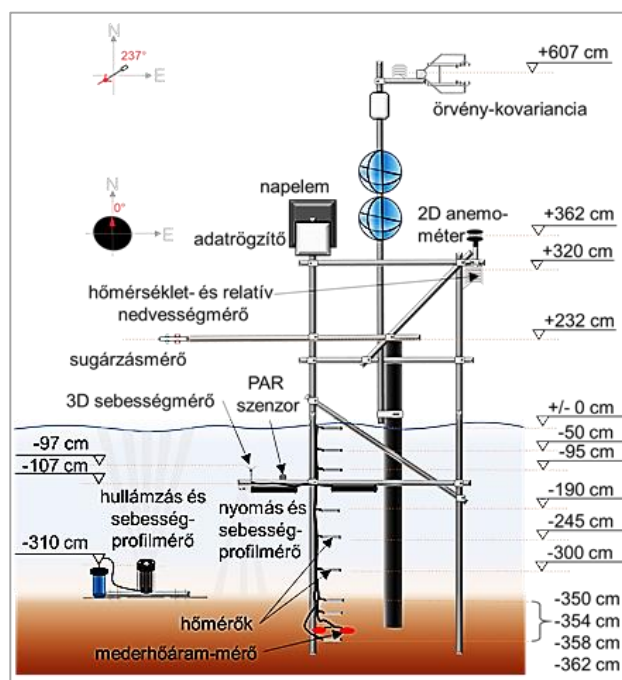
A Balaton sekély tó, az átlagos vízmélysége 3,2 m, vízfelszíne pedig 600 km². A Keszthelyi-medence közepén felállított B jelű mérőállomáson 2-10 km között változik a meghajtási hossz, de az uralkodó ÉÉNY, DNY és

DK-i szélirányok esetén hozzávetőleg 3 km-es meghajtási hossz a jellemző. Az állomás műszerezése a *2. ábrán* látható, miszerint a légtöri oldalon 10 Hz frekvencián működött egy örvény-kovariancia műszeregyüttes (Campbell CSAT3 szonikus anemométer és Campbell EC150 nyílt utas CO₂/H₂O gázanalizátor). A turbulens áramok mérése rutin meteorológiai mérésekkel voltak kiegészítve, úgymint szél (Gill WindSonic2), léghőmérséklet és relatív nedvességtartalom (Vaisala HMP45). A vízfelszín közelítő hőmérsékletének rögzítése Campbell T107 típusú szenzorral (termisztor) történt egy úszó segítségével ~2 cm-rel a vízfelszín alatt. Emellett a vízfelszín pontos hőmérsékletét Kipp & Zonen CNR4 típusú sugárzásmérő segítségével is rögzítettük, annak visszavert hosszúhullámú sugárzásmérése alapján. A hullámmási viszonyokat egy Nortek Signature1000 típusú ultrahangos berendezéssel mértük, amely a mederfenéken volt elhelyezve és felfelé nézve követte a vízfelszínmozgást 4 Hz felbontással.



1. ábra. A hidrometeorológiai mérőállomás fotója és elhelyezkedése a Keszthelyi-medencében

Figure 1. Hydrometeorological measurement station in the Keszthely basin.



2. ábra. A hidrometeorológiai állomás műszerezettsége a telepítéskori szintekkel

Figure 2. Instrumentation of the hydrometeorological station with heights from the water surface at the time of installation

MÓDSZEREK

A nyers örvény-kovariancia (eddy-covariance – EC) adatokat a Bayreuth Egyetemen fejlesztett Turbulence Knight 3 (TK3) szoftverrel dolgoztuk fel, és számítottuk az impulzusáramokat (Mauder és Foken 2011). A feldolgozás a kiugró értékek eltávolításával kezdődött (a kiszűrt adatok helyén nem történt interpoláció). A további alkalmazott korrekciós számítások a következők voltak: i) kettős forogás a szélmérő dőlésének korrigálására (McMillen 1988, Wilczak és társai 2001); ii) Moore-korrekció a spektrális veszteség csökkentésére; iii) Schotanus-korrekció felhajtóerő miatt (Foken és társai 2004); iv) Webb-korrekció a sűrűségváltozások hatása miatt (Webb és társai, 1980). A turbulens impulzusáramokat 20 perces átlagokra számítottuk. A mért adatok minőségbiztosítása a Foken és társai (2004) féle értékelési rendszert követi, miszerint az adatokat 9 minőségi osztályba (quality class - QC) soroltuk többféle teszt együttes értékelése alapján. Az osztályozás szerint 1 jelenti a kiváló, 9 a rossz minőséget. A rossz minőségű adatok kiszűrésére alkalmazott küszöbértékek irodalmi ajánlások és érzékenységvizsgálat alapján választottuk meg. Adatot akkor fogadunk el, ha QC < 7 minőségi osztályba kerül és a fluxus variancia (σ_w/u^*) teszt kevesebb, mint 40%-os eltérést mutat a mért és az elméleti értékek között. Ez utóbbi a turbulens viszonyok stacionaritását hivatott biztosítani, ami alapfeltevése az örvény-kovariancia eljárás alkalmazhatóságának. Emellett további két minimum határértéket is előírtunk a stacionárius állapot biztosítására úgy, mint $\Delta U_{10N} < 50\%$ szélesebesség-változás és $\Delta Dir < 30^\circ$ szélirány-változás, ahol U_{10N} a 10 méter magasan mért neutrális szélesebességet jelenti, amely a szakirodalmi összehasonlításokban használatos és Δ pedig két egymást követő 20 perces szélesebesség és szélirány átlag értékei közötti különbséget jelenti. Végül, további két határértéket alkalmaztunk a kis szelek kiszűrésére, mint $U_{10N} > 2$ m/s és $u^* > 5$ cm/s, hogy kizárható legyen a felhajtóerő által dominált szabad konvekció (Abdella és D'Alessio 2005).

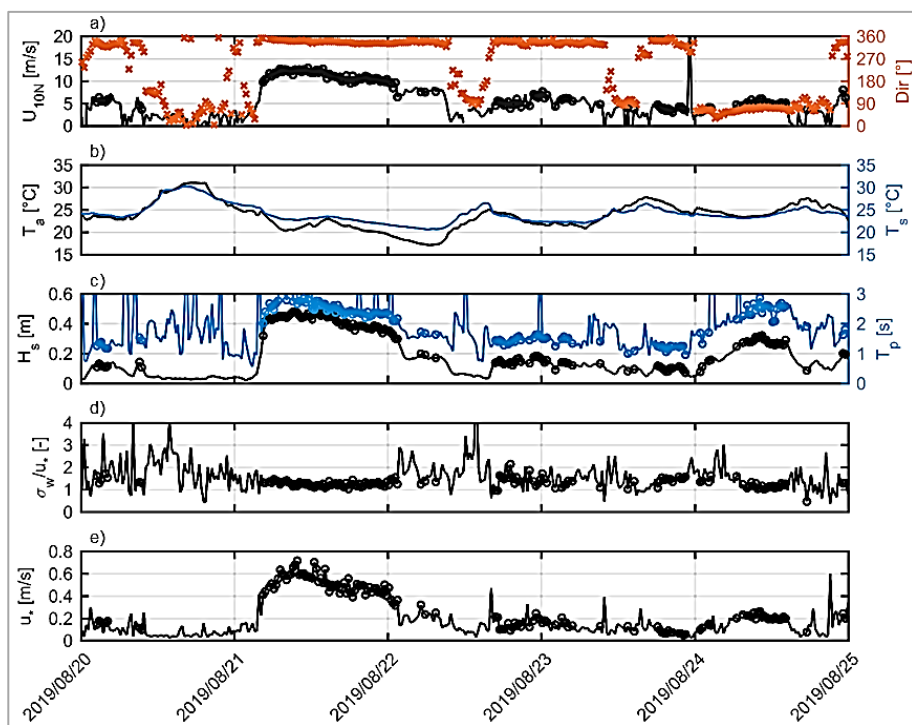
A hullámzási viszonyokat az ultrahangos távolságmérés elvén működő Signature műszerből származó nyers vízfelszínmozgás adatai alapján határoztuk meg. A feldolgozást saját fejlesztésű algoritmusok segítségével végeztük, ami tartalmazta az adatok trendmentesítését és a kiugró értékek szűrését (lineáris interpolációval kiegészítve). A hullámzást jellemző paramétereket elsősorban spektrális elemzés útján vezettük le, de az ún. zero-crossing módszerrel ellenőriztük a számításokat (Holthuisen 2007, Homoródi és társai 2012). A hullámzás statisztikai jellemzőit az EC mérésekkel megegyező 20 perces átlagokra számítottuk. A szignifikáns hullámhagasság (H_s), a periódusidő (T_p) és a hullámhossz (L) mellett további hullámzási jellemzőket is kiszámítottuk, mint a hullámkor (c_p/u^*), amely a hullám fázissebesség és a szél-csúsztatósebesség hányadosa, valamint a hullámmelegedség (H_s/L), azaz a hullámhagasság és a hullámhossz hányadosa. A hullámzás adatok esetén is alkalmaztunk szűrést, ami a meghajtási hossz-limitált viszonyokra való szűkítést és a legalább $H_s > 5$ cm hullámhagasságra való szűrést jelentették.

Az ellenállási tényezőre és az érdességi magasságra vonatkozó összefüggések levezetéséhez a következő számításokat végeztük, követve a Monin-Obukhov-féle hasonlósági elméletet: i) megválasztottuk az univerzális stabilitási függvényeket (Dyer 1974), ii) kiszámoltuk az érdességi magasságokat a stabilitási függvényekkel korrigált logaritmusos sebességprofilból, iii) korrigáltuk a szélesebességet a 10 méteres neutrális értékre (U_{10N}), és végül iv) meghatároztuk a 10 méteres neutrális ellenállási tényezőt (C_{D10N}) valamint a Charnock-tényezőt (α). Az ellenállási tényezőre, a Charnock-tényezőre és az érdességi magasságra vonatkozó összefüggéseket kapcsolati görbék illesztésével határoztuk meg, a szélesebesség és a hullámzási viszonyokat jellemző paraméterek függvényében.

EREDMÉNYEK ÉS DISZKUZZIÓ

Hidrometeorológiai jellemzők

A teljes körű adatellenőrzés és minőségbiztosítás eredményeként 2176 megbízható adatponthoz jutottunk. A kiszűrt adatok 90%-ánál a szélesebesség 4 m/s alatti volt, amikor a légköri turbulenciáról már nem mondható el, hogy tisztán mechanikai nyírás által dominált, hanem a hőmérsékleti gradiens okozta felhajtóerő által is befolyásolt. A kiszűrt adatok maradék 10%-ában, pedig a stacionárius állapotra vonatkozó feltétel nem teljesült. A szűrés után a szélesebesség a 2 és 18 m/s közötti tartományba esett. A legkisebb szignifikáns hullámhagasság 5 cm a szűrés miatt, a legnagyobb pedig ~70 cm. A mért szél-csúsztatósebességek 5 és 90 cm/s között alakultak. A mérési időszakban a légköri stabilitást 15%-ban stabil, 44%-ban instabil és 41%-ban neutrális légrétegzettség jellemezte. A 3. ábrán egy rövid időszakon szemléltettük a mért hidrometeorológiai idősorokat és az alkalmazott szűrőket. A nyers adatokat folytonos vonal, a szűrt adatokat karikák jelölik. Kis szelek esetén megfigyelhető, hogy nem teljesül a stacionárius állapot, amelyet a turbulencia kifejltségét jellemző fluxus variancia alapján történő szűrés jól kezel (3d. ábra). A függőleges sebesség fluktuáció szórása (σ_w) és a szél-csúsztatósebesség aránya, az ún. integrált turbulencia-karakterisztika, amelynek az értéke pl. neutrális állapot esetén $\sigma_w/u^* \sim 1,25$ (Foken és társai 2004). Ettől való számottevő eltérés esetén az adatot kihagytuk a további vizsgálatokból. Ha a szélesebesség és szélirány akárcsak rövidebb ideig állandósul, ez a feltétel szépen teljesül (pl. 2019. augusztus 22-e esti és 23-a hajnali órákban). A 2019. augusztus 21-i rendkívül erős szélvihar esetén pedig az elméleti érték körüli ingadozás is minimális szórással jár, ami jól mutatja, hogy teljes mértékig a szél keltette nyírás alakítja a turbulencia viszonyokat. A hullámzási paraméterek a szélesebesség mellett a széliránytól is függenek a változó meghajtási hosszúnak köszönhetően. A bemutatott idősoron az is jól látható, hogy keleti szélirányból adódó nagy meghajtási hosszúnak köszönhetően is jelentős hullámzás figyelhető meg alacsonyabb $U_{10N} \sim 5$ m/s-os szélesebesség mellett is 2019. augusztus 24-én napközben. Összességében tehát egy statisztikailag megbízható adatsor jött létre, amely a szélesebesség, szélirány és légköri stabilitás széles skáláját fedi le, és amely egyaránt kielégíti a mérési módszerrel kapcsolatos elvárásokat, valamint a vizsgált jelenség elméleti alapfeltevéseit.



3. ábra. (a) Szélsebesség (U_{10N}) és szélirány (Dir), (b) léghőmérséklet (T_a) és vízfelszín-hőmérséklet (T_s), (c) szignifikáns hullámmagasság (H_s) és periódusidő (T_p), (d) karakterisztikus turbulencia (σ_w/u^*) és az (e) impulzusáram (u^*) időszora.

(Megjegyzés: Folytonos vonallal a nyers és karikával a szűrt adatok jelölve)

Figure 3. Timeseries of (a) wind speed (U_{10N}) and wind direction (Dir), (b) air (T_a) and water surface temperature (T_s), (c) significant wave height (H_s) and wave period (T_p), (d) integral turbulence characteristic (σ_w/u^*) and (e) momentum flux (u^*)

(Note: Raw data are shown with solid line and filtered data with circles)

Ellenállási tényező

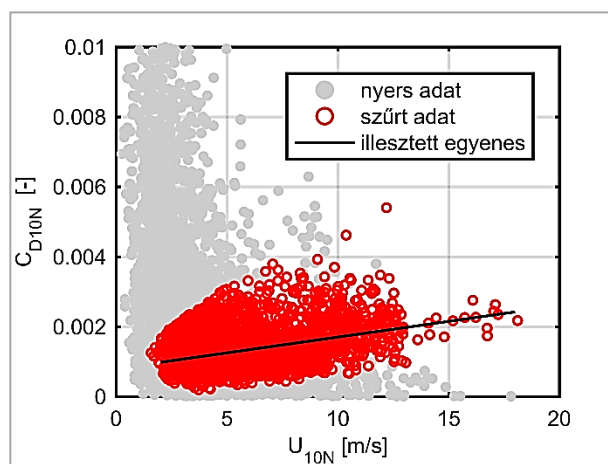
A szakirodalmat követve lineáris kapcsolatot kerestünk az ellenállási tényező és a szélesség között immáron a szűrt, minőségbiztosított adatok alapján (4. ábra).

A levezetett ellenállási tényező egyenlete

$$C_{D10N} = (0,80 + 0,09 \cdot U_{10N}) \cdot 10^{-3}.$$

Az összefüggést a jól ismert irodalmi egyenletekkel együtt tüntetjük fel az 5a. ábrán. Megfigyelhető, hogy

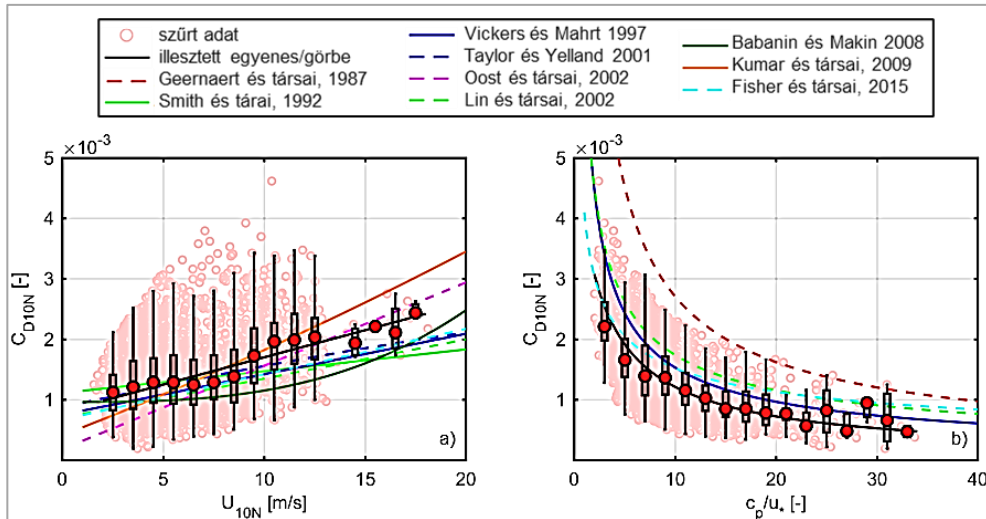
az oceanográfiai összefüggések alábecsülnék az ellenállást az erősen meghajtási hossz-limitált körülmények esetén, különösen a 8-10 m/s-os sebességtartomány felett. Ez azt is jelenti, hogy számottevő az eltérés az egyenesek meredekségében is. Az irodalmi egyenletekben az átlagos konstans $0,68 \cdot 10^{-3}$, míg az átlagos meredekség $0,077 \cdot 10^{-3}$ s/m, amelyek ~20%-kal alacsonyabbak az illesztett egyenesünk paramétereinek képest.



4. ábra. Ellenállási tényező a szélesség függvényében

Figure 4. Drag coefficient as a function of wind speed

(Note: filled grey circles represent raw data, while red circles are filtered data)



5. ábra. Ellenállási tényező (a – bal ábra) a szélesség függvényében az illesztett egyenessel és (b – jobb ábra) a hullámkor függvényében az illesztett hatványfüggvénnyel

Figure 5. Drag coefficient (a – on the left) as a function of wind speed with the fitted linear function and (b – on the right) as a function of wave age with the fitted power function

Érdekes kiemelni *Vickers és Mahrt (1997)* összefüggését, ahol hasonlóan rövid volt a meghajtási hossz (2-5 km), és az egyenesük meredeksége is hasonló az általunk levezetettéhez, de az ellenállási tényezők jelentősen alacsonyabbak a teljes szélességtartományban. *Oost és társai (2002)* egyenlete jól becsülné az impulzusáramokat 8-9 m/s feletti szélességek esetén, de túl nagy a meredeksége, így nem tudna megbízható becslést szolgáltatni kisebb szélességek esetén. Az eltérés abból is adódik, hogy 9 km-es meghajtási hossz jellemezte a méréseiket, amely kb. háromszorosa a Keszthelyi-medence nyílt vizét jellemző értékekhez képest. Az 5a. ábrán a méréseink eredményeit csoportosítva, 1 m/s-os intervallumokban ábrázoltuk. A piros kör a mediánt, a dobozok felső és alsó élei a 25 és 75, a függőleges vonalak pedig az 1 és 99%-os percentiliseket jelölik. A 8-9 m/s és a 9-10 m/s osztályok között ugrást figyelhetünk meg az ellenállási tényezőkben. Ez alapján a kisebb szélességek (<8 m/s) esetén konstans ellenállási tényezővel is jól lehetne becsülni az impulzusáramot, viszont a nagyobb szelek (>10 m/s) esetén egy másik egyenest kellene illesztenünk az adatokra. Az ellenállási tényező és szélesség kapcsolata egyértelmű, azonban egyszerűségéből adódóan nem várhatunk tőle rendkívül nagy pontosságot. A bemutatott ábrán látható nagymértékű szórás ($\sigma_{CD} = 0,49 \cdot 10^{-3}$) miatt a szélesség mellett más paraméterek bevonására is szükség van ahhoz, hogy az impulzusáram pontosabban becsülhető legyen a hullámzás befolyásolta légkör-víz határfelületen.

Több tanulmányban vizsgálták a hullámkor-alapú ellenállási tényező becslését. A felállított ellenállási tényező - hullámkor kapcsolat jelentősebben eltér az irodalmi görbektől (5b. ábra)

$$C_{D10N} = 0,01 \cdot \left(c_p/u_* + 2 \right)^{-0,85},$$

amelyek következetesen felülbecsülnék az impulzusáramot a Balaton felett, viszont a szórás kisebbre adódott ($\sigma_{CD} = 0,36 \cdot 10^{-3}$). A hivatkozott kapcsolati görbék (5a. és 5b. ábrák) az oceanográfiai adatokból származnak, ahol a hul-

lámzási viszonyokat érett hullámok jellemzik (tipikusan $c_p/u_* > 15$). Az irodalmi mérések nem tartalmazzák a Balatonra jellemző hullámkor-tartományt, ezért az azokra illesztett görbék túl meredek lesznek nagyon fiatal hullámok esetén és érvényüket veszítik. Így a hullámkort figyelembe vevő, szakirodalmi adatok alapján kapott összefüggés ellentmond a szélesség alapján történő becsléssel, ami megerősíti azt a feltételezésünket, hogy szükség van új összefüggések levezetésére a meghajtási hossz-limitált és fiatal hullámokkal jellemzett környezetben.

Érdességi magasság

Fizikailag jól megalapozott impulzusáram-becslési módszer a Monin-Obukhov-féle hasonlósági elmélet, amely konstans csúsztatófeszültséggel jellemezhető és a légköri stabilitás függvényében változó, logaritmikushoz közeli profilokat feltételez a vízfelszín felett. A vízfelszín ellenállását az érdességi magassággal jellemezhetjük, amely a hullámzás függvényében dinamikusan változik. A legerősebb *Charnock-féle* összefüggés ($z_0 = \alpha \cdot u_*^2/g$) megadja a vízfelszín érdességi magasságát a szél-csúsztatósebesség és a Charnock-tényező ismeretében. Legegyesebb esetben ez az α -tényező konstans. Az EC-ből származó u_* és a MOST alkalmazásával meghatároztuk α értékét minden szűrt, 20 perces átlagra vonatkozó adatra. Végeredményben a mért értékek átlaga $\alpha = 0,035$ -re adódott. Ez körülbelül háromszorosa az irodalmi átlagértékeknek, amelyek 0,012-0,018 között változnak; *Edson és társai (2013)* szerint felső határa 0,028, ugyanakkor *Vickers és Mahrt (1997)* által levezetett 0,073-as értékénél kisebb. Az eredmények így is igazolják hipotézisünket, miszerint meghajtási hossz-limitált környezetben nagyobb a felszíni ellenállás, mint óceáni körülmények között.

Az ellenállási tényező hullámzással mutatott kapcsolatot, illetve az irodalmi példákat látva, módosított Charnock-összefüggést vezettünk le, amely már a hullámzás hatását is figyelembe veszi (6. ábra).

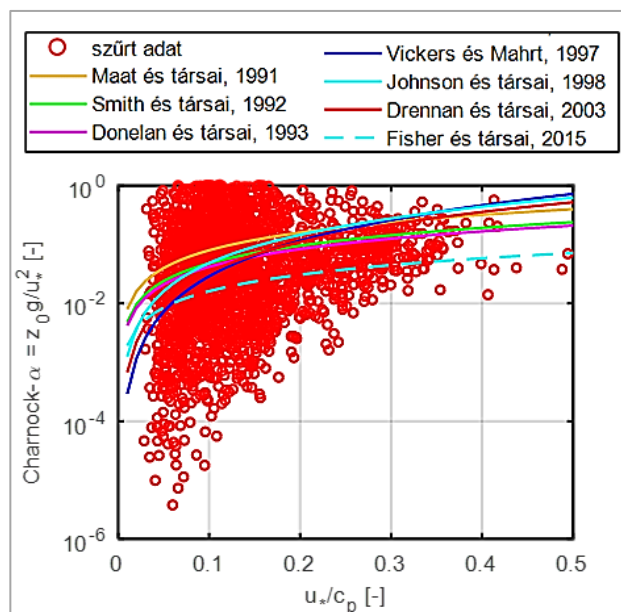
Azonban a Charnock-összefüggésben rejlő önkorrreláció miatt előnyösebb a mért érdességi magasságokat köz-

vetlenül a hullámzási paraméterekkel kapcsolatba hozni (Johnson és társai 1998, Drennan és társai 2003). Az önkorreláció abból adódik, hogy α -t a mérésekből a Charnock-összefüggést átrendezve kapjuk meg az $\alpha = z_0 \cdot g / u_*^2$ egyenletből. Amennyiben α és c_p / u_* között függvénykapcsolatot keresünk, akkor α értéke már önmagában hordozza u_* -ot és így félrevezető a két változó közötti korreláció. Végeredményben gyenge kapcsolatot találtunk a Charnock-tényező és az inverz hullámkor között (6. ábra), ami megerősítette azt a törekvésünket, hogy az érdességi magasságot hozzuk közvetlenül kapcsolatba az egyes hullámzásjellemzőkkel. Egyfelől az érdességi magasságnak gyakorlatilag nem volt kapcsolata a hullámmereedséggel

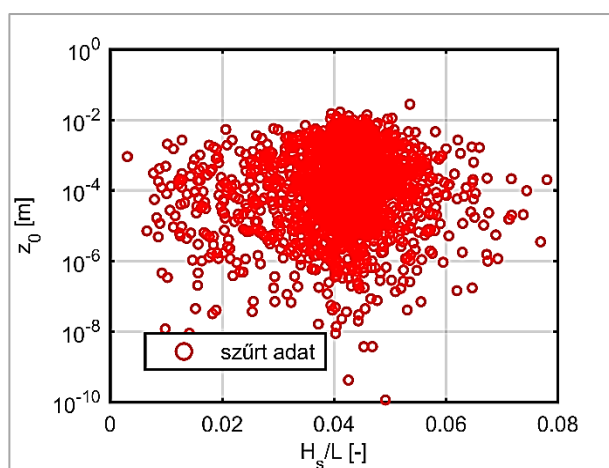
(7. ábra), ugyanakkor az inverz hullámkorral már erős korrelációt mutatott (8. ábra). A 8. ábrán a mérések eredményeit a pontfelhő mellett $0,025 u_* / c_p$ intervallumokban is ábrázoltuk, szintén a mediánt és az 1, 25, 75 és 99%-os percentiliseket jelölve. Az impulzusáram becslés céljából hatványfüggvényt illesztettünk a 2176 db mérési pontra:

$$z_0 = 0,02 \cdot \left(u_* / c_p - 0,04 \right)^2,$$

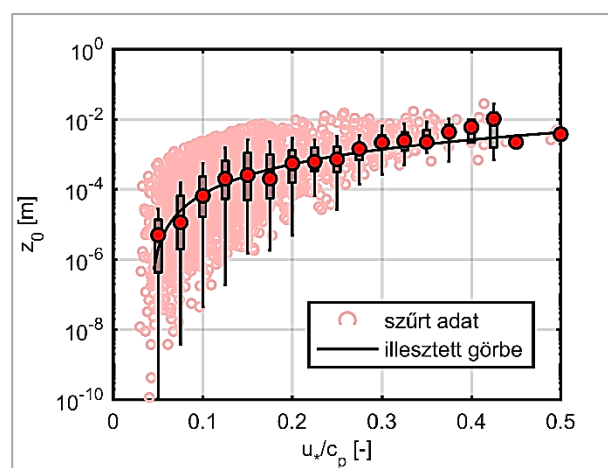
amelyek amellet, hogy meglehetősen szórnak, aszimptotikus viselkedést mutatnak és közelítik a maximális 5 mm-es érdességi magasságot. Ahogy ezt a görbe is mutatja, minél fiatalabb a hullám, annál nagyobb az érdességi magassága.



6. ábra. Charnock- α az inverz hullámkor függvényében az irodalmi összefüggésekkel
Figure 6. Charnock- α as a function of inverse wave age with the literature functions



7. ábra. Érdességi magasság a hullámmereedség függvényében
Figure 7. Roughness length as a function of wave steepness

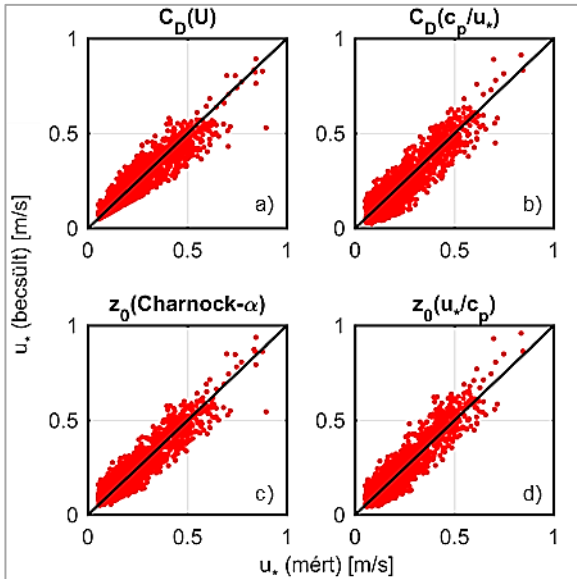


8. ábra. Érdességi magasság az inverz hullámkor függvényében az illesztett hatványfüggvényel
Figure 8. Roughness length as a function of inverse wave age with the fitted power function

Impulzusáram becslése

Az ellenállási tényezők és érdességi magasság-összefüggések kiértékeléséhez elvégeztük a szél-csúsztatósé-

besség becslését és összevetettük az EC műszeregységek által mért értékekkel (9. ábra).



9. ábra. A mért és a négy vizsgált becslési módszerrel kapott szél-csúsztatósebesség

Figure 9. Measured and estimated friction velocities by the analyzed four estimation methods

Az ellenállási tényező és szélesség kapcsolat ($C_D(U)$) alapján C_D -ből egyszerűen kifejezhető volt a becsült u_* érték ($u_*^2 = C_{D10N} \cdot U_{10N}^2$), amit négyzetre emelve és megszorozva a légsűrűséggel megkapjuk az impulzusáramot. Az ellenállási tényező - hullámkor kapcsolat ($C_D(c_p/u_*)$) kiértékelése csak iterációs úton lehetséges, hiszen a hullámkor maga is függ a szél-csúsztatósebességtől. A szűrt adatok mindegyikénél legfeljebb nyolc lépés alatt konvergált az iteráció. Az ellenállási tényezőkkel történő szél-csúsztatósebesség becslés eredményeit a 9a. és 9b. ábrák mutatják be. A további két becslési módszer a MOST alapján történt, ahol a szél-sebességprofil szintén iterációs úton határoztuk meg (Kiss és Torma 2014). A 9c. és 9d. ábrákon a konstans Charnock-tényezővel ($z_0(\alpha)$), illetve a inverz hullámkoros ($z_0(u_*/c_p)$) érdességi magasság-közelítés alkalmazásával kapott eredményeket ábrázoltuk. A becslések jó eredményt adtak, amelyeket az 1. táblázatban összefoglalt pontossági mutatók igazolnak. A determinációs együttható, $R^2 = 0,84-0,87$, míg az átlagos négyzetes középhiba $RMSE = 0,050-0,055$ m/s között változik. Nincsenek nagy eltérések a becslési pontosságok között, ami azt mutatja, hogy mindegyik módszer alkalmas sekély tavak impulzusáram-becslésére. Az egyszerűbb Charnock-konstanssal történő módszer egyáltalán nem múlja alul a hullámkoros paraméterezést ~ 3 km meghajtási hossz esetén, azonban a térbeli változékonyság fontos és vizsgálandó. Lükő és társai (2019) bemutatták több mérőállomás adatainak bevonásával, hogy Charnock- α értéke nem állandó a tavon, amelynek következtében egy értékkel nem végezhetünk pontos, teljes tóra kiterjedő becslést. Ugyanakkor a hullámkor figyelembe tudja venni a térbeli változékonyságot, és azzal pontosan becsülhető az impulzusáram térbeli eloszlása is. A konstans értékkel kapott igazán jó egyezés oka, hogy a jellemző szélirányok esetében a meghajtási hossz történetesen közel ugyanaz, mivel az állomás az öböl közepén helyezkedett el.

1. táblázat. Alkalmazott impulzusáram-becslési módszerek pontossági mutatói

Table 1. Evaluation metrics of applied momentum flux estimation methods

	Ellenállási tényező		Monin-Obukhov-féle hasonlósági elmélet	
	$C_D(U)$	$C_D(c_p/u_*)$	$z_0(\text{Charnock-}\alpha)$	$z_0(u_*/c_p)$
R^2 [-]	0,86	0,84	0,87	0,86
RMSE [m/s]	0,051	0,055	0,050	0,053

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KONKLÚZIÓK

Örvény-kovariancia és akusztikus hullámzasmérő segítségével igazoltuk hipotézisünket, miszerint a vízfelszín ellenállása fiatal hullámok esetén, azaz meghajtási hossz limitált környezetben jelentősen nagyobb, mint nyíltvízi óceáni körülmények között. A meghajtási hossz korlátozottságának következtében nagyon fiatal hullámok alakulnak ki, ami tipikus jellemzője a közepes és nagy kiterjedésű édesvízi tavaknak, mint amilyen a Balaton. A leggyakrabban használt impulzusáram-számító módszerek, az ellenállási tényező alapú paraméterezés és a Monin-Obukhov-féle hasonlósági elméleten alapuló gradiens-módszer, mind jól működnek meghajtási hossz limitált környezetben is a paramétereik megfelelő illesztése után. Az újonnan levezetett paramétereik összesen több, mint hat hónapnyi feldolgozott mért adatsorból származnak, amelyből szigorú minőségellenőrzési szűrők segítségével megbízható adatokat használtunk fel. Fontos megjegyezni, hogy a tanulmányunkban nem foglalkoztunk az impulzusárammal kis szelek esetén. A kis szeles időszakok ugyan az adatsor 75%-át teszik ki, azonban nem gerjesztenek számottevő vízmozgást. Ismereteink szerint erre irányuló kutatásokat eddig csak szintén óceáni körülmények között végeztek (Edson és társai 2007). A Monin-Obukhov-féle hasonlósági elméleten alapuló profil módszer fizikailag jól megalapozott, habár meg kell határoznunk hozzá a légköri stabilitási függvényeket és az érdességi magasság modellt, amely leírja a hullámzó vízfelszín aerodinamikai ellenállását. Az örvény-kovariancia méréseket felhasználva felülvizsgáltuk a Charnock-tényezőt meghajtási hossz-limitált körülmények között. Ennek értéke $\alpha = 0,035$ -re adódott, amely sokkal magasabb, mint az irodalomban található értékek. Az érdességi magasság - inverz hullámkor kapcsolatát is sikerült meghatároznunk, amely definíciójából fakadóan mentes a szél-csúsztatósebesség önkorrrelációjától. Mindkét érdességi magasságra vonatkozó összefüggés hasonlóan jó eredményt ad az impulzusáram lokális becslésekor. Mivel a hullámkor egy meghajtási hosszról erősen függő térbeli változó, így a hidrodinamikai modellek ezzel az összefüggéssel az impulzusáram térbeli változékonyságát is figyelembe tudják venni.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A mérési program a 120551 számú OTKA és a Tét_16-1-2016-0034 számú első horvát-magyar mikrometeorológiai kutatási együttműködés keretében zajlott. A meteorológiai méréseket a GINOP-2.3.2-15-2016-0005 és a GINOP-2.3.2-15-2016-00005 pályázati program is segítette. A publikáció az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-2 Új Nemzeti Kiválóság Program pályázatának támogatásával készült. Emellett a második és negyedik szerző esetében a tanulmány alapjául szolgáló kutatást az

Emberei Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program is támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.

IRODALOMJEGYZÉK

- Abdella, K., D'Alessio, S. J. D. (2005). On the parameterization of the roughness length for the air-sea interface in free convection. *Environmental Fluid Mechanics*, 4(4), 451–453. <https://doi.org/10.1007/s10652-005-1668-8>
- Charnock, H. (1955). Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 81, 639–640. <https://doi.org/10.1002/qj.49708135027>
- Donelan, M. A., Dobson, F. W., Smith, S. D. Anderson, R. J. (1993). On the Dependence of Sea Surface Roughness On Wave Development. *Journal of Physical Oceanography* 23, 2143–2149. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1993\)023<2143:OTDOSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1993)023<2143:OTDOSS>2.0.CO;2)
- Drennan, W. M., Graber, H. C., Hauser, D., Quentin, C. (2003). On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas. *Journal of Geophysical Research*, 108(C3), 8062. <https://doi.org/10.1029/2000JC000715>
- Dyer, A. J. (1974). A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorology* (Vol. 7). <https://doi.org/10.1007/BF00240838>
- Edson, B. J., Crawford, T., Crescenti J., Farrar T., Frew, N., Gerbi, G., Helmis, C., Hristov, T., Khelif, D., Jessup, A., Li, M., Mahrt, L., McGillis, W., Plueddemann, A., Shen, L., Skillingstad, E., Stanton, T., Sullivan, P., Sun, J., Trowbridge, J., Vickers, D., Zappa, C. (2007). The Coupled Boundary Layers and Air-Sea Transfer Experiment in Low Winds. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88(3)-341-356 <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-3-341>
- Edson, J. B., Jampana, V., Weller, R. A., Bigorre, S. P., Plueddemann, A. J., Fairall, C. W., Miller, S. D., Mahrt, L., Vickers, D., Hersbach, H. (2013). On the exchange of momentum over the open ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 43(8), 1589–1610. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0173.1>
- Fisher, A. W., Sanford, L. P., Suttles, S. E. (2015). Wind Stress Dynamics in Chesapeake Bay: Spatiotemporal Variability and Wave Dependence in a Fetch-Limited Environment. *Journal of Physical Oceanography*, 45(10), 2679–2696. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-15-0004.1>
- Foken, T., Gockede, M., Mauder, M., Mahrt, L., Amiro, B., Munger, W. (2004). *Handbook of Micrometeorology: A Guide for surface flux measurement and analysis: Chapter 9: Post-filed data quality control*. In Handbook of Micrometeorology. Kluwer Academic Publisher, 181–208. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2265-4>
- Garratt, J. R. (1977). Review of drag coefficients over oceans and continents. *Monthly Weather Review*, 105, 915-929. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)105<0915:RODCOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<0915:RODCOO>2.0.CO;2)
- Geernaert, G. L., Larsen, S. E., Hansen, F. (1987). Measurements of the Wind Stress, Heat Flux, and Turbulence Intensity during Storm Conditions over the North Sea. *Journal of Geophysical Research* 92(C12):13127. <https://doi.org/10.1029/JC092iC12p13127>
- Holthuisen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>
- Homoródi, K., Józsa, J., Krámer, T., Ciraolo, G., Nasello, C. (2012). Identifying wave and turbulence components in wind-driven shallow basins. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 56(1), 87-95. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2012-1.10>
- Johnson, H. K., Højstrup, J., Vested, H. J., Larsen, S. E. (1998). On the dependence of sea surface roughness on wind waves. *Journal of Physical Oceanography*, 28(9), 1702–1716. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<1702:OTDOSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<1702:OTDOSS>2.0.CO;2)
- Kiss M., Torma P. (2014). Az energiaáramok fluxus gradiens eljárás alapú becslése örvény-kovariancia mérésből. *Hidrológiai Közöny*, 94(4), 48-56.
- Lin, W., Sanford, L. P., Suttles, S. E., Valigura, R. (2002). Drag coefficients with fetch-limited wind waves. *Journal of Physical Oceanography*, 32(11), 3058–3074. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<3058:DCWFLW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<3058:DCWFLW>2.0.CO;2)
- Luettich, R.A., Harleman, D.R.F., Somlyódy, L. (1990). Dynamic Behavior of Suspended Sediment Concentration in a Shallow Lake Perturbed by Episodic Wind Events, *Limnology and Oceanography* 35(5), 1050-1100.
- Lükő G., Torma P., Krámer T., Weidinger T., Vecenaj Z., Grisogono B. (2019). Observation of wave-driven air-water turbulent momentum exchange in a large but fetch-limited shallow lake. *EMS Annual Meeting Abstracts*. EMS2019-552
- Maat, N., Kraan, C., Oost, W. A. (1991). The Roughness of Wind Waves. *Boundary-Layer Meteorology*, 54(1–2), 89–103. <https://doi.org/10.1007/BF00119414>
- Mauder, M., Foken, T. (2011). Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3. *Arbeitsergebnisse*, 3(46), 60, ISSN 1614-8916. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20349>
- McMillen, R. T. (1988). An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 43(3), 231–245. doi:10.1007/BF00128405
- Oost, W. A., Komen, G. J., Jacobs, C. M. J., Van Oort, C. (2002). New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE. *Boundary-Layer Meteorology*, 103(3), 409–438. <https://doi.org/10.1023/A:1014913624535>
- Smith, S. D., Anderson, R. J., Oost, W. A., Kraan, C., Maat, N., De Cosmo, J., Katsaros, K. B., Davidson, K. L., Bumke, K., Hasse, L., Chadwick, H. M. (1992). Wind Stress and Drag Coefficients. *Boundary-Layer Meteorology*, 60, 109–142. doi.org/10.1007/BF00122064
- Taylor, P. K., Yelland, M. J. (2001). The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves. *Journal of Physical Oceanography*, 31(2), 572–590. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0572:TDOSSR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0572:TDOSSR>2.0.CO;2)

Vickers, D., Mahrt, L. (1997). Fetch Limited Drag Coefficients. *Boundary-Layer Meteorology*, 85(1), 53–79. <https://doi.org/10.1023/A:1000472623187>

Webb, E. K., Pearman, G. I., Leuning, R. (1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(447), 85–100. <https://doi.org/10.1002/qj.49710644707>

Weidinger, T., Pinto, J., Horváth, L. (2000). Effects of uncertainties in universal functions, roughness length, and displacement height on the calculation of surface layer

fluxes. *Meteorologische Zeitschrift*, 9(3), 139–154. <https://doi.org/10.1127/metz/9/2000/139>

Wilczak, J. M., Oncley, S. P., Stage, S. A. (2001). Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 99(1), 127–150. <https://doi.org/10.1023/A:1018966204465>

Wu, J. (1980). Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions - A revisit. *Journal of Physical Oceanography*. 10, 727–740. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010<0727:WSCOSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<0727:WSCOSS>2.0.CO;2)

A SZERZŐK



LÜKŐ GABRIELLA infrastruktúra-építőmérnöki mesterszakos hallgató a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéken. e-mail: gabriella.luko@gmail.com

TORMA PÉTER egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, e-mail: torma.peter@emk.bme.hu

WEIDINGER TAMÁS egyetemi docens, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológia Tanszék. e-mail: weidi@caesar.elte.hu

KRÁMER TAMÁS egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, e-mail: kramer.tamas@emk.bme.hu

Nádassziget hullámzasmódosító hatása – numerikus vizsgálatok

Szilágyi Mariann*, Homoródi Krisztián*, Józsa János* és Krámer Tamás*

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

Kivonat

Tavi környezetben a szél-keltette folyamatokra jelentős hatással van a vízből kiemelkedő növényzet: befolyásolja a szelet, a hullámzást és az áramlást, és ezeken keresztül végül a mederviszonyokat is alakítja. Cikkünkben az áramlási hatások közül a felszíni hullámzás módosulására összpontosítunk, és egy Fertő tavi nádassziget esettanulmányával választjuk szét a sziget környezetében végbemenő hullámjelenségeket. Azt állapítottuk meg, hogy ezek közül legnagyobb jelentőséggel a diffrakció (és kisebb mértékben a refrakció) révén a nádassziget árnyékterébe oldalról behatoló energia bír, és meghatározó még az árnyéktér fölött fokozatosan megerősödő szél energiabevitel. A visszaverődés és a nádason áthaladó hullámok megmaradó energiája ugyanakkor nem jelentős. Jelen tanulmányunkban e hatásokat pontbeli terepi megfigyelésekkel vizsgáljuk, amelyeket kalibrált numerikus modellel választunk szét egymástól és terjesztünk ki más tóállapotokra.

Kulcsszavak

Nádassziget, hullámzásterjedés, numerikus modellezés, SWAN, refrakció, diffrakció

Wave modification by reed island – a numerical study

Abstract

In a shallow lake environment, wind-induced processes are significantly influenced by emergent vegetation, which affects wind, waves, currents, and consequently bed changes. From these hydrodynamic effects, in our paper we focus on the modification of surface wind waves, and we decompose wave phenomena in the vicinity of a circular reed island in a case study in Lake Neusiedl (NW Hungary). We found that from these, wave diffraction and, to a lesser degree, refraction have the highest significance because they convey wave energy laterally into the wake of the island, moreover the energy input of the gradually strengthening wind above this zone is also relevant. In contrary, reflection and the residual energy of waves passing through the island are not important. In this study, these processes are investigated by field measurements, then separated and extended to other lake conditions with numerical modelling.

Keywords

Reed island, wave propagation, numerical modelling, SWAN, refraction, diffraction

BEVEZETÉS

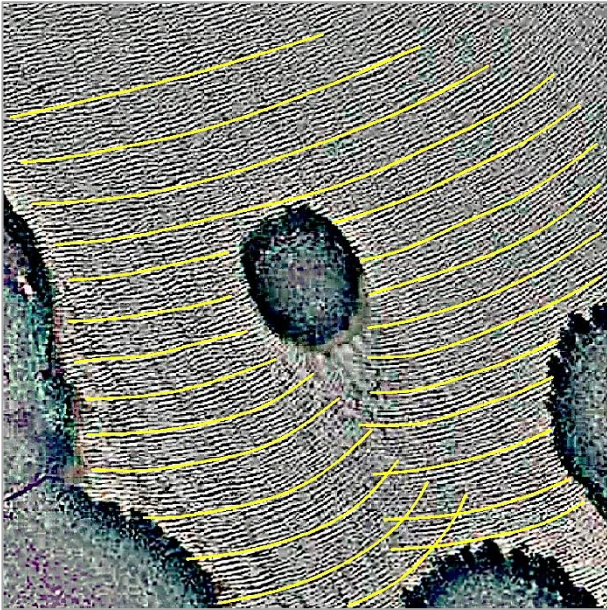
A szél keltette hullámzás fontos szerepet játszik a sekélytavi hidrodinamikai és ökológiai folyamatokban (Felföldi 1981). Befolyásolja a meder alakulását, a víz turbulenciáját, átlátszóságát és általában a környezeti jellemzőit, de a tó hasznosításának tervezésénél is figyelembe kell venni az adott területen kialakuló hullámzási viszonyokat. A sekély tavainkban – a Fertőben, a Velencei-tóban vagy a Kis-Balatonban – megjelenő növényzetborítás nem csak a parti sávban, hanem a tó teljes területén meghatározó. A vízből kiemelkedő makrofiták a légkör és a víz oldalán is porózus közeget alkotnak, így megváltoztatják a széljárást, továbbá közvetlen hatással vannak a hullámzásra és az áramlásra, ezáltal a hordalékmozgást is befolyásolják.

A vízi növényzet hullámzással szembeni viselkedése már régóta foglalkoztatja a kutatókat. Számtalan laboratóriumi, terepi, numerikus és analitikus vizsgálat irányult arra, hogy a növényzet és a hullámzás kölcsönhatását minél pontosabban leírják. Kobayashi és társai (1995) laboratóriumi mérések alapján különböző ellenállási tényezőjű növényzetfoltok hullámzási paraméterekre való hatását írták le analitikus úton. Laboratóriumi vizsgálat útján számszerűsíthető az is, hogy a különböző sűrűségű növényzet milyen mértékben csillapítja a becsapódó hullámfrontokat

(Anderson és Smith 2014), illetve egy-egy növény szár milyen egyedi, mikroszkopikus hatást fejt ki (Luhar és Nepf 2016). A természetben természetesen lezajló folyamatokhoz azonban elengedhetetlen a helyszíni megfigyelés. Lövestedt és Larson (2010) terepi mérések és matematikai modellezés alapján jellemezte a hullámzás nádas hatására fellépő csillapodását különböző távolságokban a nádas szélétől, különböző vízmélységek mellett.

Az említett kutatások a növényzetfoltok lokális hatásait vizsgálták, jelen tanulmányunkban a növényzet körül kialakuló nagyobb léptékű hullámzást vizsgáljuk, terepi mérések alapján kalibrált numerikus modellel. A terepi mérések egy rövidebb időszak adatait tudják átfogni, míg a numerikus modellezés lehetővé teszi olyan időszakok elemzését, melyek mérésére nincs lehetőség, esetleg olyan szélsőséges hatások számszerűsítését, melyek az adott területen ritkán fordulnak elő. A növényzetfoltok körüli hullámzás vizsgálata nagymértékben igényli a pontbeli mérések térbeli kiterjesztését, mivel egyidőben más-más jelenségek alakulnak ki a növényzetfolt környezetének különböző pontjain. Korábbi vizsgálataink során a drónfelvételek útján történő elemzések alkalmazhatóságát vizsgáltuk sekély tavi környezetben (Szilágyi és társai 2019), e munka során azonban a terület méretei miatt a térbeli elemzéseket a modell által adott eredmények biztosítják.

Egy nagyobb szélesemény hatására a növényzetfolt árnyékterében (azaz a szél alatti oldalán) a hullámfrontok egymásba kapaszkodó mintázatot alkotnak (1. ábra). Ennek oka a hullámelhajlás miatt oldalról ide érkező, a növényzetten átjutó, a visszavert és a helyben keletkezett hullámzás együttes megjelenése. Vizsgálatunk célja, hogy ezeket a hullámjelenségeket szétválasszuk egy mérésekkel kalibrált hullámzásmodell segítségével, és megállapítsuk az egymáshoz viszonyított szerepüket az energiabevitelben és sodródásban.



1. ábra. Kialakuló hullámfrontok ÉNy-i szél hatására a Fertőrákosi öböl egyik nádasszigete körül

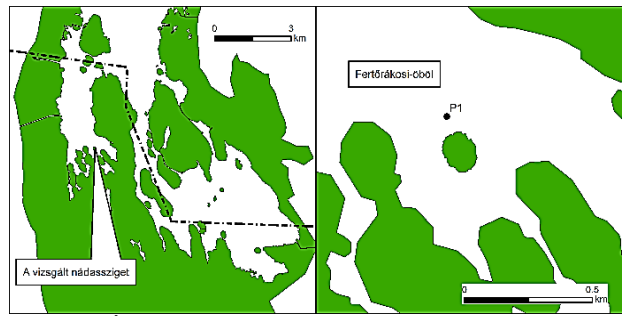
Figure 1. Wave fronts around a reed island in Fertőrákos Bay driven by NW wind

A VIZSGÁLATI HELYSZÍN

Tavi növényzetfoltok környezetük hullámzási viszonyaira gyakorolt hatásának terepi vizsgálatára a Fertő tó egy kör alakú nádasszigetét választottuk. Az osztrák-magyar határon fekvő Fertő tó sekélysege és kiterjedt növényzetborítása miatt megfelelő terepet biztosít ezekhez a kutatásokhoz. A tó magyarországi területe 75 km², ennek közel 85%-a növényzettel, többségében náddal (*Phragmites australis*) borított. A kifejlett nádas magassága a területen 3,4 m körül alakul. A tó és környékén az ÉÉNy-i és a DDK-i a két jellemző szélirány (Pannonhalmi és Sütheő 2007).

A vizsgálatunkat a tó magyarországi részén végeztük, a Fertőrákosi-öböl déli részén egy 100 m átmérőjű, kör alakú nádassziget környékén (2. ábra).

Olyan helyszín kiválasztása volt a cél, ahol közel kör alakú, nagyobb méretű nádassziget található. Emellett fontos szempont volt az is, hogy az ÉÉNy-i szelek esetén nagy meghajtási hosszok alakuljanak ki. A vízmélység a választott sziget körül változik. A legmélyebb részen közepes vízszint alatt 1,5 méter körül alakul, a sekélyebb részen azonban alig haladja meg az 1 métert. A tó vízszintje a Hansági-főcsatornán keresztül szabályozott, de vízszintingadozásban hidrodinamikai folyamatok, mint a vízlengés vagy a hullámzás is befolyással bírnak.



2. ábra. Átmeneti térkép a vizsgált területről, a mérési helyszínnel

Figure 2. Map of study site, with measurement location

TEREPI MÉRÉSEK ÉS FELDOLGOZÁSUK

Mivel tanulmányunk numerikus modellezésen alapul, a modellt ezt megelőzően terepi adatokkal kalibráltuk és igazoltuk. A kiválasztott nádassziget körül a statisztikai elemzések érdekében hosszabb ideig egy hónapon keresztül, pontbeli mérésekkel dokumentáltuk a légkör és a víz mozgásait. A szélméréseket a hullámzásmodell meghajtására használtuk fel, a hidrodinamikai mérésekből pedig a modelleredményekkel ütköztetett hullámzásjellemzőket számszerűsítettük.

A szelet a sziget uralkodó szél felőli oldalán, attól kb. 70 m-re ÉNy-ra, a P1 pontban (2. ábra) felállított eseti mérőállomáson mértük. A Campbell Scientific szónikus szélmérővel a vízfelszín fölött 4 m magasságban, 10 Hz mintavételi frekvenciával rögzítettük a szélesség térbeli vektorát (Campbell Scientific 2020).

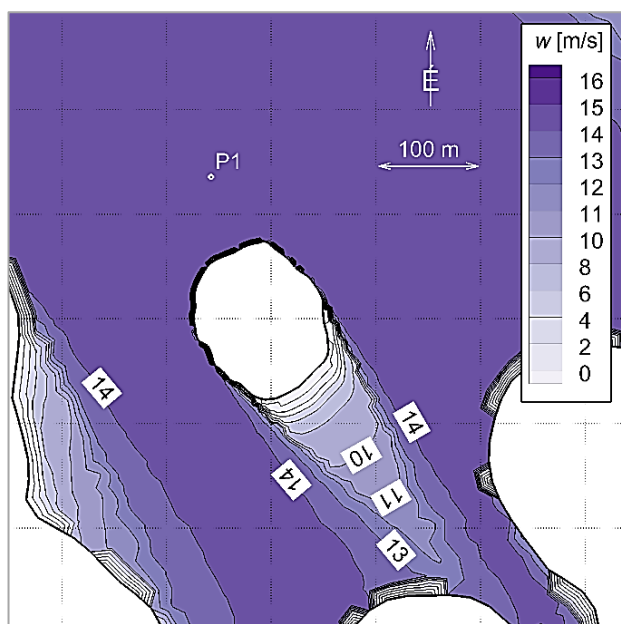
Ezzel egyidőben a hullámzás méréséhez a mederfenéken egy akusztikus Doppler-elven működő 3D sebességprofil-mérő eszközt (acoustic Doppler current profiler, ADCP) üzemeltettünk (Nortek 2020). A felfelé irányított ADCP műszer három ferde hangnyaláb mentén méri a hosszirányú sebességek eloszlását, és ezzel egyidőben a mérőfejnél (azaz a fenéken) a víznyomás ingadozását. A műszerünk 5 perces mérési időszakokban működött, melyben 2 percig 8 Hz időbeli és 5 cm-es függőleges felbontással mért, majd a maradék 3 percre készenléti állapotba helyezte magát. A műszer technikai kényszerek miatt a vízmélység alsó 35 cm-ét nem képes látni, így a függőleges sebességprofil e vakzóna fölött, nagyjából 20 db mérési cellával mintáztuk.

Szélmező meghatározása a pontbeli mérésből

A szél területi eloszlását, beleértve a nádas szélárnyékolását egy közelítő, analitikus módszerrel terjesztettük ki a 4 m magasan mért pontbeli szélességből. Az állomáshoz érkező légköri határreteg a tavat szegélyező nádas fölött még annak érdességéhez idomul, majd a nyíltvíz fölé kerülve fokozatosan átalakul az aerodinamikai szempontból sokkal simább vízfelszínhez igazodva. Az ún. belső érdességi határreteg (IBL) elméletével az 5-10 perces időskálán kiértékelte szélesség-adatok felhasználásával már elég szoros összefüggés található a nádas és a nyílt tó fölötti szél, a meghajtási hossz és a mérési magasság között (Józsa és társai 2007). Már ezzel a viszonylag egyszerű IBL-módszerrel is visszaadható, ahogy a vízfelszín felett abban az esetben is térben változó szélesség-mezőket kapunk, ha a környező terep felett egyenes szél fúj (3. ábra). A

hullámzó vízfelszín érdességi magasságát nem közvetlenül a hullámjellemezőkből származtattuk, hanem egyensúlyi felszíni határreteget feltételezve az ún. Charnock-képlettel számoltuk, *Lükő és társai (2021)* által balatoni mérések alapján javasolt konstans együttható értékének a Fertő tóra való átkalibrálásával ($\alpha = 0,02$).

A módszer segítségével a 4 m-en mért széladatokat a standard 10 m-es anemométer-magasságba transzformáltuk, vízszintesen pedig kiterjesztettük a Fertőrákosi-öböl teljes területére.



3. ábra. Az IBL modellel számított szélsébség-mező 11 m/s nagyságú, 323° irányú parti szél esetén

Figure 3. Distribution of IBL-based 11 m/s wind speed, direction is 323°

Hullámjellemezők számítása

A felszíni hullámzás modelleredményeit a mérésekből levezetett energiaspektrummal, hullámhosszával és periódusidővel hasonlítottuk össze. Az ADCP-vel gyűjtött víz alatti mérésekből ezeket a lineáris hullámmélet szerint származtattuk (*Holthuijsen 2007*). A felszíni hullámzás periodikus és lefelé gyengülő mozgásba hozza a vízteret, és így mind az ADCP hangnyalábjai mentén mért orbitális sebességekből, mind a fenék közelében mért víznyomás-ingadozásból visszakövetkeztethetünk az ezeket a mozgásokat okozó hullámzásra.

Figyelembe kell venni, hogy a felszínmozdulás különböző frekvenciájú összetevői eltérő mértékben csillapodnak a vízmélységgel. Ezért a mélységi változókat az energia frekvenciaspektrumán keresztül számítjuk át a vízfelszínre, majd a felszínmozdulás így meghatározott spektrumából vezetjük le a hullámhosszával és a periódusidőt.

Két módszert is alkalmaztunk.

- (a) Egyváltozós módszerrel a felszíni elmozdulás energiaspektrumát a víznyomásból számoltuk ki, a zajszint alatti hullámösszetevők energiataralmát a frekvencia -5 -ik hatványával arányos függvényvel

közelítve (*Homoródi és társai 2012a*). Az eredmény az f frekvencia függvényében fejezi ki az energiasűrűség $E(f)$ megoszlását.

- (b) Kétféle változós módszerrel pedig az ADCP által mért sebességekből állítottuk vissza a felszíni hullámzás energiasűrűségének $E_{\theta}(f, \theta)$ irányspektrumát, azaz a frekvencia és a θ terjedési irány szerinti megoszlását. Ez tulajdonképpen egy függvényillesztési feladat, amelyre számos módszert javasoltak a szakirodalomban. Cikkünkben az irányspektrumot az ún. kiterjesztett maximális entrópia módszerrel (*extended maximum entropy principle, EMEP*) becsültük meg, amelynek előnye, hogy sok más módszerrel szemben kevésbé érzékeny a mérések zajára (*Hashimoto és társai 1994*).

Bárhogyan is határozzuk meg az energiaspektrumot, abból aztán általánosan levezethető a hullámhossz (H_{m0}) és a periódusidő (T_{m01}). A sűrűségfüggvény nulladik momentuma például egyes ill. kétféle integrállal számítható:

$$m_0 = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} E_{\theta}(f, \theta) d\theta df = \int_0^{\infty} E(f) df \quad (1)$$

és ebből a szignifikáns hullámhossz definíciószerűen következnek: $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$. A két módszer közel azonos eredményekre vezetett, így a cikkünkben a hullámjellemezőket általában az egyszerűbb egyváltozós (a) módszerrel határoztuk meg, a (b) módszert kizárólag az irányspektrumok elemzéséhez alkalmaztuk.

A SWAN MODELL

A bemutatott terepi mérések a hullámzási viszonyok pontbeli leírására alkalmasak. Ennek térbeli változékonyságát, a szigetnek a hullámzási viszonyokra gyakorolt hatását a Simulating Waves Nearshore (SWAN) numerikus hullámzásmoddellel vizsgáltuk. A SWAN modell (41.31-es verzió, *Booij és társai 1999, Ris és társai 1999*) egy harmadik generációs, spektrális alapú hullámzásmoddellel, melyet elsősorban tengerek partközeli sekélyebb részein kialakuló hullámzás szimulációjára fejlesztettek ki. Emellett mély tavakban, mint az Erie-tó (*Moeini és Etemad-Shahidi 2009*), sekély tavakban, mint az Okeechobee-tó (*Jin és Ji 2001*) és sekély öblökben, mint a Chesapeake-öböl (*Lin és társai 2002*) vagy a Kündema-öböl (*Alari és társai 2008*) is sikerrel alkalmazták. A hazai nagy sekély tavaink közül *Török (2010)* a balatoni, míg *Homoródi és társai (2012b)* a Fertő tó északi osztrák részének mélység- és meghajtásihossz-viszonyai közötti alkalmazhatóságát mutatták meg. Mindez annak köszönhető, hogy szemben számos korábban kidolgozott harmadik generációs hullámzásmoddellel, mint amilyen a WAM is (*WAMDI group 1988*), a SWAN modell olyan, a sekélyvízi viszonyok között fontos, akár meghatározó folyamatokat is leír, mint a mederfenékkal való súrlódásból származó veszteség vagy a mélységváltozás miatt kialakuló hullám-törés (*SWAN team 2010*).

Mivel a szabálytalan szélmező szabálytalan hullámzásmezőt hoz létre, ezért a determinisztikus megközelítés helyett a hullámzást a variancia vagy az energiasűrűség-spektrummal írhatjuk le. Pontosabban, mivel áramlások je-

lenlétében az energiasűrűség nem egy megmaradó mennyiség, ezért a SWAN modell az energiasűrűség helyett a hatássűrűséget veszi figyelembe, melyet az energiasűrűséget a relatív (azaz az áramlással együtt mozgó koordináta-rendszerben értelmezett) frekvenciával elosztva kapunk. A hullámspektrum (x, y) helyen, a t időben való fejlődését a hatasegyenlettel írhatjuk le, ami derékszögű koordináta-rendszerben az alábbi formát ölti

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_f N}{\partial f} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{f}, \quad (2)$$

ahol $N = N(f, \theta)$ az f relatív frekvenciájú, θ terjedési irányú elemi hullám hatássűrűsége, c_x és c_y a hullámterjedési sebesség x és y irányban, c_f és c_θ a különböző frekvenciájú és terjedési irányú hullámösszetevők közötti energiadiffúzió sebessége. A bemutatott differenciálegyenlet nem más, mint egy energia-megmaradást leíró egyenlet. Az egyenlet bal oldalán szereplő tagok rendre a hullámenergia időbeni, térbeli, frekvenciák és irányok menti változását írják le. A relatív frekvencia változó mélység vagy az áramlási viszonyok miatti eltolódását, a mélységváltozás vagy áramlások miatt kialakuló refrakciót, a hatássűrűség irányok közötti szétterjedését a negyedik és ötödik tag írja le. A jobb oldalon álló $S = S(f, \theta)$ forrástagnak pedig a hullámzással közölt és az abból távozó energiák jelennek meg. Tartalmazza a hullámzás szél általi gerjesztését, a hullámok tarajosodásából, a mederrel való súrlódásából és a hullámtöréséből származó energiavesztéseket, illetve a hatássűrűség a különböző hullámösszetevők közötti kölcsönhatásokból származó átadódását.

A SWAN modell a (2) hatasegyenletet a véges differenciák módszerével oldja meg szabálytalan, a tó alakjához, a mélységviszonyokhoz és a szél térbeli egyenlőtlenségéhez jól igazítható háromszöghálón. A hullámspektrumot is diszkrétizálva írja le a modell. A diszkrétizálás konstans $\Delta\theta$ irányfelbontást és konstans $\Delta f/f$ relatív frekvenciafelbontást jelent. Az utóbbi a figyelembe vett diszkrét frekvenciák logaritmikus eloszlását adja. A numerikus megoldás részletei megtalálhatóak a SWAN kézikönyvben (SWAN team 2010).

A modell számára kezdeti- és peremfeltételeket is definiálni kell az alapegyenlet megoldásához. A számítási háló határa lehet szárazföld és víz egyaránt. A szárazföld nem generál hullámzást és a SWAN modellben elnyeli a beérkező hullámenergiát. A visszaverő felületeket a modelltartományon belül külön tudjuk definiálni. Nyitott perem esetén előírhatjuk a beérkező hullámzást (pl. közvetlenül annak irány spektrumával), illetve a peremhez érkező hullámzás szabadon elhagyhatja a modellt. A frekvenciatérben a legnagyobb és a legkisebb diszkrét frekvenciánál lévő perem is teljesen elnyelő tulajdonságú. Ha a teljes 360° -os iránytartományt lefedjük és nem csak annak egy szektorát, egy irányban sincs szükség peremfeltételre.

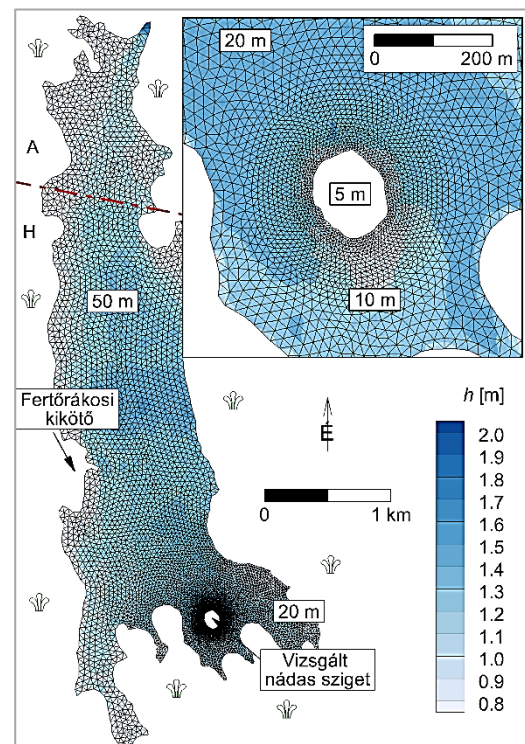
Ezúttal permanens végállapot elérése volt a célunk, ehhez permanens üzemmódban használtuk a SWAN megoldóját.

A MODELL FELÉPÍTÉSE

A vizsgálataink során a forrástagn összes bemutatott elemét aktiváltuk, bár nem mindegyiknek volt érdemi hatása a hullámzásra a mérések helyén. A hullámzás-áramlás köl-

csonhatást nem vettük figyelembe, mivel a kialakuló, várhatóan kis sebességek hatása a hullámzásra elhanyagolható. A nádasok határán nem alakítottunk ki visszaverő peremeket, mivel az előzetes tesztek, ahol Gent (1994) hasonló körülmények közötti mérései alapján a nádas visszaverődési tényezőjét 0,2-0,4 között vettük fel, azt mutatták, hogy a hatásuk lokális és csekély mértékű.

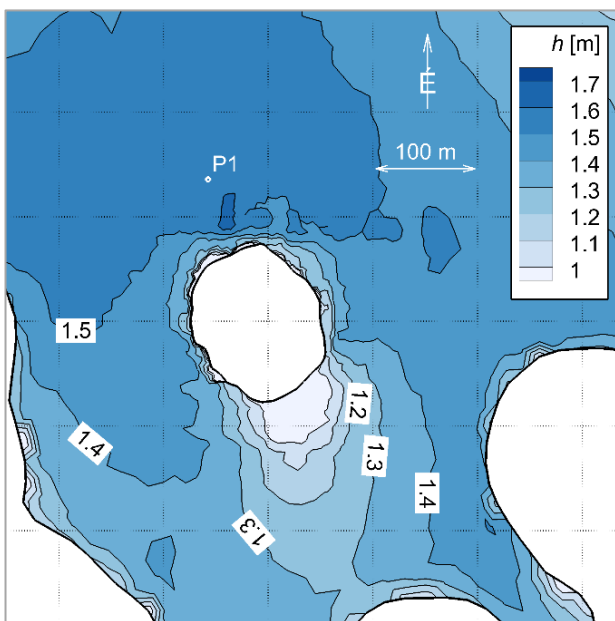
A számítási hálót (4. ábra) úgy alakítottuk ki, hogy a vizsgált sziget környezetében kellően részletes képet kapjunk a hullámzás térbeli változékonyságáról. A háló kiterjedésénél figyelembe vettük, hogy az É-i, nagyobb tórészrel a kapcsolat csak viszonylag keskeny szűkületeken keresztül valósul meg, az öböl É-i végében. Ez a vizsgált szigettől távol található, ezért az É-i nagy tórészen kialakuló hullámok érdemben nem befolyásolják a sziget környezetének viszonyait. Elegendő volt tehát a Fertőrákosi-öbölre kiterjedő modell felépítése. A kezdeti tesztekben azt is megállapítottuk, hogy a nádas jellemzőiben (szálmámérő, sűrűség) lévő bizonytalanságtól függetlenül elegendő a szigetet szárazföldként beépíteni a modellbe. A csekély víz- és a jelentős nádborítottság miatt a nádasba kifutó hullámzás a sziget belső részében elhal és a sziget túlsó oldaláig nem jut el érdemi hullámzás. A szigetet ezért kizártuk a modellezett tartományból. A számítási háló felbontásának kialakítása során figyelembe vettük az alapegyenletben lévő nemlinearitást, a szélmező térbeli változékonyságát és a tó morfológiájának összetettségét. A sziget közvetlen környezetét a szigettől távolodva 5 m-ről 10 m-re fokozatosan növekvő oldalhosszúságú elemekkel fedtük le. Az elemméret a part menti nádasok felé tovább nő egészen 20 m-ig. Az öböl távolabbi részein 50 m-es elemméretet alkalmaztunk. A felsorolt értékeket érzékenységvizsgálattal ellenőriztük.



4. ábra. A Fertőrákosi-öbölre felépített modell számítási hálója a 115,5 m o.A.f. vízszinthez tartozó mélységek szerint színezve
Figure 4. Computational mesh of the model built for the Fertőrákosi Bay coloured by the depth under 115,5 m asl water level

Ugyanígy vizsgáltuk a frekvenciatérben és az irányok szerinti diszkrétizálást, illetve a számítás időlépésének nagyságát is. Ez alapján a számítási háló minden egyes csomópontjában az iránspektrumot 36 iránnyal és 0,1 Hz és 6 Hz között összesen 44 diszkrét frekvenciával írtuk le. A számítás időlépése 5 perc volt.

A kétdimenziós (2D) hullázmódosító modell felépítéséhez a mederadatokat a tó a GENESEE projekt keretében felépített, 5 m-es raszterfelbontású domborzati modellje szolgáltatotta (5. ábra). A nyílt tavat ehhez ultrahangos eljárással mérték fel. A domborzati modellt az ÉDUVIZIG bocsátotta rendelkezésünkre. Az öböl vízszintjét a Fertőrákosi vízmérce alapján határoztuk meg a modell kalibrációjához és igazolásához használt mérési időszakokra. Ugyancsak a mércén mért vízállások alapján vezettünk le három jellemző vízszintet, ami mellett a nádassziget körül kialakuló hullámzást vizsgáltuk. Ehhez az 1965-2019. közötti időszakokra rendelkezésünkre álló napi vízállás-értékek normál eloszlásának 10, 50 és 90%-os percentiliseit vettük. Az összes szintadatokat az osztrák Adria feletti alapszintre vonatkoztatjuk. Az így levezetett három jellemző vízszint: a kisvízi 115,3 m o.A.f.¹, a középvízi 115,5 m o.A.f. és a nagyvízi 115,7 m o.A.f.



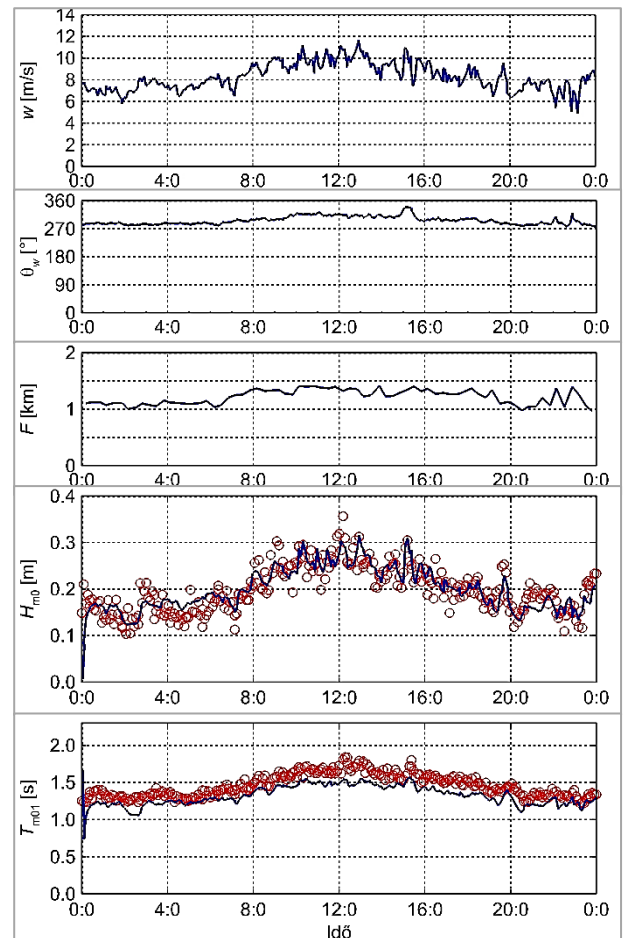
5. ábra. Vízmélységek a nádassziget környezetében 115,5 m o.A.f. vízszint mellett

Figure 5. Water depth distribution around the reed-island at water elevation 115,5 m a.s.l

KALIBRÁCIÓ ÉS IGAZOLÁS

A modellünk kalibrálására a 2019. június 29-i, igazolására a 2019. július 29-i méréseket használtuk fel. Az egy hónapos terepi mérési időszakból lényegében ez a két nap volt kellően szeles és a sziget környezetében a meghajtási hosszak kellően nagyok ahhoz, hogy a kalibrációhoz és igazoláshoz jó minőségű szél- és hullámzásadatok álljanak a rendelkezésünkre.

A kalibrációnál azért esett a választás a június 29-i adatokra (6. ábra), mivel ezen a napon erős, viszonylag egyenletes, Ny-ÉNy és ÉNy közötti szél fúj, ami jelentős hullámzást tudott létrehozni a vizsgált sziget környezetében. A meghajtási hossz 1-2 km között változott.



6. ábra. Fentről lefelé: Mért széladatok (szélesség, szélirány), meghajtási hosszak, mért (piros körök) és számított (kék folytonos vonal) H_{m0} és T_{m01} idősorok június 29-i részlete
Figure 6. From top to bottom: Measured wind data (speed and direction), fetch, measured (red circles) and detail of estimated H_{m0} and T_{m01} time series (blue solid line) for 29th June

Július 29-én a szélesség, a szélirány és ennek következtében a meghajtási hossz is szélesebb skálán mozgott, mint június 29-én, így a kalibrált modellünk szélesebb szélesség és meghajtási tartományban való ellenőrzésére volt alkalmas. Bár ez a nap kevésbé volt szeles, mint az egy hónappal korábbi, a szélesség legnagyobb értéke így is elérte a 10 m/s-ot és a szélesebb 8 és 18 óra közötti időszakban a szélesség 5-9 m/s között mozgott, ami szintén erősebb szélnek tekinthető. E mellett a rövidebb ideig jelentkező nagyobb, 3-4 km-t is elérő meghajtási hosszak miatt is számottevő hullámzás jött létre a mérés helyén.

A modell megfelelőségét a mért és számított hullámparaméterek, illetve spektrumok összehasonlításával értékeltük.

¹ A Fertő-tó egységes kezelése érdekében a jogi partvonalon belül a nyílvántartási magassági értékek az osztrák nyílvántartási alapszintre (m o.A.f.)

vonatkoznak, jogi partvonalon kívül a Balti (mBf.) alapszint használata kötelező. A Balti alapszint az osztrák alapszintnél 0,585 m-rel alacsonyabban van (kiszámítás: mBf = m o.A.f. - 0,585 m).

A kalibrációt megelőző érzékenységvizsgálatok rámutattak arra, hogy a modellünket a leghatékonyabban a tarajosodásból származó veszteség képletében szereplő konstansokkal tudjuk kalibrálni a Fertőrákosi-öböl viszonyaira. A tarajosodásból származó veszteség képletében megjelenő konstansokra a $C_{ds} = 3,64 \cdot 10^{-5}$ és $\delta = 1$ értéket vettük fel (SWAN team 2010). A mederrel való súrlódásból származó veszteségek számításakor a modell a meder érdességét a Nikuradse-féle érdességmagasságon keresztül veszi figyelembe. Krámer és Józsa (2005) terepi mérésekkel kalibrálták a Fertő tóra felállított 2D áramlástani modelljüket, amiben a meder Manning-féle érdességi együtthatójára $n = 0,028 \text{ s/m}^{1/3}$ -ot kaptak. Ezt átszámítva, a Fertőrákosi-öbölben jellemzően előforduló 0,5-2,0 m vízmélység tartományban az érdességmagasságra $k_N = 10 \pm 2 \text{ cm}$ adódik. Mivel a mérési időszakban kialakuló hullámszám viszonyok nem voltak érzékenyek a meder érdességére, ezért a vizsgálataink során egységesen $k_N = 10 \text{ cm}$ -es értéket alkalmaztunk. Ez az érték jóval nagyobb, mint a medret alkotó üledékszémcsék átmérője, ugyanis a hidraulikai ellenállást esetünkben nem a felületi súrlódás, hanem a hullámszám és áramlás alakította mederformák alakú ellenállása uralja, így az érdességmagasság a mederanyag d_{50} -es szemcseátmérőjének akár ezerszerese is lehet (Pascolo és társai 2018).

Kalibráció a június 29-i adatokkal

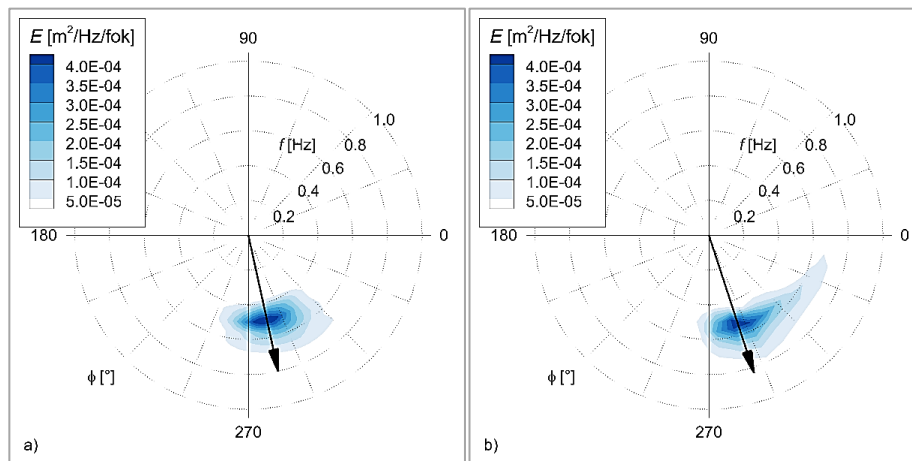
Ha a kalibrációs időszakot tekintjük, látszik, hogy a modell jól reprodukálta a mért H_{m0} értéket (6. ábra). A számított idősor jól követi a mérések időbeni változását. Az

átlagos hiba 1 mm-nél kisebb, az átlagos négyzetes hiba pedig 2,7 cm, ami elég kicsi. A NSE 0,18, R^2 értéke 0,71, ami azt jelzi, hogy a számított H_{m0} értékek jól illeszkednek a mértekre.

A T_{m01} értékek esetén a modell láthatóan kis mértékben végig alulbecsli a mért adatokat. Ez látszik az idősorok alapján (6. ábra), illetve abból, hogy az átlagos hiba -0,14 s. Az átlagos négyzetes hiba 0,15 s. Ez is azt mutatja, hogy az eltérés a mért és a számított T_{m01} értékek között viszonylag állandó, bár a H_{m0} értékek növekedésével kis mértékben nő. A NSE értéke 0,00, R^2 pedig 0,42. Ez alapján a mért és a számított T_{m01} értékekkevésbé egyeznek meg, mint a H_{m0} értékek tették.

Két reprezentatív időpontra mutatunk be spektrumokat a 7. és 8. ábrákon. Az egyik időpont, 12:00 órai, mivel a hozzá tartozó spektrum (8a. ábra) a legintenzívebb hullámszámot és az időszak második felét reprezentálja, amikor jó egyezést mutat a mért és a számított H_{m0} . A másik 5:00-i időpont mivel a hozzá tartozó spektrum (8b. ábra) a kisebb H_{m0} értékekre mutat példát az időszak elején. Ekkor kis mértékben alulbecsli a modellt a mért H_{m0} -t értéket.

Június 29-én rendelkezésre állnak mért 2D irányispektrumok is, azonban azok kiértékelhető minőségük csak a legintenzívebb hullámszám alatt voltak. Ezeket közül a 12:00-hoz tartozó mért és számított 2D irányispektrumokat láthatjuk a 7a-b. ábrán. Az előbbi a 11:30-12:30 között mért 2D spektrumok Welch-féle periodogram-módszerrel számított átlaga.

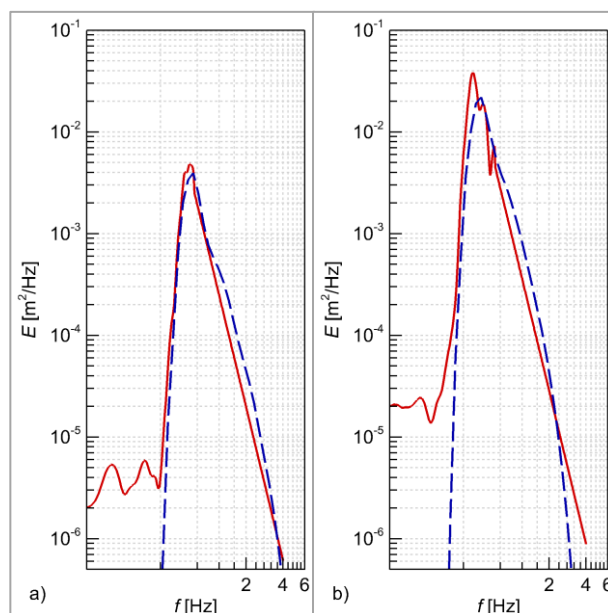


7. ábra. Június 29-én 11:30-12:30 között mért Welch-féle periodogram (a) és a 12:00-kor modellezett 2D energiasűrűség spektrum (b). A nyílak a hullámterjedés irányába mutatnak

Figure 7. Measured periodogram estimated with Welch's method from 11:30 to 12:30 (a) and modelled (b) directional spectra at 12:00 p.m. on 29th June. The black arrow represents the wave propagation direction

Akár a 2D (7. ábra), akár az 1D spektrumot (8a-b. ábra) tekintjük, látható, hogy a modell viszonylag jól reprodukálja a mért spektrum alakját, bár a számított 2D spektrum valamivel aszimmetrikusabb, mint a mért. Az 1D spektrumokat nézve, számottevő különbség a csúcsfrekvencia feletti lecsengő ágon látszik mindkét kiválasztott

időpontban, ahol a számított spektrum magasabb energiataralommal rendelkezik, mint a mért. E mellett a 12 órakor mért csúcs energiasűrűsége is magasabb és a csúcsfrekvencia is kisebb, mint a számított esetén. Ezek együttesen eredményezhetik, hogy a T_{m01} értékeket végig alulbecsli a modell.



8. ábra. Június 29-én 5:00-kor (a) és 12:00-kor (b) mért (piros folytonos vonal) és számított (kék szaggatott vonal) 1D energiasűrűség-spektrum

Figure 8. Measured (red solid line) and modelled (blue dashed line) energy density spectra at 5:00 a.m. (a) and 12:00 p.m. (b) on 29th June

Igazolás a július 29-i adatokkal

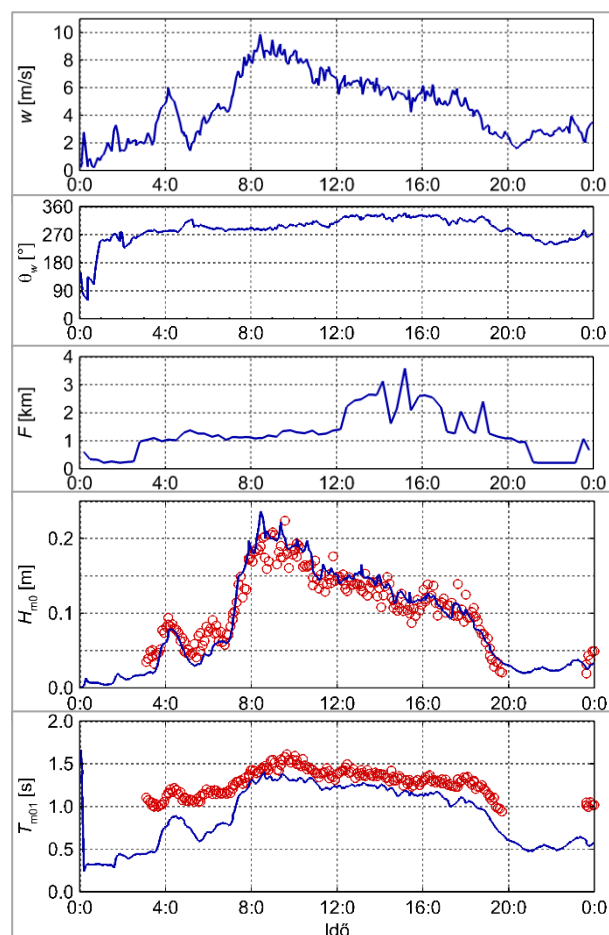
A kalibrációhoz hasonlóan ebben az esetben is megállapíthatjuk, hogy a mért H_{m0} értékeket jól reprodukálta a modell (9. ábra). A számított H_{m0} idősor jól követi a mértet. Az átlagos hiba csupán 2 mm, azaz a modell most sem torzít egyik irányba sem. Az átlagos négyzetes hiba 1,8 cm, ami valamivel kisebb, mint a júniusi időszakban volt. Ugyancsak a mérésekkel való nagyon jó, a kalibrációnál látottnál is jobb, egyezésre mutatnak rá az $NSE = 0,83$ és az $R^2 = 0,70$ értékek is.

A T_{m01} értékek esetén kevésbé jó egyezést kaptunk. Az időszak nagyobb részében a számított T_{m01} idősor követi ugyan a mértet, de a kalibrációhoz hasonlóan itt is egy szinte konstans értékkel alulbecsüli azt. Emellett 3:00-7:00 óra között jelentősen kisebbek a számított T_{m01} értékek, mint a mérték. Összességében így az átlagos hiba -0,24 s-re, az átlagos négyzetes hiba 0,27 s-re adódott. Mindkét érték abszolút értelemben nagyobb, mint az egy hónappal korábbi időszakra számítottak, de még elfogadhatóak. A mért értékekkel való rosszabb egyezést mutatja, hogy az NSE értéke -1,03, míg R^2 -é csak 0,37. Itt is megfigyelhető tehát, ami a június 29-i adatoknál is látszott: a modellel számított T_{m01} értékek kevésbé jól korrelálnak a mértékkel, mint a H_{m0} értékek-

Az eredmények jobb megértése érdekében bemutatunk két 1D spektrumot. A 9:00 órai spektrum (10a. ábra) az intenzívebb hullámzású 8-19 óra közötti időszakot reprezentálja, míg a 4:15 órai (10b. ábra) a kezdeti kisebb hullámzást.

Bár a spektrumok alakját most is elég jól leírja a modell, azonban ebben az esetben jobban látszik, hogy a számított spektrumok a mértékhez képest a magasabb frekvenciák felé tolódtak el. Ez okozza a mért T_{m01} értékek alulbecsülését. E mellett az energiasűrűség legnagyobb értéke is nagyobb mind a két bemutatott esetben, vagyis e

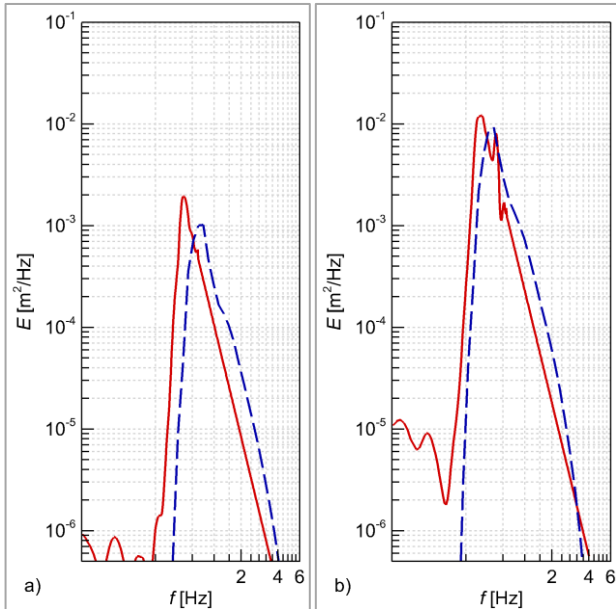
két időpontban a H_{m0} értékét is alábecsüli a modell, azonban ez nem igaz általánosan a teljes időszakra.



9. ábra. Július 29-i mért és számított idősorok (Megjegyzés: Leírás a 4. ábra szerint.)

Figure 9. Observed and modelled data for 29th July (Note: For the description see Figure 4.)

Összességében megállapíthatjuk, hogy a modellünk a sziget környezetében kialakuló hullámzás szempontjából mértékadó szélirányokra és meghajtási hosszakra jól reprodukálja a H_{m0} és jellemzően csak kis mértékben becsüli alul a T_{m01} értékeket, így alkalmas a nádassziget körül kialakuló hullámzás dinamikájának feltárására.



10. ábra. Július 29-én 4:15-kor (a) és 9:00-kor (b) mért (piros folytonos vonal) és számított (kék szaggatott vonal) 1D energiasűrűség-spektrum

Figure 10. Measured (red solid line) and modelled (blue dashed line) energy density spectra at 4:15 a.m. (a) and 9:00 a.m. (b) on 29th July

HULLÁMJELENSÉGEK SZÉTVÁLASZTÁSA A SZIGET KÖRÜL

A kalibrált modell lehetővé tette a sziget körül kialakuló hullámzás részletes vizsgálatát nemcsak a mérések idejére, hanem általunk meghatározott további permanens víz- és széljárású állapotokra. A szél- és a vízszintadatok statisztikai elemzése alapján megállapítottunk egy referenciaváltozatot, amely 323°-os (közel ÉNy-i), 11 m/s-os szelet, valamint 115,50 m o.A.f. vízszintet ír elő. A további modellezési változatokat az 1. táblázat mutatja. Minden változatra két alváltozatot is kiértékelünk: a tényleges mederdomborzattal és egy vízszintes mederrel. Ennek szintje a 113,90 m o.A.f., amelyet a nádás környezetének legmélyebb mederszintjére állítottunk be. A meder vízszintessé tételével a célunk a hullámrefrakció kioltása volt.

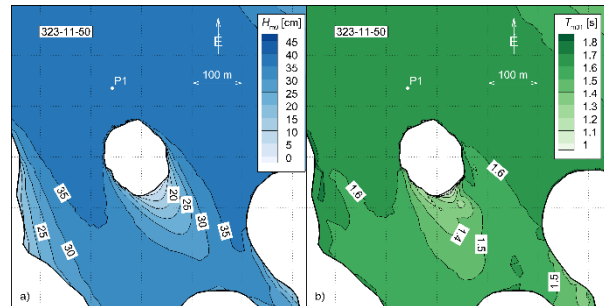
1. táblázat. A modellváltozatok összefoglaló táblázata
Table 1. Specification of model scenarios

Változat	Szélirány [°]	Szélesség 10 m-en [m/s]	Kilendült vízszint [m o.A.f]
323-11-50	323	11	115,50
323-11-30	323	11	115,30
323-11-70	323	11	115,70
323-07-50	323	7	115,50
178-11-50	178	11	115,50

Megjegyezzük, hogy a hullámzásmodellben a szél által kilendített vízszintet írtuk elő, és ezt a kilendült vízszintet a Fertőrákosi öbölben vízszintesnek tekintjük. A teljes tóra kiterjedő áramlástanai modellezéssel kimutattuk, hogy tartós ÉNy-i 11 m/s-os erősségű szél egy 115,50 m o.A.f szintű nyugalmi vízfelszín a nádasszigetnél +0,25 méterrel lendítene ki, a Fertőrákosi-öböl ellentétes végei között pedig 0,15 méteres vízszintkülönbséget okozna. A nádassziget alább ábrázolt környezetében a vízszintkülönbségek azonban alig 1-2 centiméteresek.

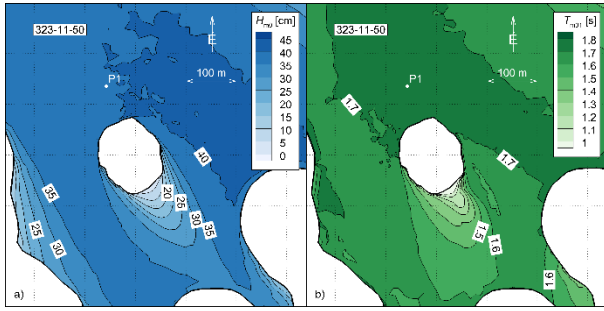
ÉNy-i szél vizsgálata

Először a 323-11-50 jelű referenciaváltozat eredményeit mutatjuk be a 11. ábrán, a tényleges meder esetében. Látható, hogy a belső légköri határreteg algebrai leírásával képesek vagyunk jellegében visszaadni a nádás szélárnyékolását, a hossz menti profil összhangban van Kiss és Józsa (2015) nádasszegély mögött végzett mikro-meteorológiai méréseivel. A 5. ábra a vízmélységgel szemlélteti a sziget körül felmért mederdomborzatot. 115,50 m o.A.f. vízszint esetén az ÉNy-i oldalon 1,6 m-es, a DK-i oldalon a mederhátaság fölött pedig alig 0,9 m, ami jelentős relatív mélységkülönbség. Az uralkodó ÉNy-i szélirány esetén tehát a szél alatti oldalon mindkét változó egyenlőtlensége egyaránt a hullámzás mérséklése irányába hat: a szélmeghajtás gyengül és a sekélyebb víz jobban korlátozza a hullámok növekedését. A 11. ábrán igazolást nyer a várakozásunk: a hullámhossza és a periódusidő a sziget mögött lecsökken a modelledmények szerint.



11. ábra. 323-11-50 (valós meder) modellváltozat eredményeinek mezője, a) hullámhossza és b) periódusidő
Figure 11. Results of model scenario 323-11-50 (original bed), distribution of wave height (a) and wave period (b)

Mivel a szél és a medergeometria hatása valós meder esetében nem választható szét, ezért ugyanerre a változatra bemutatjuk a vízszintes mederrel kapott hullámjellemzőket is (12. ábra). A szélmező változatlan, ugyanis a hullámmezőt annak számításában nem vesszük figyelembe. 115,50 m o.A.f. vízszint alatt egységesen 160 centiméteres vízmélységek alakulnak ki, ennek hatása azonban a sziget mögött csak távolabb figyelhető meg. A hullámhossza és a periódusidő területi egyenlőtlenségének tehát esetünkben döntően nem a mederdomborzat az oka, hanem a nádasbeli csillapodás és a szélárnyékolás. Ez nem meglepő, ugyanis a hullámhossza a szél felőli oldalon 3,8 m, a szél alatti oldalon 2,1 m körüli, ami a vízmélység közel kétszerese, azaz ilyen szél mellett mélyvízi viszonyok uralkodnak. A sziget szélnek kitett oldalán, illetve a szigettől távolabb azonban mind a H_{m0} , mind a T_{m01} értékek nagyobbak mutatkoznak a mélyebb mederben.



12. ábra. 323-11-50 (vízszintes meder) modellváltozat eredményei: hullámmagasság- és periódusidő-mező
 Figure 12. Results of model version 323-11-50 (horizontal bed): distribution of wave height and wave period

A nádassziget árnyékterébe beáramló lebegtetett üledék részleges kiüledése, és ezáltal a nádas medermorfológiai hatása függ attól, hogy ott milyen mértékű az üledéket lebegésben tartó turbulencia csillapodása. Időben a nagy üledéktöménység általában élénk hullámzással esik egybe, ezért még a mélyvízi hullámok is hozzájárulnak a turbulencia erősségéhez a felső vízrétegekben (Torma és Krámer 2017). A következőkben azt vizsgáljuk, hogy a hullámzás energiája hogyan hatol be oldalról a nádas árnyékterébe, és ehhez a hullámterjedés irányának területi eloszlását fogjuk elemezni a különböző forgatókönyvi változatokra.

Egyszerre két jelenség, a mélységkülönbségek okozta refrakció és az akadályok mögötti diffrakció is elhajlítja a hullámenergia terjedési irányát:

- A nádassziget körüli mederesés (5. ábra) egyenlőtlené teszi a vízmélységet és ezáltal a közeg hullámvezető képességét, ennek megfelelően egy időintervallum alatt a hullámgerinc nagyobb utat tesz meg mély vízben, így végül a hullámterjedés iránya a sekélyebb rész felé fordul el. Ez a refrakció jelensége.
- Maga a sziget jelenléte is megváltoztatja a hullámterjedési irányokat a szélvédett oldalon. A sziget mellett elhaladó hullámok a diffrakció következtében elhajlanak, behatolnak az árnyéktérbe és ott körkörös alakú hullámgerinc-mintázatot hoznak létre. (A diffrakció különösen kikötők szűk bejárata mögött látványos.) A sziget két oldaláról bekanyarodó hullámgerincek hol összeadódnak, hol pedig kioltják egymást (Holthuijsen 2007).

A valós meder esetén a refrakció és a diffrakció együttesen jelenik meg. Célunk e két jelenség hatásának a szétválasztása, és ezzel betekintést nyerni a nádas mögötti mederfeltöltődés visszacsatoló szerepébe. Mivel a refrakció csupán egyenlőtlen meder esetén lép fel, ezért ennek elkülöní-

tésére a vízszintes mederrel számított alváltozatokat alkalmaztuk. A hullámterjedési irányok megváltozásait a szélirányhoz viszonyítottuk, mivel egyenletes, akadálymentes közegben a hullámterjedési irány és a szélirány egybevág. A teljes irányeltérést, azaz a sziget okozta refrakció (R) és diffrakció (D), valamint az öböl szigettől távolabbi részein bekövetkező refrakció (r) és diffrakció (d) együttes hatásából fakadó irányeltérést a modellháló egyes pontjaiban az alábbi különbséggel számítottuk (majd minden különbségnél figyelembe vettük a 360 fokok ciklikusságát):

$$\phi_{D+R+d+r} = \theta_{sz} - \theta, \tag{3}$$

ahol θ_{sz} a szélirány (változatónként konstans), θ pedig a valós mederrel számolt hullámterjedési irány az egyes pontokban. Vízszintessé tett mederrel kapott modelleredményekből a refrakció hatása kiküszöbölhető:

$$\phi_{D+d+r} = \theta_{sz} - \theta_1, \tag{4}$$

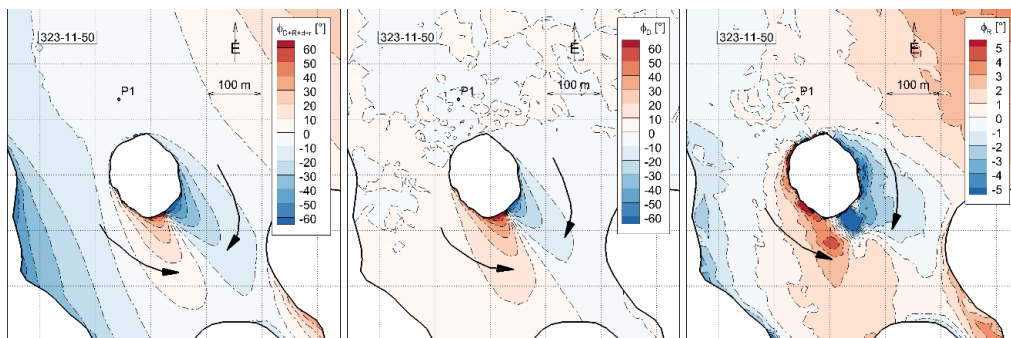
ebben az esetben θ_1 kizárólag a nádas mögött vízszintes mederrel számolt hullámterjedési irány. Azzal az egyszerűsítő feltételezéssel élve, hogy a hullámjelenségek hatása egymásra halmozható, a nádassziget okozta refrakció hatását a két mező különbségként közelítjük:

$$\phi_R \approx \phi_{D+R+d+r} - \phi_{D+d+r} = \theta_1 - \theta. \tag{5}$$

A nádassziget okozta diffrakció leválasztásához két további alváltozat szükséges. A második a teljes öbölben vízszintes mederrel számol, $\phi_{D+d} = \theta_{sz} - \theta_2$, a harmadik pedig ezen felül a szigetet nem tartalmazza, azaz a sziget területét is bevonja a számítási hálóba és a teljes hálón vízszintes medret ír elő: $\phi_d = \theta_{sz} - \theta_3$. Ezekben az egyenletekben θ_2 és θ_3 az értelemszerű alváltozatokkal kapott hullámterjedési irány. Az elhajlások különbségéből közelíthető a nádassziget okozta diffrakció hatása:

$$\phi_D \approx \phi_{D+d} - \phi_d = \theta_3 - \theta_2. \tag{6}$$

A bemutatott irányeltérések mezőszerű ábrázolását a 323-11-50 jelű modellváltozatra a 13. ábra mutatja be. Megállapítható, hogy a nádasszigetre a széllel közel párhuzamos irányból érkezik a hullámzás az öböl belseje felől, majd a sziget árnyékterében az elvárt módon hajlik el az árnyéktér szimmetriatengelye felé. Az öböl nádasszegélyének kiszögellései szintén okoznak elhajlást, és ez elsősorban diffrakció megnyilvánulása, hiszen a mederdomborzat viszonylag egyenletes. A teljes elhajlásról a fentebb ismertetett eljárással leválasztottuk a nádassziget hatását. Arra következtethetünk a 13. ábra középső és jobb oldali mezője alapján, hogy az árnyéktérben uralkodóan a diffrakció felelős az irányváltoztatásért, a feltöltődés okozta refrakció jóval gyengébb.



13. ábra. A 323-11-50 modellváltozat elhajlás-mezői: $\phi_{D+R+d+r}$, ϕ_D ill. ϕ_R
 Figure 13. Veering angle distributions of scenario 323-11-50: $\phi_{D+R+d+r}$, ϕ_D and ϕ_R , respectively

Abból, hogy a szigetünk mögött a diffrakció okozza a nagyobb irányváltást, még nem következik, hogy a refrakciónál erősebb az energiabevitele az árnyéktérbe. Alkalmazva a lineáris hullámmélet szuperpozíciós alapelvét (pl. *Holthuijsen 2007*), a turbulens kinetika energiával kapcsolatban álló hullámmagasságot három tagra bontjuk:

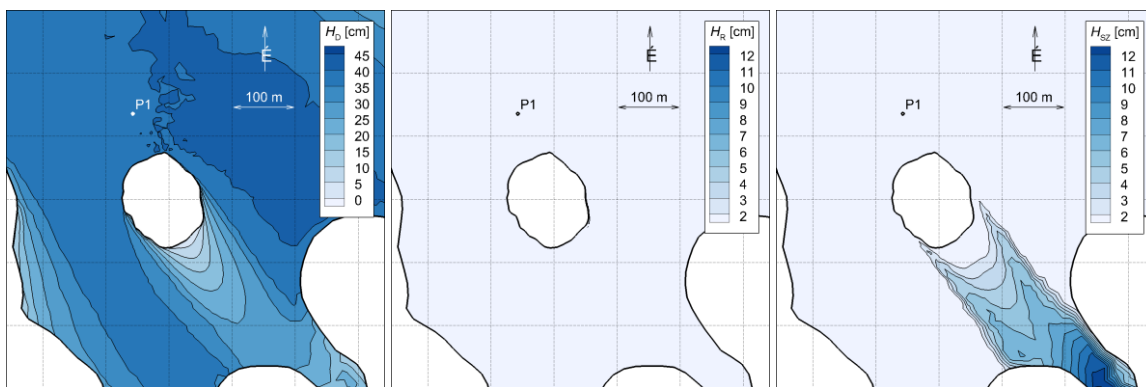
- Az a hullámmagasság, amely diffrakcióval hatol be a sziget mögé (H_D)
- Az árnyéktérbe refrakcióval behatoló hullámmagasság (H_R)
- Az árnyéktérben a helyi széllel keltett (fiatal) hullámok magassága (H_{SZ})

Ezeket hasonló elven becsüljük meg, mint az irányeltéréseket. A meglévő két alváltozat mellé további kettőt futtattunk le a 323-11-50 változatra, amelyben a szélmezőt helyileg módosítottuk: a nádas szél alatti oldalán az átmérőjével megegyező szélességű sávban zérusra csökkentettük a szél-csúsztatófeszültséget, egészen a számítási tartomány pereméig. A négy alváltozattal, azaz

- valós mederrel és a teljes vízfelületen ható széllel (H_{D+R+SZ} , 11a. ábra),
- vízszintes mederrel és a teljes vízfelületen ható széllel (H_{D+SZ} , 12a. ábra),
- valós mederrel és a nádas mögötti sávban kizárt széllel (H_{D+R}),
- vízszintes mederrel és a nádas mögötti sávban kizárt széllel (H_D),

megkaptuk azt a négy hullámmagasság-mező, amelyek különbségéből az egyes tagokat megbecsültük: $H_{SZ} \approx H_{D+R+SZ} - H_{D+R}$ és $H_R \approx H_{D+R+SZ} - H_{D+SZ}$. Kedvező, hogy H_D a (d) alváltozattól közvetlenül adódott, de akár a másik három alváltozattól is levezethetjük. A két levezetés némi zajtól eltekintve ugyanazt adta eredményül, ami megerősítette a feltételezett linearitást.

A diffrakció hatásosan vezeti be a hullámzást az árnyéktérbe, míg a refrakciónak ezúttal is lényegesen gyengébb a hatása (14. ábra). A szél által helyben keltett hullámmagasság részeseése a meghajtási hossz mentén megerősödik, 200 méter alatt fokozatosan eléri a 0,12 m-t.



14. ábra. A 323-11-50 modellváltozat hullámmagasság-mezőjének felbontása H_D , H_R ill. H_{SZ} tagokra
Figure 14. Decomposition of the wave height field of scenario 323-11-50 into components H_D , H_R and H_{SZ} , respectively

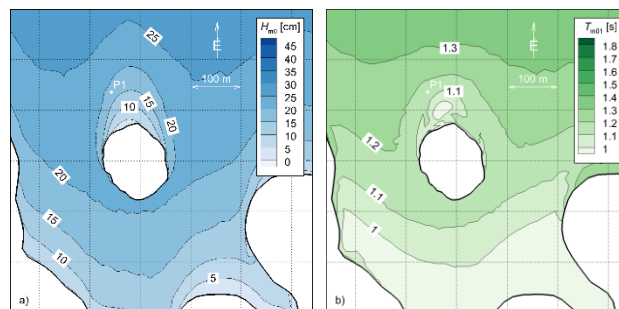
A különböző modellváltozatok lehetőséget adtak arra is, hogy a szélesség és a vízszint hatását vizsgáljuk a sziget körül kialakuló hullámjelenségekre nézve.

A 323-11-50 jelű referenciaváltozathoz képest a vízszint $\pm 0,20$ méteres megváltoztatása alig max. 3° -kal változtatja meg a hullámzás irányeltérését. A legalacsonyabb vízszintnél (323-11-30 változat) 1,8-ről 2,0-re nőtt a szél felőli és a szél alatti vízmélységek aránya, és az L/h arány szerint a hullámzás átmeneti mélységűvé vált, aminek a terjedési sebességét immár említésre méltóan befolyásolja a vízmélység. Ennek következtében a refrakció erősödött. A numerikus eredmények alapján a diffrakció okozta hullámmelhlás alig változott ebben a vízszinttartományban. A hullámmagasságok a 0,20 cm-rel sekélyebb vízben néhány centiméterrel változnak csak.

Ami pedig a szélességre való érzékenységet illeti, a szél 7 m/s-ra gyengülésével (323-07-50 változat) a nádas szél alatti lábnyoma szűkül, a hullámzás mindenütt határozottan mélyvízi lesz. A hullámmagasságok közel négyzetesen csökkennek a szélesség arányához képest, az öbölben ez általában -0,2 métert jelent, a sziget árnyékterében pedig kevesebb, mint 0,05 métert.

D-i szél vizsgálata közepes vízszintnél

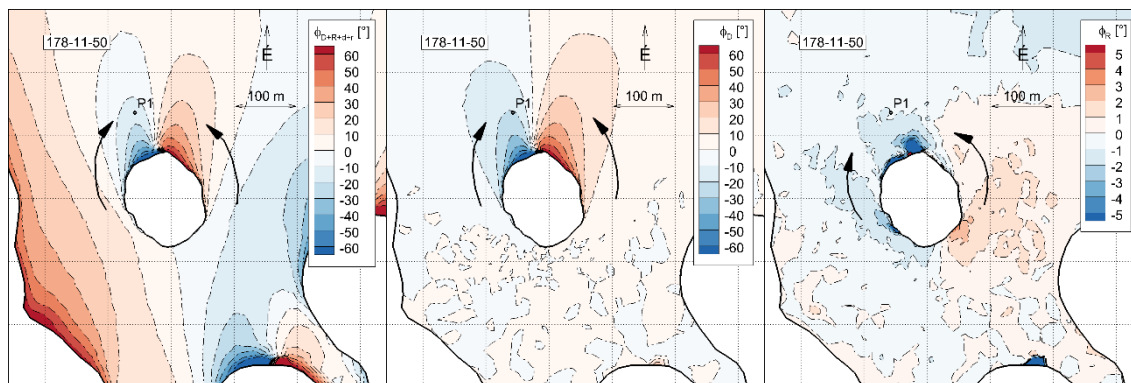
A 178-11-50 jelű modellváltozat alapján a D-i szél hatását vizsgálhatjuk a hullámterjedésre. A 11. és a 15. ábrát összehasonlítva láthatjuk, hogy a D-i szél esetében sokkal kisebb hullámmagasságok alakulnak ki a sziget körül a rövid meghajtási hosszak miatt. Ugyancsak a meghajtási hosszak miatt rövidülnek a periódusidők is, illetve a sziget árnyéktere is kisebb kiterjedésű, mint az ÉNy-i szélirány mellett.



15. ábra. 178-11-50 (valós meder) modellváltozat eredményei: hullámmagasság és periódusidő
Figure 15. Results of scenario 178-11-50 (actual bathymetry): plan view of wave heights and periods

A sziget körül kialakuló hullámjelenségekre is hatással van a szélirány. A 16. ábra alapján megállapítható, hogy a sziget körül a refrakció nem mondható annyira jelentősnek,

mint a vizsgált másik szélirány esetében, mely az É-i oldalon kialakuló mederszintekkel hozható kapcsolatba. A diffrakció hatása azonban az ÉNy-i szélirányhoz hasonlóan jelentős.



16. ábra. A 178-11-50 modellváltozat elhajlás-mezői: $\Phi_{D+R+d+r}$, Φ_D ill. Φ_R
Figure 16. Veering angle distributions of scenario 178-11-50: $\Phi_{D+R+d+r}$, Φ_D and Φ_R , respectively

KÖVETKEZTETÉSEK

Úrfelvételeken jól látszik, ahogy a Fertő tavi nádasok az uralkodó szélről leárnýékolt oldalukon terjednek gyorsabban. Ez egyrészt következik abból, hogy az orkánerejű viharoknak kitett oldalon a hullámszél roncsozza a növényzetet, de ez még nem indokolja, hogy a nádas az ellentétes oldalon növekedjen. A féloldalas terjeszkedést a meder feltöltődése teszi lehetővé a nádas szél alatti, leárnýékolt oldalán. Ennek a komplex jelenségnek egy folyóirata cikk terjedelmében is részletesen átfogható részével, a nádas hullámszélre gyakorolt hatásával foglalkoztunk jelen tanulmányunkban.

Idealizált geometriával, analitikus megoldásokkal is tárgyalhattuk volna ezt a témát. Azonban egy valós, Fertő tavi esettanulmányon keresztül, numerikus módszerrel vizsgáltunk egy jól elkülönülő nádassziget körüli hullámszél mezőt, mégpedig azért, hogy megállapítsuk, melyek azok a meghatározó folyamatok, amelyek a szabálytalan medermorfológia zaja fölött határozottan azonosíthatók. A numerikus modellünk alkalmazását helyszíni mérésekkel igazoltuk.

Előzetes érzékenységvizsgálattal kimutattuk, hogy a szél keltette rövid, felszíni hullámoknak a visszaverődése alig mutatható ki, és az nádasszigetnél való áthaladás során rendkívül rövid távon felemészthetők. Numerikus kísérleteinkkel rávilágítottunk arra, hogy a nádassziget árnyékterében a távolról érkező hullámok oldalirányú diffrakciója a szigetátmérő két-háromszoros távolságán belül nagy arányban visszafogja a hullámszél energiáját. Ezzel tehát azonosítottuk a nádassziget hullámszélre vonatkozó lábnyomát reprezentatív sekély tavi körülményekre.

A meghajtási hossz mentén fokozatosan erősödve a szél impulzusbevitelének szintén hozzájárul a hullámok kifejlődéséhez, de csak másodlagosan. A szigetétől ötszáz méteres távolságban a vizsgált 11 m/s-os szél 12 cm-rel növelte a hullámokat, annak ellenére, hogy a vízfelszín fölé emelkedő növényzet a szél meghajtást is visszafogja a sziget mögött.

A tárgyalt hullámjelenségek közül a mederesítéshez kötött hullámrefrakció bizonyult a leggyengébbnek. A Fertő

tagolt déli nádassziget olyan rövid nyílt tavi szél meghajtást eredményez, hogy a tó sekélysege ellenére a hullámszél az öbölben meghajtási hossz-limitált, és még élénkebb szél esetén is mélyvízi. Ebből következik, hogy a szél keltette hullámszél terjedésére a meder domborzat csak a legerősebb szelek idején van érdemi hatással. A terjedési sebességet a vízmélység kevésbé befolyásolja, ami magyarázza, hogy a refrakció még a 0,5 m-es árnyékterületi mederfeltöltődés ellenére is jelentéktelen. A nádassziget és a tavi hidrodinamika kölcsönhatásában tehát a morfológiai visszacsatolás nem olyan számottevő, mint azt a kutatásunk kezdetén gondoltuk.

A hullámszél ökohidraulikai jelentősége abban van, hogy a Stokes-sodródással a terjedése irányában lassan a nádassziget mögötti árnyékterébe szállítja a felszínhez közel passzívan utazó vízi élőlényeket, uszadékot. Másrészt a behatoló hullámszél turbulens kinetikai energiát hoz magával, ami segít lebegésben tartani a felső vízrétegekben érkező üledéket. Ugyanakkor a nádassziget szél alatti zónája a nyílt tónál vitathatatlanul nyugodtabb víztér, ezért nettó kiülepedés ezekből a viszonylag turbulensebb vízrétegekből is elkerülhetetlen.

Vizsgálatunk a nádassziget hullámszélre gyakorolt tartós hatására irányult, ugyanakkor nem foglalkoztunk a nádassziget becsapódó szélsőséges hullámszél körülményeket korlátozó hatásaival. Márpedig ahol az összefüggő partközeli nádassziget a károsodás miatt sziget szerkezetűvé ritkul (babásodik), ott mérséklődik a hullámszél hatása, és ezáltal megnő a mögöttes litorális élőhelyek, valamint az épített part hullámterhelése. A nádassziget romlásában nemcsak a hullámszél, hanem többek között a víz- és a széljárás megváltozása is szerepet játszhat. Mindkét folyamat a hullámok dinamikájára is hatással van, ami a bemutatotthoz hasonló, kalibrált modellekkel előrejelezhető. Cikkünkben az alapjelenséget jártuk körbe egy általánosítható geometriájú sziget esettanulmányán keresztül. Bármennyire is hasznos lenne tavaink természetvédelmi és vízgazdálkodási feladatainak támogatásához a teljes nádassziget hasonló részletességű numerikus vizsgálata, ez előreláthatóan még évekig túl költséges marad.

További kutatásaink a hullámszám mederfelszínre való transzformálására és a hatások széljártást figyelembe vevő statisztikai elemzésre irányulnak. Távlati célként a nádas áramlási hatására adott morfológiai válasz számszerű becslését tűzzük ki magunk elé, ehhez a nádasok áramlási mezőre és anyagtranszportra gyakorolt hatását is vizsgálni szükséges.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen tanulmány elkészültét 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 segítette.

IRODALOMJEGYZÉK

Alari, V., Raudsepp, U., Kõuts, T. (2008). Wind wave measurements and modelling in Kõndema Bay, Estonian Archipelago Sea, *Journal of Marine Systems*, 4, S30-S40.

Anderson, M. E., Smith, J. M. (2014). Wave attenuation by flexible, idealized salt marsh vegetation. *Coastal Engineering*, 83, 82-92.

Booij, N., Ris, R. C., Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation, *Journal of Geophysical Research*, 104, 7649-7666.

Campbell Scientific (2020). CSAT3A 3D Sonic Anemometer www.s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b_csat3a.pdf

Felföldi L. (1981). *Vizek környezettana. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.*

Gent, M. R. A van (1994): *Vegetative wave damping as bank protection*, September '94, Report Delft University.

Hashimoto, N., Nagai, T., Asai, T. (1995). Extension of the maximum entropy principle method for directional wave spectrum estimation. *Coastal Engineering* 1994, 232-246.

Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press.

Homoródi, K., Józsa, J., Krámer, T., Ciraolo, G., Nesselro, C. (2012a). Identifying wave and turbulence components in wind-driven shallow basins. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 56(1), 87-95.

Homoródi K., Józsa J., Krámer T. (2012b). On the 2D modelling of wind-induced waves in shallow, fetch-limited lakes, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 56(2), 127-140.

Jin, K-R., Ji Z-G. (2001). Calibration and verification of a spectral wind-wave model for Lake Okeechobee, *Ocean Engineering*, 28, 571-584.

Józsa, J., Milici, B., Napoli, E. (2007). Numerical simulation of internal boundary-layer development and comparison with atmospheric data. *Boundary-layer meteorology*, 123(1), 159-175.

Kiss, M., Józsa, J. (2015). Wind profile and shear stress at reed-open water interface – Recent research achievements in Lake Fertő. *Pollack Periodica*, 10(2), 107-122.

Kobayashi, N., Raichle, A. W., Asano, T. (1993). Wave attenuation by vegetation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119(1), 30-48.

Krámer, T., Józsa, J. (2005). An adaptively refined, finite-volume model of wind-induced currents in Lake Neusiedl, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 49, 111-136.

Lin, W., Sanford, L.P., Suttles S.E. (2002). Wave measurement and modelling in Chesapeake Bay, *Continental Shelf Research*, 22, 2673-2686.

Løvstedt, C. B., Larson, M. (2010). Wave damping in reed: Field measurements and mathematical modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(4), 222-233.

Luhar, M., Nepf, H. M. (2016). Wave-induced dynamics of flexible blades. *Journal of Fluids and Structures*, 61, 20-41.

Lükő, G., Torma, P., Weidinger, T., Krámer, T. (2021). Hullámszám módosított turbulens impulzusáram becslése a Balaton légkör-víz határfelületén. *Hidrológiai Közlemények*, 101. évf. 1. szám.

Moeini, M.H., Etemad-Shahidi, A. (2009). Wave parameters hindcasting in a lake using SWAN model, *Iranica Scientia*, 16, 156-164.

Nortek (2020): Aquadopp profiler 1 MHz. www.nortekgroup.com/products/aquadopp-profiler-1-mhz/pdf

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

Pascolo, S., Petti M., Bosa S. (2018). On the Wave Bottom Shear Stress in Shallow Depths: The Role of Wave Period and Bed Roughness, *Water*, 10(10), 1348.

Ris, R. C., Holthuijsen, L. H., Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions. 2. Verification, *Journal of Geophysical Research*, 104, 7667-7681.

SWAN team (2010). *SWAN Scientific and technical documentation*, Cycle III version 40.81, Delft University of Engineering and Geosciences, Delft, 126.

Szilágyi, M., Zsugyel, M., Krámer T. (2019). Légi felvételezés alkalmazhatósága sekély tavi növényzetfoltok hidrodinamikai hatásainak meghatározására. *Hidrológiai Közlemények* 99. évf. 4. szám, pp. 52-60.

Torma, P., Krámer, T. (2017). Modelling wave induced vertical mixing and the vertical temperature distribution in a shallow lake. In GertJan, van Heijst; Matias, Duran Matute; Leon, Kamp; Herman, Clercx; Wim, Uijttewaal; Rob, Uittenbogaard (szerk.) Proc. 4th International Symposium on Shallow Flows, 2017-06-26, Eindhoven, NL, 1-3.

Török G.T. (2010). Partvédművekre ható hullámterhelés számszerűsítése a Balatonon 2D numerikus hullámszámmodell segítségével, Diplomamunka, BME Vízépítési és Vizsgálódási Tanszék, Budapest.

WAMDI group (1988). The WAM model – a third generation ocean wave prediction model, *Journal Physical Oceanography*, 18, 1775-1810.

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. Az MHT tagja.

HOMORÓDI KRISZTIÁN Okleveles építőmérnök, a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének adjunktusa. Kutatási területe, a szél keltette hullámzás mérése, becslése és numerikus modellezése sekély tavakban, mint a Balaton, Velencei-tó vagy a Fertő tó. Ezzel a témával már hallgatóként elkezdett foglalkozni és a PhD értekezését is ebben a témában írta és védte meg 2012-ben. Az MHT tagja.

JÓZSA JÁNOS Okleveles építőmérnök, professzor, az MTA rendes tagja, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem rektora. Kutatási területe a sekély felszíni vizek hidrodinamikája: határfelületi folyamatok, szél keltette tavi víz- és üledékmozgás mérése és numerikus modellezése, hullámteres vízfolyások áramlási, elkeveredési és hordalékvándorlási folyamatainak mérése és modellezése, ártéri elöntések modellezése. A Hidrológiai Közlöny szerkesztőbizottságának tagja.

KRÁMER TAMÁS A BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének egyetemi docense, szakterülete a felszíni vizek áramlástana. 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. Az MHT tagja.

Precíziós öntözőberendezés szórás egyenletességének értékelése

Szabó Andrea*, Tamás János*, Nagy Attila*

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

Kivonat

Napjainkban a globális felmelegedés miatt kialakult szélsőséges időjárási viszonyok miatt az öntözés fejlesztését egyre inkább szükséges tényezőnek tekintik a mezőgazdaság területén. A megfelelő öntözési módszer kidolgozása a parcellán található növényzet víz-igényétől és a területen rendelkezésre álló vízkészlettől függ. A szántóföldi körülmények között a leggyakrabban alkalmazott módszer az esőszerű öntözés. A szántóföldi öntözőberendezésekbe beépített öntözőfejek szórási egységességét a Christiansen-féle egyenletességi tényezővel (CU%) és az eloszlási egyenletességgel (DU%) jellemezhetjük. Vizsgálatainkat a Debreceni Egyetem Látóképi Kísérleti Telepén és egy nyírbátori telephelyű cégnek a lineár öntözőberendezésén végeztük el 2019 júliusában és augusztusában. A Nyírbátorban található öntözőberendezés egy változó intenzitású öntözési (VRI) technológiával kiegészített precíziós öntözőberendezés. Kutatási eredményeink során a vizsgált hagyományos lineár öntözőberendezésen kialakított szórófejek permetezési egyenletessége nem érte el a minimális 84% CUC% értéket. Ezzel szemben a VRI pozitív eredményt adott 95,25% CUC%, 93,64% ICUC%, 90,97% DU% és 87,27% IDU% értékekkel. Következtetés: a VRI technológiával ellátott öntözőberendezés biztonságosabb és egyenletesebb módszernek tekinthető, mint a hagyományos lineáris öntözőberendezések.

Kulcsszavak

Öntözés, Christiansen-féle egyenletességi tényező, eloszlási egyenletesség, változó intenzitású öntözés (VRI).

Evaluation of water application of precision irrigation system

Abstract

Today, due to extreme weather conditions caused by global warming, the development of irrigation is increasingly seen as a necessary factor in agriculture. The development of an appropriate irrigation method depends on the water demand of the vegetation on the plot and the water supply available in the area. Under field conditions, the most commonly used method is sprinkler irrigation. The spray uniformity of sprinklers installed in field irrigation systems can be characterized by the Christiansen uniformity factor (CU%) and the uniformity of distribution (DU%). Our experiments were carried out in July and August 2019 at the Agricultural Research and Educational Farm of the University of Debrecen, Hungary and on a linear irrigation equipment of a company based in Nyírbátor, Hungary. The irrigation system in Nyírbátor is a precision irrigation system supplemented with variable intensity irrigation (VRI) technology. In the course of our research results, the spray uniformity of the nozzles formed on the investigated conventional linear irrigation equipment did not reach the minimum value of 84% CUC%. In contrast, VRI gave a positive result with 95.25% CUC%, 93.64% ICUC%, 90.97% DU%, and 87.27% IDU%. Conclusion: the irrigation equipment with VRI technology can be considered as a safer and more uniform method than the conventional linear irrigation equipment.

Keywords

Irrigation, Christiansen-uniformity factor, distribution uniformity, variable rate irrigation (VRI).

BEVEZETÉS

Az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi testület az IPCC második értékelő jelentésében megállapította, hogy a globális klímaváltozás hatására az árvizek és az aszályok gyakorisága növekedni fog. Az Egyesült Nemzetek Szervezete 1997-ben kiadta a világ édesvízi erőforrásainak átfogó áttekintését (*Kjellén és McGranahan 1997*), mely rávilágított a növekvő népesség és a gazdasági fejlődés rendelkezésre álló vízkészletre gyakorolt hatásaira. Becslések szerint a világ népességének körülbelül egyharmada jelenleg olyan országokban él, ahol mérsékelt vagy jelentős vízhiány tapasztalható. A jövőbeni vízigény növekedését többek között befolyásolni fogja a népesség növekedése, az urbanizáció, az ipari változások, az öntözött területek növekedése, a vízfelhasználás megfelelő hatékonysága, a környezetvédelmi követelmények, az éghajlatváltozás, az intenzív mezőgazdaság és a megnövekedett turizmus (*Iglesias és társai 2010, Kellis és társai 2013*). A világon nagyságrendileg 324 millió hektár öntözött terület van, amely a világ összes termőterületének a 21%-át fedi le, ahol a betakarított növények 61%-át a különböző gabona-

félék adják. A legnagyobb terület Ázsiában található, majd Amerikában, harmadik legnagyobb öntözhető terület pedig Európában (*FAO 2016*). A szabadföldi növénytermesztés esetében a csapadék eloszlása és mennyisége meghatározó a terméshozadék szempontjából. A Kárpát-medence területén a csapadék mennyiségének az értéke évről évre folyamatosan változik (*Spinoni és társai 2015*), Magyarország évi átlagos csapadék mennyisége 500-700 mm-re tehető, viszont az éves csapadékösszeg az elmúlt 100 évben csökkenő tendenciát mutat (*Internet 1*). A folyamatosan változó időjárási viszonyok miatt átlagosan minden második évben közepes, minden harmadik évben pedig súlyos aszály várható (*Konecsny 2011*). Az elmúlt évek során kialakult változékony időjárás a mezőgazdaság területén is problémát okoz (*Szalai 2009, Jolánkai és társai 2018*), emiatt napjainkban az öntözést egyre szükségesebb tényezőként tartják számon. Hazánk szántóföldjeinek 2/3-a talaj vízgazdálkodás szempontjából rossz, egy részének vízbefogadó képessége gyenge, így az alacsony vízki-juttatás mellett a túlóntözés is káros hatással lehet a területeken (*Fiebig és Dodd 2016*). Ahol jelen van kiépített ön-

tözővíz ellátásra alkalmas rendszer, ott a gazdák számára hozzáférhető a megfelelő mennyiségű öntözővíz kijuttatása (Bíró és társai 2011), amely a terméshozam és a termésbiztonság stabilizálásának és növelésének a feltétele. Ennek ellenére minden évben megmutatkozik az öntözés hiánya miatt bekövetkező termésátlagoknak az ingadozása. A rendelkezésre álló vízkészletek és vízkormányzási lehetőségek alapján hazánkban körülbelül 400 000 hektárnyi terület válhatna öntözhetővé a jelenlegi 100 000 ha helyett (Nemzeti vízstratégia 2017). A termésbiztonság stabilitásának az érdekében évente 100 - 200 mm öntözővíz kijuttatására lenne szükség, ami a szántóföldön 1 000-2 000 m³/ha vizet jelent. A növény igényeinek felmérése után kell döntenie arról, hogy milyen öntözési módszert alkalmazunk (Smith és Baillie 2009). A szántóföldi körülmények között legelterjedtebb öntözési módszer az esőszerű öntözés, amelynek több típusát különböztetjük meg. Ezek közül például a lineár és a csévélődobos öntözőberendezést, melyek közötti különbség az öntözött terület alakjában figyelhető meg. A lineár öntözőberendezéssel négyszögletes terület öntözhető, a csévélődobos szerkezet pedig a szabálytalan alakú táblákon alkalmazható (Bíró és társai 2011). A frontálisan haladó lineár öntözőberendezés szárnyvezetékére jellemző, hogy a csővezetékre merőlegesen öntöz, a szórófejeket a talajtól függően választják meg. A lapka formája befolyásolja, a szórástávolságot, illetve a cseppek méretét (Tóth 2019). Precíziós öntözésről akkor beszélhetünk, amikor a precíz vízkijuttatás az egyes növények igényeinek kielégítése mellett minimalizálja a környezetre gyakorolt káros hatásokat (Raine és társai 2007), melyet napjainkban a „variable rate irrigation”-nel (VRI) vagyis helyspecifikus öntözéssel azonosítanak, hiszen az esőztető öntözőberendezéssel ellátott területen eltérő mennyiségű zónák kialakítása lehetséges. A zónák kialakításánál fontos a megfelelő mennyiségű

és idejű öntözővíz kijuttatása mellett a megfelelő sebesség vezérlése, ami a járószerkezet haladási sebességét fogja befolyásolni (González Perea és társai 2017). A VRI technológia használata során különböző talajparamétereket, domborzati térképeket és az öntözni kívánt növényre vonatkozó adatokat tartalmazó információkat lehet betáplálni az öntözőberendezésbe (Boluwade és társai 2016, Colaizzi és társai 2017, Yari és társai 2017). Magyarországon jelenleg kevés helyen használnak VRI technológiával szabályozott öntözőberendezést (Takács és társai 2018). Kutatásunk során célul tűztük ki egy lineár öntözőberendezés és egy VRI technológiával szabályozott lineár öntözőberendezés kijuttatott vízmennyiség szórássegényletességének az összehasonlítását feltárva ezzel az alul- és túlöntözött területek arányát. A felméréseinket szántóföldi körülmények között csemegekukoricában végeztük.

ÖNTÖZŐBERENDEZÉSEK

A terepi felmérések a Debreceni Egyetem Látóképi Növénytermesztési Kísérleti Telepén és Nyírbátorban a Bátortrade Kereskedelmi és Szolgáltató Kft. szántóterületein történtek 2019 júliusában és augusztusában. A Látóképi Növénytermesztési Kísérleti Telepen kialakított öntözőberendezés több mint egy évtizede használatban van, folyamatosan karbantartva. A lineár öntözőberendezéssel a különböző zónák és szórófejek közötti beállítás nem lehetséges, az öntözővíz kijuttatás az öntözőgép haladási sebességének függvénye, irányítása földalatti indukciós vezérléssel történik. A nyírbátori Bátortrade Kereskedelmi és Szolgáltató Kft. 2019-ben egy GPS irányítású, VRI technológiával szabályozott átfordulás lineár öntözőberendezést telepített, amellyel zónánkénti és szórófejenkénti öntözésszabályozás valósítható meg (1. táblázat). További előnye, hogy a lineár mód mellett, a szántóterület végén megfordul és center pivotként is tud üzemelni.

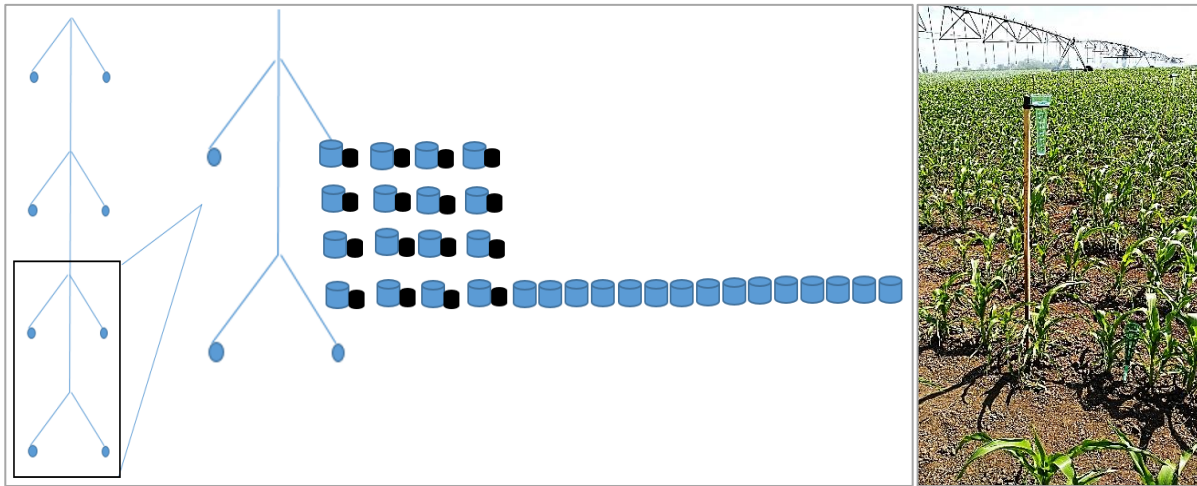
1. táblázat. Öntözőberendezések
Table 1. Irrigation equipment surveyed

Helyszín	Debreceni Egyetem Látóképi Növénytermesztési Kísérleti Telep	Nyírbátor, Bátortrade Kereskedelmi és Szolgáltató Kft.
Öntözőberendezés	Lineár öntözőberendezés	Precíziós lineár öntözőberendezés VRI technológiával
Öntözőberendezés típusa	Valley 8120 univerz öntözőberendezés földalatti indukciós vezérléssel	Reinke E2060PL átfordulás lineár
Szórófej típusa	Seninger	Rotator® Pivot Sprinkler (Nelson Irrigation Co.)

A TEREPI FELMÉRÉS ÉS A SZÓRÁSSEGÉNYLETESÉG ÉRTÉKELÉSÉNEK MÓDSZERTANA

A kutatás során értékeltük a hagyományos és a VRI technológiával ellátott lineár öntözőberendezés szórássegényletességét, illetve az alul- és túlöntözött területek arányát. Három terepi felmérést végeztünk kétszeri ismétlésben, melyek során csapadékmérőket helyeztünk el az öntözőberendezés alá. A mérőedényeket minden mérési időpontban 4x4-es rácshálóba helyeztük ki 5 méterenként két magas-

ságban 30 cm-re és 150 cm-re kukorica sorközökben. Mindemelett vizsgáltuk a különböző öntözési szektorok közötti átmenetek egyenletességének az alakulását is, méterenként 150 cm magasságban 15 db csapadékmérő kihelyezésével. Az intercepció alakulását a hagyományos és VRI technológiával szabályozott lineár öntözőberendezés vízmennyiség eredményei alapján számítottuk az átlagosan 150 cm magas kukorica állományokban 30 cm magasságban kihelyezett mérőedények alapján (1. ábra).



1. ábra. Mérési pontok bemutatása
Figure 1. Presentation of measuring points

Az első két mérés során a hagyományos lineár öntözőberendezést, a harmadik mérés esetében pedig VRI technológiával szabályozott lineár öntözőberendezés szórás-egyenletességének, valamint intercepció alakulásának a vizsgálatát figyeltük meg. A kukorica átlagosan 45-50 cm magasságú volt mindhárom mérés esetében. A hagyományos lineár öntözőberendezés vízkijuttatása egységesen 15 mm, a VRI technológia esetében pedig 10 mm öntözővíz kijuttatással történt. A mérések időpontjában teljes szélcsend volt a területen található automata meteorológiai állomás adatai alapján. A szórás-egyenletességet a csapadékmérőkbe kijuttatott öntözővíz mennyiség (mm) adataiból számoltuk. A szórófejek egyenletességi értékeinek a meghatározására a 150 cm magasságban kihelyezett gyűjtőedények vízmennyiségeire az 1. egyenlet alapján számolt Christiansen-féle egyenletességi tényezőt (CUC%) alkalmaztuk (Christiansen 1941), amely elsősorban a szántóföldön használt szórófejek vízkijuttatási egyenletességét jellemzi (Karmeli 1978, Topak és társai 2005):

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |v_i - \bar{v}|}{\sum_{i=1}^n v_i} \right] \quad (1)$$

ahol

\bar{v}_i = a csapadékmérőkben felfogott öntözővíz mennyiség átlaga (mm),

v_i = az egyes csapadékmérőkben felfogott öntözővíz mennyiség (mm).

A gyakorlatban a CUC% értéknek el kell érnie a minimum 84% - ot, hogy megfelelő szórás-egyenletességről lehessen beszélni. A CUC% számítás módszere egyenlő arányban veszi figyelembe az alul- és túllöntözött területeket (Maroufpoor és társai 2010).

A vízkijuttatási egyenletesség meghatározására a Christiansen - féle egyenletességi tényező mellett az alulöntözésre különösen érzékeny eloszlási egyenletességet is számítottuk (distribution uniformity, DU%) (2) (Kruse 1978). Egyenletes öntözésről minimum 80% DU% érték-nél beszélhetünk (Irmak és társai 2011):

$$DU \% = 100 \left(\frac{X_{i25\%}}{\bar{X}_i} \right) \quad (2)$$

ahol

$X_{i25\%}$ = a legszárazabb negyed vízborításának átlaga (mm),
 X_i = teljes terület vízborításának átlaga (mm) (Biró és társai 2019; Takács és társai 2019).

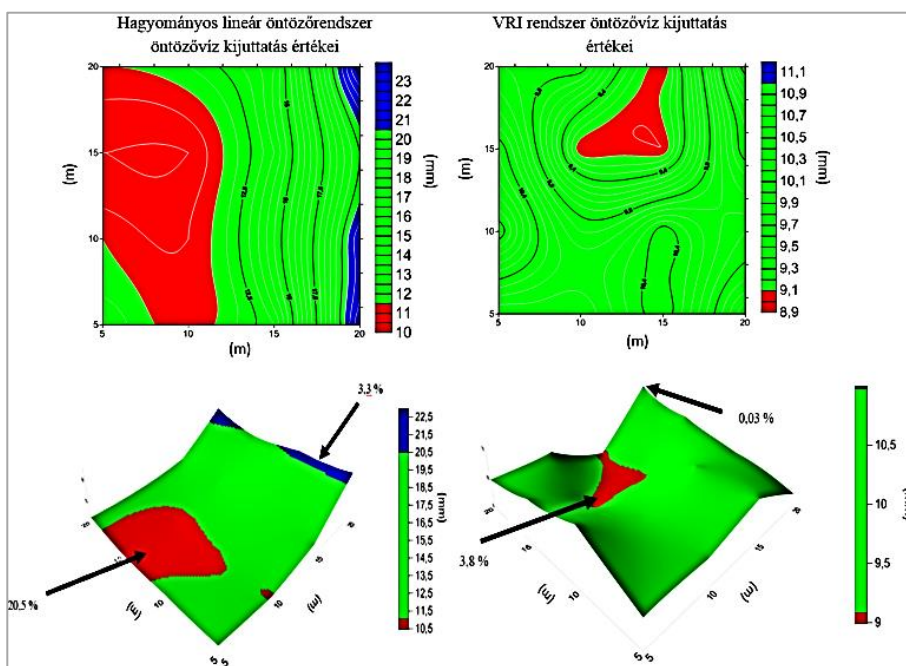
Az egyenletességi tényezők számítása mellett a kijuttatás térbeli eloszlását is vizsgáltuk annak érdekében, hogy lehatároljuk az alul, illetve túllöntözött területeket. A területek lehatárolásához az alulöntözés és túllöntözés határát a kijuttatott öntözővíz mediánjából, maximumából, minimumából és CUC% értékeiből számoltuk. Az alulöntözés határértékét a kijuttatott öntözővíz mennyiség medián értékének, valamint a medián és a minimum érték közötti különbség Christiansen-féle egyenletességi tényező módosított értékének különbségéből számoltuk ki: medián - (medián - minimum) x CUC%. Az így kapott érték alatti vízkijuttatás alulöntözésnek minősül. Az túllöntözés határértékét a kijuttatott öntözővíz mennyiség medián értékének, valamint a maximum és a medián érték közötti különbség Christiansen - féle egyenletességi tényezővel módosított értékének összegéből számoltuk ki: medián + (maximum - medián) x CUC%. Az így kapott érték feletti vízkijuttatás túllöntözésnek minősül. Az öntözővíz kijuttatás eloszlását Surfer programban krigelési eljárással létrehozott eloszlás és 3D-s térképeken ábrázoltuk, összehasonlítva a hagyományos és a VRI technológiával szabályozott precíziós lineár öntözőberendezés öntözővíz kijuttatásainak az egyenletességét.

CHRISTIANSSEN - FÉLE EGYENLETESSÉGI TÉNYEZŐ ÉS AZ ELOSZLÁSI EGYENLETESSÉG EREDMÉNYEI

A hagyományos lineár öntözőberendezés vizsgálata során a 150 cm magasra kihelyezett csapadékmérőkben felfogott öntözővíz mennyiség átlaga $14,5 \pm 4,44$ mm volt. A szórófejek szórás-egyenletessége CUC% 75,43%, a DU% 74,14%, lett. A kapott % eredmények nem érik el a megfelelőnek számított minimális gyakorlatban használt értékeket, azaz a lineár vízkijuttatása nem egyenletes. A gyenge szórás-egyenletesség oka a hagyományos lineár öntözőberendezés régebbi kialakításából és használatából származó szórófejek kopására vezethető vissza. A VRI technológiával felszerelt lineár öntözőberendezés vizsgálá-

lata során a 150 cm magasra kihelyezett csapadékmérőkben felfogott öntözővíz mennyiség átlaga $10,03 \pm 0,64$ mm volt. A VRI precíziós lineár öntözőberendezés esetében a kihelyezett csapadékmérők adataiból számított CU% igen magas 95,25%, a DU% 90,97 % volt, ezáltal a kijuttatott öntözővíz értékek meghaladták a minimumnak előírt szórás egyenletességi értékeket. Emellett a kijuttatott öntözővíz mennyiségek alacsonyabb szórásértékének az alakulása is alátámasztja a VRI technológiával szabályozott öntözőberendezés homogénebb és egyenletesebb kijuttatás értékeit.

A térbeli eloszlásvizsgálat is a szórás egyenletesség két eltérő lineár technológia közötti jelentős különbséget tárja fel. A hagyományos lineár öntözőberendezés alkalmazásánál az öntözött területen $46,15 \text{ m}^2$ lett alulöntözve, mely az összes öntözött terület 20,5%-át teszi ki. A túlöntözött rész pedig $7,45 \text{ m}^2$, ami az összes terület 3,3%-át adja. Ezzel szemben a VRI technológiával szabályozott lineár öntözőberendezés alkalmazásánál az alulöntözött terület $8,55 \text{ m}^2$, mely az összes öntözött terület 3,8%-a, míg a túlöntözött terület $0,007 \text{ m}^2$ lett, mely az összes terület 0,03%-át teszi ki (2. ábra).

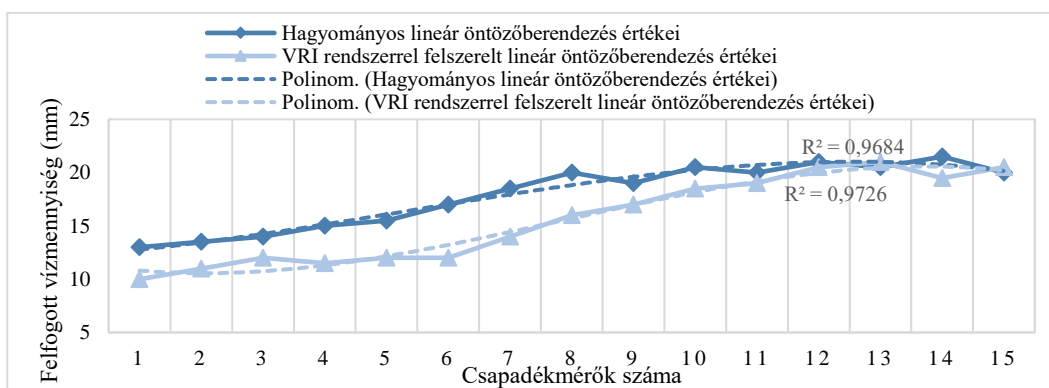


2. ábra. Öntözővíz kijuttatás térbeli eloszlása
Figure 2. Spatial distribution of irrigation water application

A ZÓNÁK KÖZÖTTI ÁTMENET EGYENLETESÉGÉNEK ÉRTÉKELÉSE

Az öntözőberendezések szektorok közötti átváltásának előzetes vizsgálatára méterenként egy vonalban kihelyezett csapadékmérőket használtunk. Fontos megjegyezni, hogy a kapott eredmény egy szóróféj növekvő vízkijuttatás értékeit reprezentálja. A megfigyeléshez a hagyományos lineár öntözőberendezés esetében az öntözőgép sebességét változtattuk, a víznyomást nem, így módosítva a fajlagos kijuttatás mértékét. A VRI technológia esetén az öntözővíz mennyisége szórófé-

jenként került szabályozásra. A hagyományos lineár esetében az öntözőberendezés sebességét 20 m/h - ról 10 m/h-ra csökkentettük, 20 mm-re növelve a kijuttatott öntözővíz mennyiségét. VRI technológiával szabályozott lineár során 10 mm-ről 20 mm-re növeltük a vízkijuttatás mértékét. A szektorok közötti váltás egyenletességét a mérési pontokra illeszkedő polinom függvénnyel mutatjuk be. A kapott $R^2 = 0,968$ és $R^2 = 0,973$ értékek alapján a hagyományos és a VRI technológiával ellátott lineár öntözőberendezésnél is megfelelően egyenletes a szektorok közötti váltás (3. ábra).



3. ábra. A szektorok közötti öntözővíz kijuttatása
Figure 3. Irrigation water application between sectors

INTERCEPCIÓ HATÁSÁNAK SZÓRÁSEGYENLETESÉGRE GYAKOROLT ÉRTÉKELÉSE

A 30 cm magasságban elhelyezett mérőedények alapján számítottuk a kukoricaállomány intercepcióját. A vártunk megfelelően az intercepcióban átlagosan nem tapasztaltunk jelentős különbséget az eltérő lineár technológiák között: az intercepció mértéke 2,5-4,69 mm között mozgott 3,42 mm-es átlagos értékkel mindkét vizsgált területen. A Christiansen-féle egyenletességi tényező alapján sincs lényeges változás a szórás egyenletességben. A hagyományos lineár öntözőberendezés esetén az értéke (ICUC% 74,93%) 0,66%-kal, míg a VRI technológiával szabályozott öntözőberendezés esetén (ICUC% 93,64%) 1,69%-kal marad el az állomány feletti mérőedények vízmennyiségei alapján számolt koefficiensről. Ezzel szemben a DU% értékek változása esetében jelentősebb különbség tapasztalható a hagyományos és a VRI technológia között. A hagyományos lineár esetben DU% értéke (IDU% 58,05%) 21,7%-kal alacsonyabb az állomány felett mért értékekhez képest, míg a VRI esetében ez a csökkenés csak 4,06%. A DU% a CUC%-hoz képest az alulöntözés mértékére érzékenyebb a mutatószám, mivel a legszárazabb negyed öntözési értékeit viszonyítja az átlagos kijuttatási mennyiséghez. Bár az intercepció eloszlása, döntően az állománynak köszönhetően homogénnek tekinthető, a 14,5 mm-es átlagos vízellátottsággal rendelkező területekhez képest hatása hatványozottabb a vizsgált terület 20,5%-át kitevő 9,5-11,5 mm vízkijuttatással jellemezhető alulöntözött legszárazabb területek vízellátottságára. Míg a legszárazabb területen a 3,42 mm-es intercepció 30-36%-át jelenti a kijuttatott öntözővíznek, addig az átlagos ellátottságú területen (14,5 mm) ennek mértéke átlagosan csak 24%. Az alulöntözött területekre így nemcsak kevesebb öntözővíz kerül kijuttatásra, hanem a kijuttatott öntözővíznek kevesebb hányada is hasznosul.

KÖVETKEZTETÉSEK

A homogén és megfelelő öntözővíz kijuttatása egy szántóföldi területen több szempontból is fontos. A nem megfelelően kijuttatott vízmennyiség a termőterület leromlásához vezethet, peszticidek kimosódhatnak a talajból ezzel együtt a talajszerkezet romlása is fennáll, illetve a szikesezés kialakulása. Emiatt fontos a biztonságos és stabil homogén öntözővíz kijuttatására alkalmas öntözőberendezések használata. Kutatási eredményeink alapján a vizsgált VRI technológiával felszerelt lineár öntözőberendezés szórófejeinek kijuttatási egyenletessége homogén, míg a hagyományos lineár esetben jelentős heterogenitás tapasztalható. A VRI hosszú távú használata a szántóföldi körülmények jó minőségének a megmaradása mellett pedig a precíziós mezőgazdaság és precíziós öntözéstechnológiák kialakításához és fejlesztéséhez is biztos alapot nyújt. A VRI alkalmazása kiküszöböli az alul- és túlöntözött területek kedvezőtlen eloszlásának az arányát.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Innovációs és Technológiai Minisztérium által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program NKFIH – 1150 - 6/2019 számon támogatta, a Debreceni Egyetem 4. területi programja keretében.

IRODALOM

- Biró S., Apáti F., Szöllősi L., Szűcs I., Kapronczai I., Szűcs I., Váradi L., Apáti F., Bojtárné Lukácsik M., Bozán Cs., Felkai B. O., Gyalog G., Hamza E., Körösparti J., Pekár F., Székely E., Szöllősi L., Tóth P., Valentinyi K., Varga E. (2011). Az öntözésfejlesztés gazdasági összefüggései. In: Biró S., Kapronczai I., Szűcs I. és Váradi L. (szerk.) *Vízhasználat és öntözésfejlesztés a magyar mezőgazdaságban*. Agrárgazdasági Kutató Intézet, Budapest. pp. 45–74.
- Biró T., Takács S., Helyes L., Pék Z. (2019). Precíziós körforgó szárnyvezeték VRI zónáinak szóráseloszlási vizsgálata. *Hidrológiai Közönlöny*, 99. évf. 3. szám. pp. 5–13.
- Boluwade, A., Madramootoo, C., Yari, A. (2016). Application of unsupervised clustering techniques for management zone delineation: Case study of variable rate irrigation in Southern Alberta, Canada. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 142(1): pp. 1–8.
- Christiansen, E. J. (1941). The uniformity of application of water by sprinkler systems. *Agric. Eng.* 22, pp. 89–92.
- Colaizzi, P. D., O’Shaughnessy, S. A., Evett, S. R., Mounce, R. B. (2017). Crop evapotranspiration calculation using infrared thermometers aboard center pivots. *Agricultural Water Management*. 187: pp. 173–189.
- FAO (2016). AQUASTAT <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/didyouknow/index3.stm>. Lekérdezés időpontja: 2018.12.04.
- Fiebig, A., Dodd, I. C. (2016). Inhibition of tomato shoot growth by over-irrigation is linked to nitrogen deficiency and ethylene. *Physiologia Plantarum*. 156(1): pp. 70–83.
- González Perea, R., Fernández García, I., Martín Arroyo, M., Rodríguez Díaz, J. A., Camacho Poyato, E., Montesinos, P. (2017). Multiplatform application for precision irrigation scheduling in strawberries. *Agricultural Water Management*. 183: 194–201 p.
- Iglesias, R., Ortega, E., Batanero, G., Quintas, L. (2010). Water reuse in Spain: data overview and costs estimation of suitable treatment trains. *Desalination* 263, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.06.038>.
- Irmak, S., Odhiambo, L. O., Kranz, W. L., Eisenhauer, D. E. (2011). Irrigation Efficiency and Uniformity, and Crop Water Use Efficiency. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*. 451: 8 p.
- Jolánkai, M., Kassai M. K., Tarnawa, Á., Pósa, B., Birkás, M. (2018). Impact of precipitation and temperature on the grain and protein yield of wheat (*Triticum aestivum* L) varieties. *Időjárás*. 122(1): pp. 31–40
- Karmeli, D. (1978). Estimating sprinkler distribution pattern using linear regression. *Transactions of the ASAE*, 21: 682–686.
- Kellis, M., Kalavrouziotis, I.K., Gikas, P. (2013). Review of wastewater reuse in the Mediterranean countries, focusing on regulations and policies for municipal and industrial applications. *Glob. Nest J.* 15, pp. 333–350.

Kjellén, M., McGranahan, G. (1997). Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. Urban water – Towards Health and sustainability. World Meteorological Organisation, Geneva, 34 p. ISBN: 91 88714 42 X.

Konecsny K. (2011). A víz, mint erőforrás és kockázat. https://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0038_foldrajz_konecsnykaroly/ch01s03.html

Kruse, E. G. (1978). Describing Irrigation Efficiency and Uniformity. Journal of the Irrigation and Drainage Division. 104(1): pp. 35–41.

Maroufpoor, E., Faryabi, A., Ghamarnia, H., Moshrefi, G. Y. (2010). Evaluation of Uniformity Coefficients for Sprinkler Irrigation Systems under Different Field Conditions in Kurdistan Province (Northwest of Iran). Soil & Water Research, 5, 2010 (4): pp.139–145.

Nemzeti Vízstratégia (2017). Nemzeti Vízstratégia (Kvassay Jenő Terv). 140 p.

Raine, S. R., Meyer, W. S., Rassam, D. W., Hutson, J. L., Cook, F. J. (2007). Soil-water and solute movement under precision irrigation: Knowledge gaps for managing sustainable root zones. Irrigation Science. 26(1): pp. 91–100.

Smith, R. J., Baillie, J. N. (2009). Defining precision irrigation: A new approach to irrigation management. National Centre for Engineering in Agriculture and Cooperative Research Centre for Irrigation Futures. pp. 18–21.

Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. V., Barbosa, P. (2015). The biggest drought events in Europe from 1950

to 2012. Journal of Hydrology: Regional Studies. 3: pp.509–524.

Szalai S. (2009). Drought Tendencies in Hungary and its Impacts on the Agricultural Production. Cereal Research Communications. 37: pp. 501–504.

Takács S., Biró T., Helyes L., Pék Z. (2019). Variable rate precision irrigation technology for deficit irrigation of processing tomato. Irrig. and Drain. 68: pp. 234–244. Published online 28 October 2018 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com)

Takács, S., Helyes, L., Biró, T., Pék, Z. (2018). Irrigation water saving method using precision technology. Budapest. PREGA Science 2018. pp. 44-45.

Topak, R., Suheri, S., Ciftci, N., Acar, B. (2005). Performance evaluation of sprinkler irrigation in a semi-arid area. Pakistan Journal of Biological Sciences, 8: pp. 97–103.

Tóth Á. (2019). Többtámaszú, önjáró öntözőgépek. (<https://mezohir.hu/hir/tobbtamaszu-onjaro-ontozogepek>)

Yari, A., Madramootoo, C. A., Woods, S. A., Adamchuk, V. I. (2017). Performance Evaluation of Constant Versus Variable Rate Irrigation. Irrigation and Drainage. 66(4): pp. 501– 509.

INTERNETES HIVATKOZÁS

Internet 1.

https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/csapadek/

A SZERZŐK



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 élelmiszer biztonság vízgyűjtő szintű kapcsolatrendszerének, illetve a klímaadaptáció kapcsolat rendszerének spektrális vizsgálatát és értékelését végzi.

TAMÁS JÁNOS a Debreceni Egyetem, Víz-és Környezetgazdálkodási Intézetének igazgatója; agrármérnök, agrokémiai, vízgazdálkodási és térinformatikai szakmérnök. 2007-ben megkapta a 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 Közöny szerkesztőbizottságának 2015 óta tagja.

NAGY ATTILA a Debreceni Egyetem Mezőgazdaságtudományi Karán egyetemi docens. 2005-ben szerzett környezetgazdálkodási agrármérnök diplomát, PhD fokozatát 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. Elismerések: Debreceni Egyetem rektorának elismerő oklevele 2012., Magyar Zoltán Posztdoktori ösztöndíj (2013-2014). A Magyar Hidrológiai Társaság tagja.

Nekrológ



Életének 85. évében elhunyt dr. Vermes László okleveles agrármérnök, egyetemi tanár, aki 1959-ben szerzett mezőgazdasági mérnöki oklevelet a Gödöllői Agrártudományi Egyetemen, majd öntözéses növénytermesztő szakmérnöki oklevelet 1962-ben, egyetemi doktori fokozatot pedig 1970-ben. 1975-től a mezőgazdasági tudomány kandidátusa, 1996-tól az MTA Doktora.

Diplomájának megszerzése után vidéki gyakorlati munkahelyeken öntözésfejlesztési szaktanácsadói munkát végzett 1959-1961-ben, különösen az esőszerű öntözés megismertetése érdekében. 1961-1982 között a VITUKI (Vízgazdálkodási Tudományos Kutatóközpont) kutatója volt, ahol témafelelősként, később az általa szervezett országos kutatói munkacsoport vezetőjeként vett részt a hazai komplex szennyvíz-, szennyvíziszap- és hígtrágyahasznosítási kutatómunka megindításában és irányításában. 1983-1988 között a Gödöllői Agrártudományi Egyetem Vízgazdálkodási és Meliorációs Tanszékének tudományos tanácsadója, majd 1988-tól a tanszék vezetője, 1990-től egyetemi docens és dékánhelyettes volt.

1991-1993 között a Földművelésügyi Minisztériumban a Tudományszervezési és Oktatási Főosztály vezetője, emellett egyetemi docens a Kertészeti és Élelmiszeripari Egyetemen, ahol 1993-tól egyetemi tanár, 1994-1996 között oktatási rektorhelyettes, 1996-1999 között a Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék vezetője volt. 2006 júliusától nyugalmazott egyetemi tanárként, 2009. júliusa óta pedig Professzor Emeritusként vett részt az egyetemi oktató és kutatómunkában.

Iskolateremtő tevékenységét önálló diszciplínák kialakítása és vezetése, a környezetgazdálkodási szakirány programjának kidolgozása és szakirány felelősi működése is fémjelzte. Elindítója volt a környezetgazdálkodási agrármérnök BSc alapszak bevezetésének a Kertészettudományi Karon.

Kezdetől fogva kezdeményezője és támogatója a minőségügy fejlesztésének a felsőoktatásban. Már a Kertészeti és Élelmiszeripari Egyetem keretei között elindította a minőségügyi szemlélet bevezetését, majd a Szent István Egyetem Minőségügyi Bizottságának aktív tagjaként foglalkozott az egyetemi minőségirányítás kialakításával, a Budapesti Corvinus Egyetemen pedig az integráció kezdetével egyidőben megszervezte az Egyetemi Minőségügyi Koordinációs Bizottságot, amelynek elnöki tisztségét több éven át betöltötte, és ilyen módon is igyekezett előmozdítani a teljes körű minőségmenedzsment megvalósítását az egyetemen.

Dr. Vermes László

Budapest, 1936. 03. 20. – Budapest, 2020. 10. 08.

Tudományos habitusa, igényessége és kiváló nemzetközi kapcsolatai révén több nemzetközi szakmai szervezetben vett részt, ezzel is nagymértékben hozzájárult a tanszéki és a kari posztgraduális képzés rendszerének és színvonalának fejlesztéséhez, folyamatos fenntartásához. Aktív kezdeményező tagja volt több európai, ill. a világra kiterjedő tevékenységű szakmai szervezetnek: így a FAO European Cooperative Network on Animal Waste Utilization, a FAO/ECE Working Party on Relations between Agriculture and the Environment, az International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), valamint a United Nation Convention to Combat Desertification and Drought (UNCCD)-nak. Utóbbiban 2002-2008 között koordinátora volt annak a munkának, amelynek eredményeként útmutatót dolgoztak ki a Sivatagosodási Világtalasz újabb kiadásának megszerkesztéséhez, majd 2008-2012 között tagja lett az új világtalasz nemzetközi szerkesztő bizottságának is.

Tagja volt az MTA és más, országos szakmai szervezetek tudományos bizottságainak, szakosztályainak. 1993-tól alapítója és elnöke a Magyar Talajtan Társaság Talajszennyezettségi Szakosztályának. 1996-2000 között részt vett a Környezetvédelmi Minisztérium Hulladékértékelő Bizottságának munkájában.

A nemzetközi szakmai körökben elért sikereknek, valamint a szakterületén felmutatott hazai eredményeinek elismeréseként 2004-ben a Magyar Agrártudományi Egyesület (MAE) jubileumi Emlékérmét, 2008-ban a MAE Aranykoszorús Érmét kapta meg az Egyesület Elnökségétől. A Szent István Egyetem Pro Negotio Universitatis kitüntetésben részesítette a vízgazdálkodás és a környezetgazdálkodás területén elért kimagasló kutató és oktató munkájáért, valamint az oktatásszervezésben elért eredményeiért, iskolateremtő munkásságáért.

Rendszeres oktató munkája mellett részt vett a mezőgazdasági vízgazdálkodás, a melioráció, valamint a vízi környezetvédelem aktuális kérdéseinek megoldását célzó kutató-fejlesztő munkákban. Több mint 10 szakkönyv, ill. egyetemi (főiskolai) jegyzet szerzője (társszerzője) vagy szerkesztője, valamint több mint 200 hazai és külföldi publikációja jelent meg, számos közülük a Hidrológiai Közlönyben.

Az MHT-ban végzett szakmai munkájának elismeréseként Pro Aqua-émlékéremmel, valamint Bogdánfy Ödön-émlékéremmel tüntették ki, és 2011-ben az MHT tiszteleti tagjává választották.

Vermes László professzor személyében nem csak egy kiváló szakembert veszítettünk el, hanem egy olyan személyiséget is, aki tudásával, segítőkészségével mindenben támogatva kollégáit és fáradhatatlanul segítette a hallgatóit.

Emlékét kegyelettel megőrizzük!

*Dr. Kardos Levente
egyetemi docens, tanszékvezető
Szent István Egyetem Agrárkörnyezettani Tanszék*

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

Nekrológ



Életének 92. évében elhunyt dr. Vitális György okleveles geológus (ELTE 1952), egyetemi doktor (SZTE 1961), a földtudományok kandidátusa (MTA 1970).

1952-ben a MÁFI geológusa, 1952–1956 között a Szabó József Geológiai Technikum tanára. 1956-tól a MÉLYÉPTERV geológusa, műszaki ügyintézője. 1962-től a Szilikátipari Központi Kutató Tervező Intézet (SZIKKTI) tudományos főmunkatársa, majd főgeológusa. 1982-től 1993-ig, nyugállományba vonulásáig a MÁFI Adattárának, majd Dokumentációs főosztályának vezetője. 1992–1998 között a budapesti Evangélikus Gimnázium tanára.

Főbb munkaterületei: geológiai tárgyak oktatása, városok és ipartelepek ivó- és ipari vízellátása, völgyzárógátas víztározók földtani előmunkálatai, cement- és mészipari nyersanyagok földtani kutatása, nyersanyagkataszterek és földtani céltérképek szerkesztése, tudománytörténeti kutatások stb.

Munkásságát számos szakmai elismeréssel honorálták, ezek közé tartozik a KHVM 1992. évi Vásárhelyi Pál-díja. Mint termékeny szakíró, 9 könyvet és 230 egyéb írást publikált. Rendszeresen tartott előadásokat a BME-n, az NME-n szakmérnöki kurzusokon, speciális kollégiumokon és mérnöktovábbképző tanfolyamokon.

Az MTA Földtudományok Osztályának munkájában tevékenykedett, a Hidrológiai Tudományos Bizottság tagja volt. Több szakmai egyesület (OMBKE, MKBT, NGU) tisztségviselője, az INHIGEO levelező tagja volt (1991–2002 között). A Magyar Hidrológiai Társaságnak, miként a Magyarhoni Földtani Társulatnak is 1949 óta volt tagja. Társaságunkban számos tisztségét töltött be. A Hidrogeológiai Szakosztály vezetőségének munkájában több cikluson át vett részt. Az MHT Hidrológiai Tájékoztató kiadványának 1961-től alapító szerkesztője 2017-ig. A Hidrológiai Közlöny szerkesztő bizottságának ugyancsak 1961 óta volt tagja. Számítlan külföldi tanulmányút szervezője és vezetője volt.

Társasági kitüntetései: Vásárhelyi Pál emléklap (1962), Pro Aqua emlékérem (1977), Schafarzik Ferenc emlékérem (1986), Tiszteleti tag (1997).

A Magyar Hidrológiai Társaság elmúlt hetven évének meghatározó személyisége volt.

Dr. Vitális György

Budapest, 1929. 10. 03. – Budapest, 2020. 11. 04.

A fenti tárgyilagosan kopogó szavak az MHT kitüntetettjeinek lexikonából származnak. Szinte tömönyszerűen foglalják össze Gyurka bátyánk életének főbb adatait, de nem hozzák közel mindannyiunkhoz azt a színes egyéniséget, a szeretett tudományának élő tudós kollégát, akitől most szomorúan búcsúznunk kell. Jeles geológusokból álló családba érkezett. Nagypapa, Vitális István akadémikus, a hazai szén-telepek kutatásának kiválósága, egyetemi tanár, édesapja, Vitális Sándor szintén egyetemi tanár, Társaságunk legendás elnöke volt, nem is egy alkalommal. Vitális György az a bizonyos alma, amelyik nem esett messze a fájától! Fialat gimnazistaként, már a háború utáni első hetekben segített apjának a MFT Hidrológiai Szakosztálya megmaradt tagjainak felkutatásában, a kapcsolat újbóli megteremtésében, a meghívók kipoztázásában. No, nem a hivatalos posta útján, hanem hol gyalog, hol villamossal a megadott címre történő személyes kézbesítéssel. Talán az utolsó élő szemtanúként ott volt azon a nevezetes 1949. január 26-iki közgyűlésen, ahol a Hidrológiai Szakosztály tagjaiból – a MTESZ keretén belül – megalakult a Magyar Hidrológiai Társaság. Hosszú élete során végigkövethette a Társaság hét évtizedének történéseit, szerencsésebb és nehezebb korszakainak változásait.

Addigi tudományos és társasági munkájának elismerése volt, amikor dr. Papp Ferenc műegyetemi tanár, az MHT elnöke megbízta, szerkesszen egy olyan folyóiratot, amely a Társaság tagjainak publikációi mellett az MHT életének eseményeiről is hírt ad abban a világban, amikor még nem létezett digitális folyóirat, honlap és internet. Ez volt az 1961-ben útjára indított Hidrológiai Tájékoztató, amelynek 56 éven keresztül felelős szerkesztője volt. Amikor Társaságunk egy másik elnökével, Juhász József mérnökgeológus professzorral életút-interjút készítettek a Duna Múzeum munkatársai, akkor az interjúban elhangzott néhány név, mint akik úgy ismerik az ország területét, hogy bárhol utazzanak, meg tudják mondani annak a vidéknek geológiai állapot-jellemzőit, köztük volt Vitális György neve is. Persze ez a páratlanul komoly tudás nem volt véletlen, hiszen Vitális György a MÁFI adattárának vezetőjeként szinte minden felvétellel, térképpel találkozott, s mindezek mellett rengeteget kirándult, tanulmányutakat szervezett ezerte az országban és a határokon túl is.

Az adatok rendezése, rendszerezése nem csupán tudományos munkásságát jellemezte, hasonló rendet tartott népes családjának fényképei között is. Hatalmas albumokban, kronológiai sorrendben követték egymást a fotók, gyerekekről, unokákról, dédunokákról, de nemcsak úgy átabotában, hanem pontosan feliratozva, hol, mikor és milyen alkalommal készültek a felvételek.

Az utóbbi évtizedekben nagyon felgyorsult az idő. A Gyurka bátyánk által követett és megkövetelt rendet ma már a számítógépek logikusan épített memóriája segíti a hidrológusnak, mérnöknek, geológusnak, hidrobiológusnak egyaránt. De, bármennyire is természetesnek tűnik mindez számunkra, az ide vezető tudomány lépcsőfokait olyan tudósok és szakemberek faragták ki számunkra, mint dr. Vitális György!

Emlékét kegyelettel megőrizzük!

*Dr. Szlávik Lajos
a Magyar Hidrológiai Társaság elnöke*

Nekrológ



A világvárvány ránk zúduló híreit halványította el 2020 decemberében Kindler professzor halálhíre. A 86 évesen elhunyt Janusz Kindler hazáján kívül szerte a világban, így Magyarországon is ismert, sőt nagyra becsült vízügyi szakember volt, akit sokan az integrált vízgazdálkodás egyik apostolának tartanak.

Milyen pályát futott be Janusz, akit magyar barátai és tisztelői keresztnevével szólíthattak, és ha éppen távollétében említették így, mindenki egyértelműen őra gondolt. Janusz értelmiségi családba született. Édesapját korán elvesztette, így édesanyjára dupla teher nehezedett a családi és a szakmai feladatok ellátásával. A tehetséges diák a Tadeusz Reytan középiskola elvégzése után a Varsói Műszaki Egyetemen folytatta tanulmányait, ahol 1956-ban vízépítőmérnöki oklevelet, 1974-ben PhD fokozatot szerzett, majd ugyanitt a tudományok doktora címet érdemelte ki 1988-ban.

Tudományos pályáját gyakorlati területen alapozta meg a Hydroproject mérnökeként 1956–1968 között. Erre az időre esik részvétele az iraki Alsó-Tigris-medencében folytatott mezőgazdasági fejlesztési tanulmányokban. 1968-1972 között a Visztula Iroda igazgatója, a folyóvíz átfogó fejlesztési programját irányítva egy ENSZ projekt keretében. A Lengyel Tudományos Akadémia Vízügyi Bizottságának tagja 1972-ben lett, és ebben az évben vezet útja a Varsói Műszaki Egyetemre. Innen delegálja 1976-ban a Lengyel Tudományos Akadémia az ausztriai székhelyű IIASA-ba (International Institute for Applied Systems Analysis). Itt többek között a hidrológiai, majd a víz- és környezeti program vezetője, kiváló nyelvtudását és diplomáciai képességét is hasznosítva számottevően járul hozzá a térségre vonatkozó környezeti politika kialakításához. Ennek is folyománya, hogy később a magyarországi székhelyű Regional Environmental Center kuratóriumának első elnöke lesz.

1983-ban tér vissza az egyetemre, ahol a Környezetmérnöki Intézet igazgató-helyettese, majd 1990-től igazgatója lesz. Más kontinensek is igénylik szaktudását: az 1980-as évek végén a UNEP felkérésére tanácsadóként vesz részt az afrikai Csád-tó partjára vonatkozó általános szabályozási terv kidolgozásában. Közéleti szerepet is vállal, résztvevője a rendszerváltást megelőző kerekasztal tárgyalásoknak ha-

Prof. Dr. Janusz Kindler

Varsó, 1934. 05. 09. – Varsó, 2020. 12. 08.

zájában. 1992-1996 között a Világbank tart igényt szakértelmére. Az Aral-tó ökoszisztémájának védelmében öt közép-ázsiai állam szakértőivel dolgozik együtt ezekben az években. Közben, ha csak teheti, vissza-visszatér Varsóba, előadásokat tartani, konzultálni. Professzori címet 1998-ban kap, majd a Környezetmérnöki Kar dékánja lesz 1999-2002 között. Tudását Varsón kívül is számos egyetemen osztotta meg önzetlenül a hallgatókkal (pl. Kiotó, Lund, Budapest, Brüsszel, Prága, Perugia, Wageningen).

1993–1997 között Janusz Kindler az elnöke a Nemzetközi Tudományos Szövetség (ICSU) Vízügyi Bizottságának (SCOWAR), ahol a már akkor érződő vízválságra adandó tudományos válaszok formálódnak. Hasonló okok vezetik 1996-tól a Global Water Partnership (GWP) Technikai Tanácsadó Bizottságába. Társ szerzője a GWP híres 4-es számú kiadványának az integrált vízgazdálkodásról, majd kulcsszerepe van abban, hogy a világszervezet Közép- és Kelet-Európában is régiót alapít, melynek elnöke lesz. Elkötelezett híve Európának, 2000-ben a hágai Víz Világfórumon emlékezetes párost alkot Somlyódy professzorral, amikor régióink sorsáról és vízügyi jövőképeiről folytatnak párbeszédet az akkor alakuló Víz Keretirányelv (VKI) és a még csak remélt EU csatlakozás összefüggésében.

A Varsói Műszaki Egyetem emeritus professzoraként is az EU Víz Keretirányelv alkalmazásával foglalkozik, s többek között részt vesz Lengyelország éghajlat-változáshoz való alkalmazkodási stratégiájának kidolgozásában. A magyar kapcsolatok sem szakadnak meg, 2015-ben Ijjas István professzorral közösen írják a VKI és az integrált vízgazdálkodás viszonyát elemző kiadványukat a GWP felkérésére.

Janusz Kindler számos nemzetközi tudományos szervezet tagja volt (IAHS, IAHR, IWRA, IWA). Mintegy 130 kutatási tanulmány, cikk és publikáció fűződik nevéhez, amelyek a vízgazdálkodás, valamint a különböző környezeti kérdések témakörét ölelik fel. 2000-ben elnyerte az IWRA nemzetközi Chow Memorial Endowed Lecturer díját „a víz- és környezetgazdálkodás terén a világban végzett kiemelkedő tevékenysége és a vízügyi szervezetekben, hosszú évekig végzett elkötelezett szolgálata elismeréseként”.

Kollégái, tanítványai melegszívű, intelligens és rendkívül elfoglalt embernek ismerték, aki minden nehézség ellenére örök életében elkötelezett maradt a tudomány és a környezeti ügyek iránt. Idős korában is aktív maradt, szeretett kocogni, síelni, szörfözni, teniszezni. A hegyek szerelmese volt, kedvenc Tátrájában sok időt töltött. Tudott másokra odafigyelni, bölcs tanácsokkal segíteni, nem véletlenül volt oly sok barátja, feleségével Joannával mindenkit szívesen fogadott otthonukban.

A Magyar Hidrológiai Társaság 2001-ben külföldi tiszteleti tag címet adományozott részére.

Emlékét kegyelettel megőrizzük.

*Dr. Gayer József
a Hidrológiai Közlöny Szerkesztőbizottságának tagja*

In memoriam VITUKI

B. Kemény Gábor közmunka- és közlekedésügyi miniszter 1007/1886 számú rendelete alapján a minisztérium szervezetének részeként 1886. május 1-jén megkezdte munkáját a Vízirajzi Osztály, amelynek – többszöri szervezeti átalakulást követően – jogutódja lett 1952-ben a 2049/16/1952 számú Minisztertanácsi határozattal létrehozott Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet, a később világszerte elismert VITUKI.

Alig néhány hónappal alapításának 60., illetve jogelődjeit is figyelembe véve alapításának 126. évfordulója után – a méltán világhírű kutatóintézet, melynek nemzetközi mércével mérve is jelentős eredményeit könyvtárakat

megtöltő mennyiségű dokumentum őrzi – a tulajdonos Magyar Állam nevében hozott, a mai napig nehezen érthető döntés alapján 2012. novemberében be kellett fejeznie működését. Ekkorra már lényegében az utolsó munkatársakat is elbocsátották, eszközeit, tudományos, szakmai és gazdasági dokumentumait különböző intézményekbe elszállították. Ezt követően a Budapest, IX. ker. Kvassay Jenő út 1. szám alatti VITUKI központi telephely hosszú évekig tartó fokozatos leépülés helyszíne volt, melynek tragikus befejezése volt, amikor 2020. december 10-én, az ikonikus toronyház felrobbantásával, fizikailag is végleg megsemmisült a kutatóintézet utolsó épülete is.



A Mühlbacher István és Demény Tamás által tervezett, s 1976-ban átadott toronyház a VITUKI központi telephelyén (Budapest, IX. ker. Kvassay Jenő út 1.)



A tragikus pillanat. A VITUKI fizikai megsemmisítése 2020. december 10-én a toronyépület ledöntésével fejeződött be.

Azok, akik dolgoztunk a VITUKI-ban, illetve kötődünk e nagyszerű intézethez, emlékéket kegyelettel megőrizzük!

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

Hogyan lehet előfizetni a Hidrológiai Közlönyt?

Előfizethető a lap:

1) A Magyar Hidrológiai Társaság internetes honlapján található megrendelőlap kitöltésével.
http://www.hidrologia.hu/mht/index.php?option=com_jellap15&Itemid=209

2) Az alábbi megrendelőlap kitöltésével, majd postán vagy emailben történő visszaküldésével is megrendelhető a Hidrológiai Közlöny.

Magyar Hidrológiai Társaság
 1091 Budapest, Üllői út 25.
 Tel: (1)201-7655
 E-mail cím: hk@hidrologia.hu

Előfizetési díjak 2021-ben:

Cégeknek:

A 2021. évi (101. évfolyam) 1-4. száma: 9 600 Ft/év
 A 2021. évi különszám a vízkonfliktusokról: 2 400 Ft/db.

A Magyar Hidrológiai Társaság egyéni tagjainak:

A 2021. évi (101. évfolyam) 1-4. száma: 4 000 Ft/év
 A 2021. évi különszám a vízkonfliktusokról: 1 000 Ft/db

Az árak az 5 % áfát tartalmazzák!

MEGRENDELŐ LAP

A jelen lap kitöltése megrendelésnek minősül, melyről e-mailben küldünk visszaigazolást.

Alulírott megrendelem a Hidrológiai Közlöny c. folyóirat

2021. évi 1-4. számait példányban,

2021. évi különszámát példányban,

és kérem megrendelésemet a következő évekre is folyamatosnak tekinteni.

Név vagy cégnév:

Céges megrendelés esetén kapcsolattartó neve:

Telefonszáma:

E-mail-címe:

A számlát kérem küldjék az alábbi címre:

A folyóiratot kérem az alábbi címre postázni, amennyiben eltér a számlázási címtől:

Megrendelés száma (nem kötelező mező):

Megrendelési szám esetén – amennyiben elektronikusan küldik be a megrendelést - az aláírt megrendelés csatolása pdf formátumban kötelező.

Kelt: _____, 2021. _____ hó. _____ nap.