

FOLYÓ HORDALÉKVISZONYAINAK VIZSGÁLATA KÉPALAPÚ ELJÁRÁSOKKAL

Ermilov Alexander Anatol és Baranya Sándor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar,
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

KIVONAT

A folyó medre és áramlása között folyamatos kölcsönhatás áll fenn. A meder ellenállásként jelenik meg az áramlás számára, utóbbi pedig képes elszállítani és máshol deponálni a medret alkotó hordalékot. Az áramlás tulajdonságainak feltérképezésére már rendelkezésre állnak kellően részletes, innovatív és gyors eljárások (pl. ADCP műszer), ugyanez nem mondható el azonban a mederhordalék (mederanyag) valamint görgetett hordalék esetében. A tradicionális mintázási eljárások energia- valamint időigényesek, csak pontbeli információt biztosítanak és azt is bizonytalansággal terhelve. Kutatásunk során újszerű, képalapú mérési eljárásokat alkalmazunk a mederanyag és görgetett hordalék vizsgálatára, melyek alkalmasak lehetnek a bevett módszerek helyettesítésére és a folyók hidromorfológiai állapotának részletesebb feltárására. Ezen konferencia cikkben, terepen és laboratóriumban végzett méréseink és fejlesztéseink eredményeit mutatjuk be röviden.

KULCSSZAVAK: folyók, hidromorfológia, mederanyag, görgetett hordalék, méréstechnológia, képfeldolgozás, mesterséges intelligencia

BEVEZETÉS

A számítástechnika rohamszerű fejlődésével (Moore-törvény; Moore, 1965; Burg és Ausubel, 2021), napjainkban egyre elterjedtebbek az ún. gépi látásra épülő, képfeldolgozó-, képelemző algoritmusok a mérnöki szakterületeken. Ezek az eljárások magukban hordozzák az automatizálás lehetőségét, így, hála a növekvő számítási kapacitásoknak, korábban idő- és energiaigényes munkafolyamatokat vagyunk képesek kiváltani ipari és kutatási célokkal. Mindemellett, sokkal részletesebb vizsgálatok elvégzésre is utat nyithatnak. Az eljárások fejlődésével azonban a bemenő (feldolgozandó) adatmennyiség is növekszik.

Jelen cikk célkitűzése ezen eljárások vízmérnöki szakterületen történő hasznosíthatóságának, valamint a bennük rejlő potenciálnak a bemutatása. Kutatásunk során rámutatunk, hogyan adaptálhatók alluviális folyók hidromorfológiai vizsgálatára, amikor is a vízfolyás áramlása és a meder közötti kölcsönhatást kívánjuk feltárni, előre jelezni. Előbbi, a hordalékszállító képessége miatt hol építeni, hol rombolni igyekszik a medret, míg az utóbbi, hidraulikai ellenállást fejt ki és befolyásolja az áramlást. Ezen oda-vissza hatás több paraméteren keresztül is jelentkezik, s gyakorlati jelentősége nagy. Hajózás, vízi szállítmányozás (DanubeSediment, 2019), illetve vízépítési beavatkozások szempontjából a mederváltozás kérdése igencsak mérvadó (Rátky I. és Rátky É., 2012; Török et al., 2014). Vízenenergia-termelés esetén, a tározási tér alakulására a hordaléktranszporton keresztül nyerhetünk választ (Healey et al. 2015) míg árvízi kockázat-kezelésnél a mederalak is meghatározó tényező az árhullám levonulását tekintve (FEMA, 2016). Partiszűrészű ivóvízbázisoknál a porozitás, rétegződés, áteresztőképesség, mederpáncélozódás, szemcseméretetek mind a termelést és a szolgáltatást (pl. Budapest ivóvízellátása) befolyásoló jellemzők (Rákóczi, 1997). Ugyanakkor, a folyók medre, a mederfelszín, természetes állapotában változatos élővilágnak ad otthont (Füstös et al., 2019), az ún. bentikus élőlényeknek, melyek a folyami ökológiai rendszerekben fontos szerepet töltenek be (Covich et al., 1999). Ezen pontok figyelembevételével belátható, hogy a folyó mederanyag összetételének vizsgálata és ismerete igen fontos tényező. Ennek ellenére a tradicionális mérési eljárások idő- és költségigényesek (Soloy et al., 2020), valamint mérési bizonytalanságot

is hordoznak magukban. További probléma, hogy a minták nem mindig biztosítanak kellő minőségű és mennyiségű információt. Átmeneti jellegű folyószakaszokon (pl. a Duna magyarországi felsőszakasza; Török, 2018), ahol a mederanyag igen vegyes szemösszetételű, időben és térben erős változékonyságot mutat, a megfelelő mintavételi pontok és azok számának meghatározása kihívást jelent (Rice és Church, 1998; USDA, 2007). A már megvett minták esetében a reprezentatív minta kérdése is felvetül. Vizsgálatok alapján a minták egyenként 10-100 kg tömeget kell, hogy elérjenek különböző statisztikai feltételek teljesítéséhez (Adams, 1979). Legutolsó sorban pedig megemlíjtjük, hogy a meder bizonyos hidromorfológiai paraméterei (pl. mederfelszín érdessége, vagy a mederformák) nem mérhetők a hagyományos eljárásokkal, így jelenleg ezekre is empirikus becsléseket alkalmazunk.

A mederanyagon kívül, a mozgásban lévő hordalékkal, azon belül is a mederfenéken ugráló, csúszó illetve gördülő mozgást végző, ún. görgetett hordalékkal is foglalkozunk a kutatás keretében. Ugyanis, az alluviális folyók morfordinamikájáról a kialakult hordalék-háztartásuk vizsgálatával nyerhetünk átfogó képet. A folyón végzett emberi beavatkozások azonban felborítják ezt a háztartást és megszakítják a hordalékszállítás folytonosságát. Ez történt a Duna esetében is. Az elmúlt évtizedek nagyfokú vízepítési munkálatainak köszönhetően a Duna által szállított hordalék a korábbi, évi 40-60 millió tonnáról 15-20 millió tonnára csökkent (Habersack et al., 2019). Ebben leginkább a megépült vízlépcsők játszanak szerepet, melyek gátat szabnak a hordalék vándorlásának és a felvízi szakaszukon lerakódásra kényszerítik azt (Kondolf et al., 2014). Így azonban a vízlépcsők alvízi szakaszán hordalékhiány alakul ki. Ez utóbbi a Duna hazai szakaszán jelenetős mértékben kiütözik. Itt ugyanis a folyó szabad folyású (nem épültek ki rajta vízlépcsők), ezért ezen a szakaszon igyekszik pótolni a hordalék-háztartási hiányt, visszaállítani az egyensúlyt. Eredményképpen az utóbbi 60 év alatt a Duna medre átlagosan 2 m-t (Dunaföldvárnál 5 m-t) süllyedt hazánk területén (Habersack et al., 2019). A folyamat magával vonzza a talajvíz fokozatos süllyedését is, mely az érintett területek kiszáradásához vezethet, károsan befolyásolva az ott fellelhető ártéri élővilágot, a mezőgazdaságot és a partiszűrészű ivóvízbázisokat. A morfordinamikai vizsgálatok során a görgetett hordalék mérése jelenti a szakemberek számára a legnagyobb kihívást. Ismerete azonban elengedhetetlen a folyamatok megértéséhez. A mederanyagnál ismertetett korlátosságok itt is érvényesülnek (munkaigényesség, reprezentativitás; Bogárdi, 1971, Rákóczi és Szekeres, 2003), emellett azonban jóval nagyobb hibák terhelik, melyek erednek egyrészt a görgetett hordaléktranszport jellegéből (Einstein, 1950; Csoma és Szigyártó, 1975), másrészt a mintavevők hibájából (pl. elfordulás, felfekvés, mederbe marás). Ezen hibák számszerűsítése és kiszűrése a bevett mintavételi módszerek esetében nehézségekbe ütközik (Camenen et al., 2012).

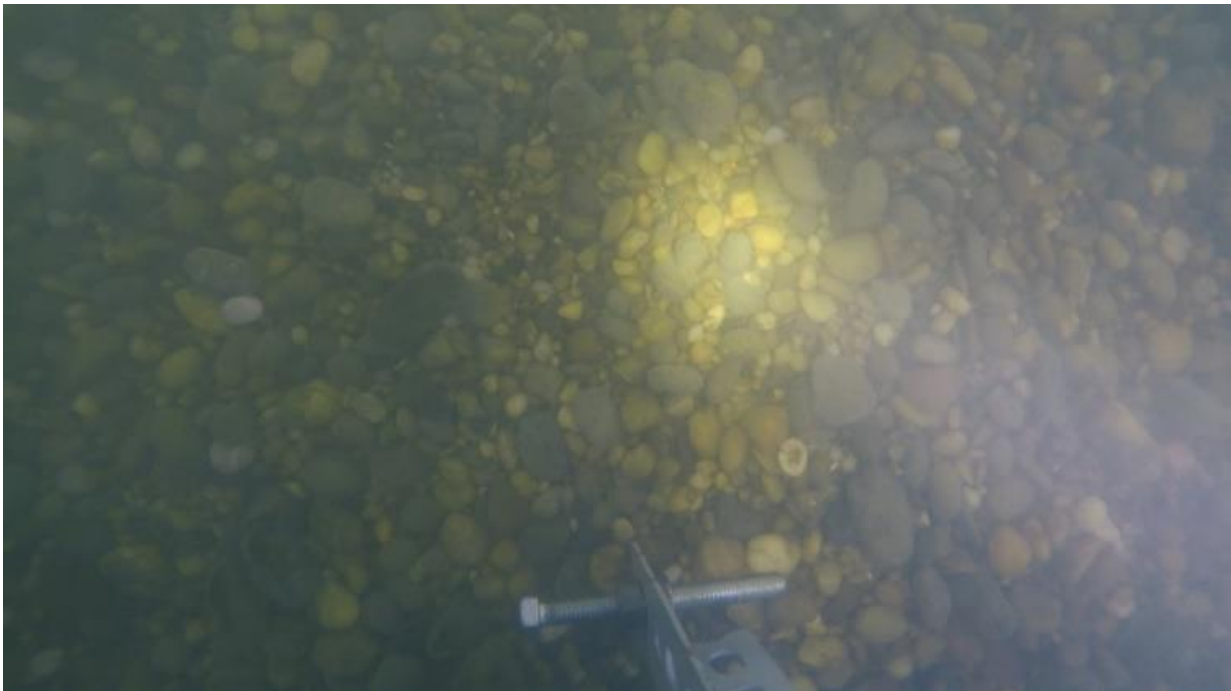
A fent említett nehézségek a nemzetközi kutató közösséget új, helyettesítő mérési eljárások fejlesztésére ösztönözik, melyekkel a fennálló hiányosságokat pótolni lehet. Az egyik fő megközelítés a gépi látás és képfeldolgozás alkalmazásán alapszik, s jelen kutatásunkban mi is ezt képviseljük. A kutatás folyamatos és születtek is már új módszerek ezen a területen (pl.: Pokrajac et al., 2009; Detert et al., 2012; Buscombe, 2013; Conevski et al., 2019; Fleit et al., 2019; Ermilov et al., 2020a), de nem sikerült áttörő, minden tekintetben kielégítő megoldást találniuk. Ezen cikkben a legújabb fejlesztéseinket és eredményeinket kívánjuk bemutatni a témában, melyek a kutatási irány következő lépcsőfokát képviselik.

KUTATÁS ÉS EREDMÉNYEK

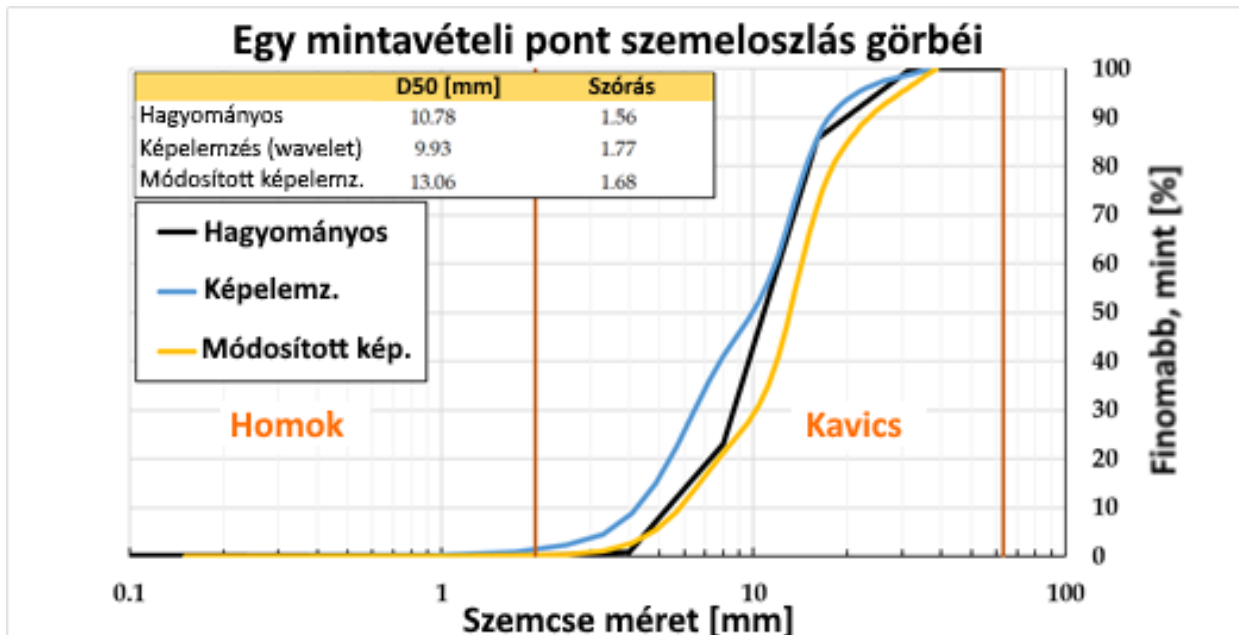
Mederanyag

Szemösszetétel

A mintavételi helyeken a vízalatti mederfelvételekből kinyertünk képeket, melyeken az adott pontban található mederanyag szerepelt (1. fénykép). Ezeket a képeket Buscombe (2013), hordalékvizsgálatokra fejlesztett transferable wavelet képfeldolgozó módszerével elemeztük. Az évek alatt, hordalékokra kifejlesztett képelemző eljárások közül ez bizonyult a legígéretesebbnek (Buscombe, 2013, 2020). Az algoritmus a kép pixel (képpont) sorait és oszlopait egyenként, összefüggő jelként érzékeli (a szürkeségi, avagy pixel intenzitás érték változását követi le), majd ezeket a jeleket az ismert Fourier-transzformáció helyett, az újabb keletű wavelet-transzformáció segítségével alkotóelemeire bontja, majd spektrumanalízis után meghatározza a teljes képen értelmezett eloszlásukat. Az alapfeltételezés az, hogy a hordalékszemcsék határán, a képeken jelentősebb intenzitás változás következik be, így analógia vonható az alkotó waveletek és a hordalékszemcsék mérete között. A módszert mi is teszteltük egy külön tanulmányunkban (Ermilov et al., 2020b), ahol valóban ígéretes eredményeket nyújtott dunai környezetben. Hátránya viszont az, hogy matematikai, alsó felbontási korláttal rendelkezik, melynek értéke 3 pixel (hiszen 3 adatnál kevesebbre nem lehet egyértelműen waveletet illeszteni). Ez gyakorlati tapasztalataink alapján általában a durva homok, illetve finom kavics mérettartományt jelentette. Tehát, ennél finomabb, kisebb hordalékszemcsék érzékelésére nem, avagy hibásan képes, torzítva az eredményül kapott szemeloszlási görbét. Azonban, ha ilyen frakciók nem jelentek meg a mederben, akkor ígéretes eredményt adott az eljárás (1. ábra).



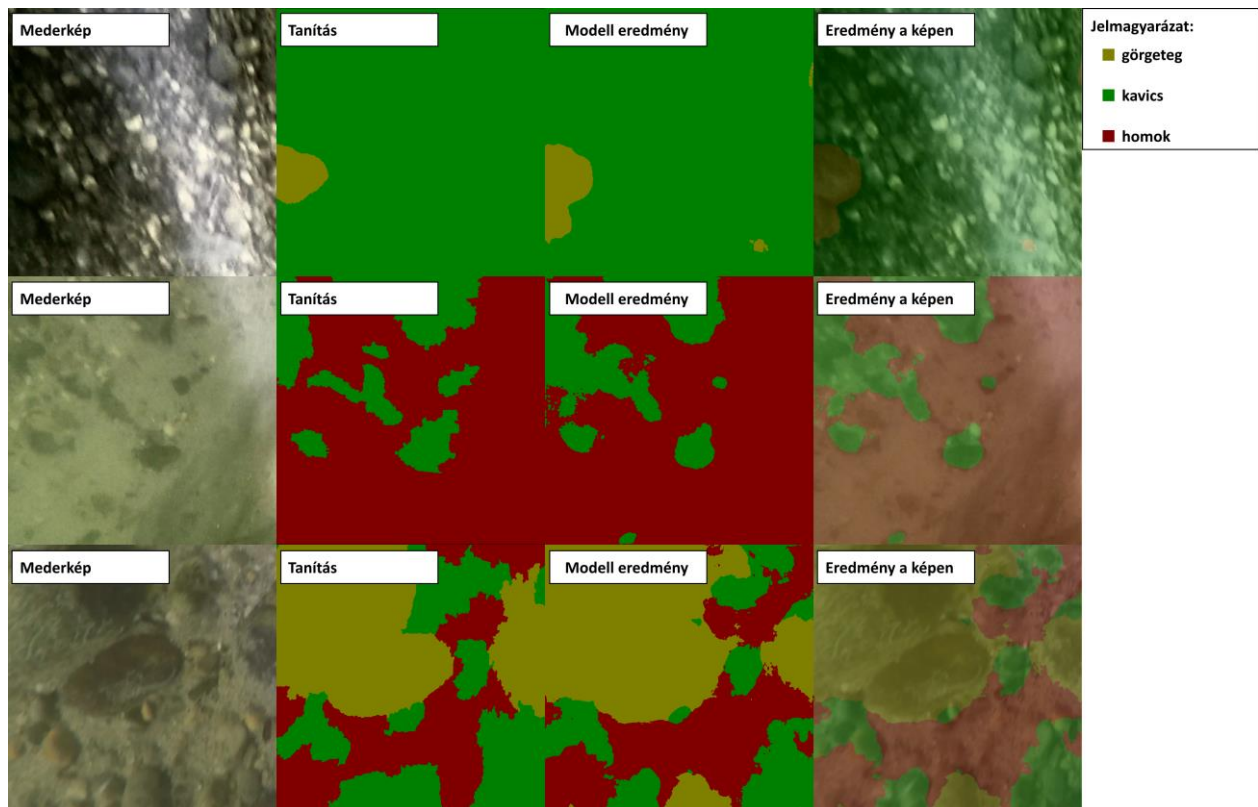
1. fénykép: Példa egy mintavételi pont medervideóból kinyert képére.



1. ábra. A példaként hozott mintavételi pont hagyományos (fekete), valamint képalapú (wavelet; kék) szemeloszlás görbéje. Sárgával a képalapú eredmény transzformált változatát ábrázoltuk, melyre itt nem térünk ki részletesebben. (Ermilov et al., 2020b)

A fentiek miatt azonban a továbbiakban csak validációs és közelítő célokra alkalmaztuk a transferable wavelet módszert.

A kutatás fő lépéseként, a mederveidők alapján sikeresen felépítettünk egy Mélytanuló (Deep Learning; Sarker, 2021) Mesterséges Intelligenciát a homok, kavics és görgeteg hordalék frakciók képeken történő felismerésére és lehatárolására. A tanítás sikerességének kiértékelésekor ígéretes mutatókat kaptunk. A 2. ábra 3 mederképkocka esetén szemlélteti az algoritmusnak megtanított (ember általi) lehatárolásokat és kategóriákat (frakciókat), majd a Mélytanuló modell alapján készített eredményt. Végül pedig az eredményt az eredeti képre vetítettük a szemléletesség kedvéért. Eredményképpen, minden képkockára ki tudtuk ezután számolni a hordalék kategóriák százalékos arányát, így jellemezve a kép helyén uralkodó mederanyag viszonyokat.

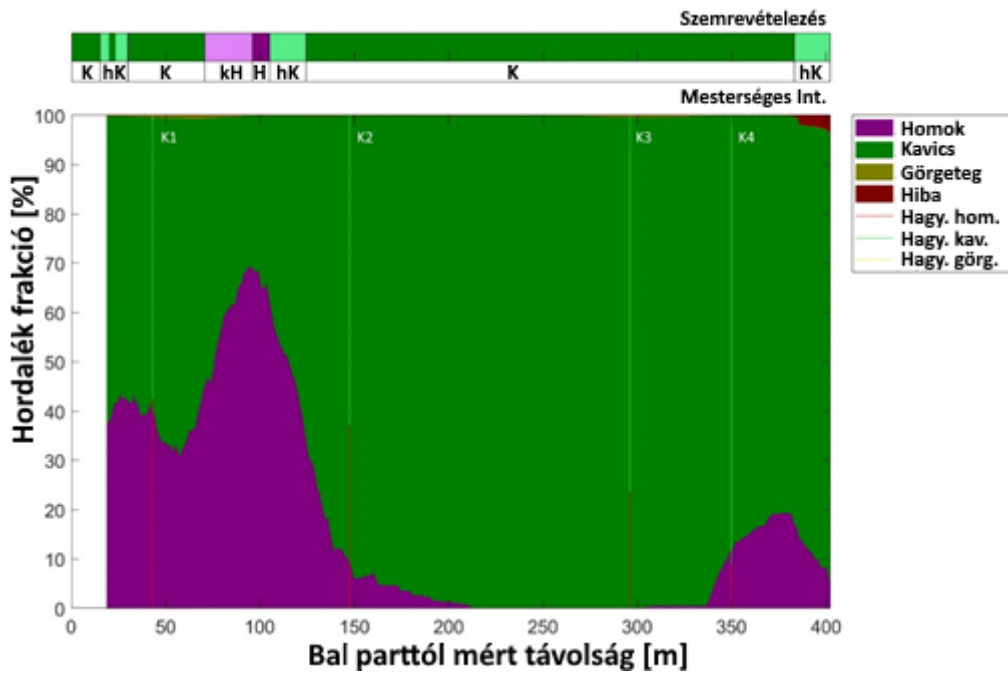


2. ábra. A Mesterséges Intelligencia eredménye az ember által betanított lehatárolásokhoz képest. Sárgával a görgetegek, zölddel a kavicsok, míg pirossal a homok részek/frakciók láthatók.

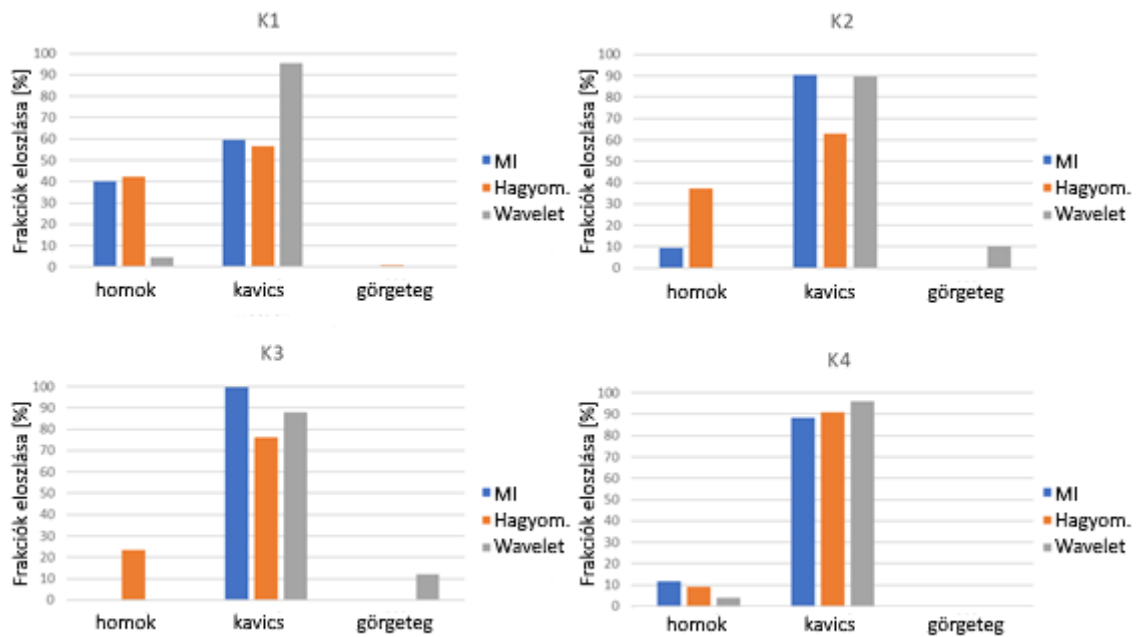
Az algoritmus kielégítően teljesített független, tanítása során nem látott videókra is. Az eredmények hitelességét a mérési pontok fölött a már említett hagyományos minták, valamint a wavelet módszer eredményeivel validáltuk. Mivel a Mesterséges Intelligencia algoritmus lehetővé tette, hogy a videózott mederszelvényt rendkívül sűrű lépésközökkel jellemezzük (ellentétben a hagyományos módszerekkel), keresnünk kellett olyan kiértékelési módot, ami a pár darab mintavételi ponton kívül is, azaz teljes hosszában leírja teljesítményét. Ezt végül a videók szemrevételezésével, és az azokon látszó jellemző hordalék kategória szemre történő meghatározásával értük el. Így ellenőrizni tudtuk, hogy a Mesterséges Intelligencia is azt látja-e a felvételeken, amit az emberi szem. A 3. ábra a mérőhajó egyik szelvényben megtett útját mutatja be. A videó szemrevételezése után, különböző színekkel lehatároltuk emberi észlelés alapján a jellemző hordaléktípust a mederszakaszokon. Ez szerepel a 4. ábra felső részén is, míg alatta a Mesterséges Intelligencia által meghatározott, hordalék kategóriák százalékos eloszlását láthatjuk a szelvény mentén. Az eredmények alapján mind hosszmentén (4. ábra), mind a mintavételi pontokban (5. ábra) igen kielégítő eredményeket kaptunk. Vizsgálataink és fejlesztéseink további részletei, valamint eredményei jelenleg benyújtás alatt állnak, egy külföldi folyóiratba.



3. ábra. A mérőhajó útvonala egy példa szelvényben, beszínezve a szemrevételezés alapján jellemző mederanyag frakció szakaszokkal. A bal part a kép bal oldalán látható. A sárga jelölők a mintavételi pontokat jelölik.



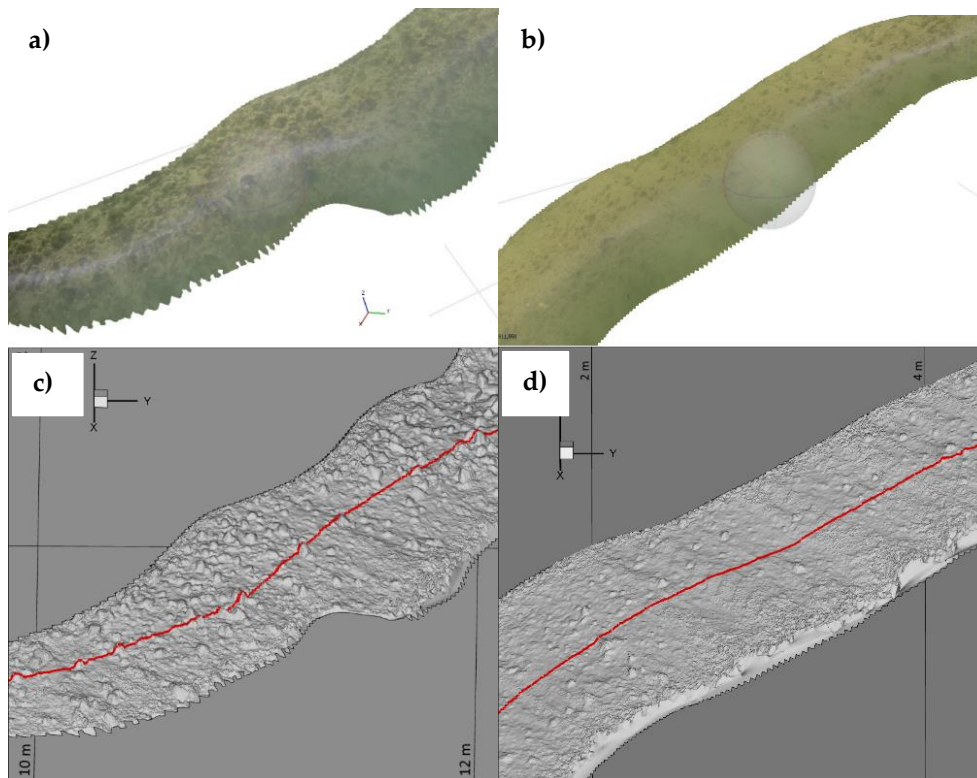
4. ábra. Felül a példa szelvény szemrevételezés alapján lehatárolt mederrészeinek kiterjedését és jellemző hordalék frakcióját ábrázoltuk (K – kavics, hK – homokos kavics, kH – kavicsos homok, H - homok). Alul a Mesterséges Intelligencia által felismert, szelvénymenti frakció eloszlások láthatók. A mintavételi pontok hagyományos eljárással kapott eloszlásait a helyükön ábrázolt függőlegesek szemléltetik.



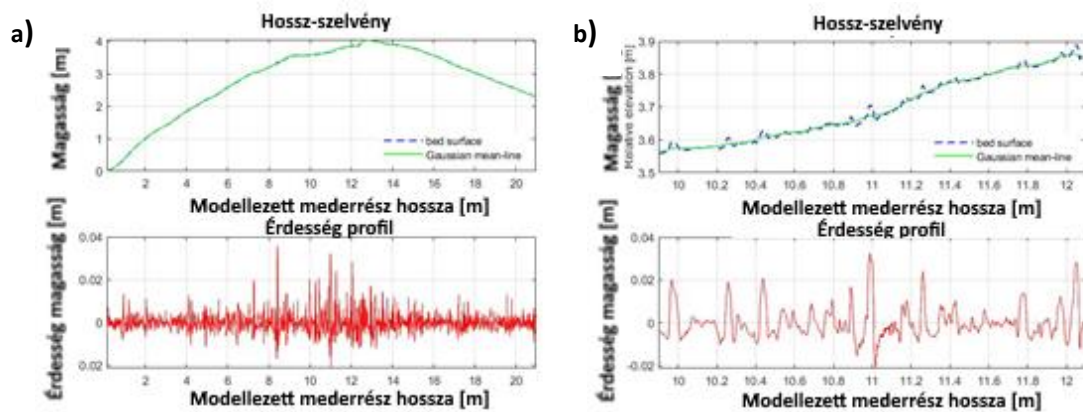
5. ábra. A különböző módokon meghatározott mederanyag frakciók eloszlásának összehasonlítása a példa szelvény mintavételi pontjaiban. Kékkel a Mesterséges Intelligencia, narancssárgával a hagyományos mintavétel, míg szürkével a wavelet módszer eredményei szerepelnek. Ezutóbbi a már említett korlát miatt kevésbé érzékelt a finomabb frakciót.

Mederérdesség és digitális medermodell

A készített mederveideókat másképp is hasznosítani tudtuk. A térinformatikában igencsak ismert, ún. Structure-from-Motion (SfM; Micheletti et al., 2015) eljárást alkalmazva, egy tárgy három-dimenziós modellje előállítható több, más-más szemszögből készített, de egymással átlapoló kép felhasználásával. A kamera a medret alkotó hordalékszemcséket elhaladása során több szögből is rögzítette, így az SfM eljárással le tudtuk képezni a feltárt mederszakaszok, hordalékszemcse-léptékű 3-D modelljét, melyből részleteket a 6. ábra mutat. A mérésről és módszerekről bővebben az Ermilov et al., (2020b) cikkben értekezünk. Az így kapott mederfelszín modellt, felületi érdesség számítására kívántuk felhasználni. Ehhez, egy a gépészmérnöki szakterületen alkalmazott megközelítést alkalmaztunk, ahol a felületet szinusz- és koszinusz-hullámokra bontjuk (Tavares, 2005; Doi et al., 2012). A nagy frekvenciájú hullámkomponensek képezik a felület *érdességét*, a közepes frekvenciák a felület *hullámosságát*, míg az alacsony frekvenciák az *alakot* jellemzik. Kutatásunkban csak a magas frekvenciákkal, azaz esetünkben a mederfelszín érdességével (mint hidromorfológiai paraméter) foglalkoztunk. Meg kell azonban említeni, hogy elméleti szinten így lehetséges a mederformák (közép-frekvencia), illetve mederalak (alacsony-frekvencia) kivonása is egy ilyen jellegű felmérésből. A határ frekvenciák megválasztását a gépészmérnöki szabványokból kiindulva választottuk meg. Az alkalmazott módszer ígéretes módon, jól visszaadta a láthatóan simább, finomabb frakciójú (6. b, d ábra; 7. a, ábra 0 – 8 m illetve 14 – 22 m közötti szakaszai) és a durvább, nagyobb szemcséjű (6. a, c ábra; 7. b, ábra) szakaszok közötti különbséget az érdesség profil számításánál. A simább homok frakcióknál 2 mm-nél kisebb, míg a kavicsosabb részekben 3-4 mm és afölötti érdesség értékek adódtak.



6. ábra. Egy felmért mederszakasz folytatólagosan összefűzött képkockái (a,b) és azok előállított 3-D modelljei (c,d). A medermodellt hosszmentén, középen elmetstettük (pirossal) és az érdességanalízist ennek mentén végeztük el. Baloldalon egy érdesebb, kavicsosabb részlet, míg jobboldalon finomabb, homokosabb terület látható.

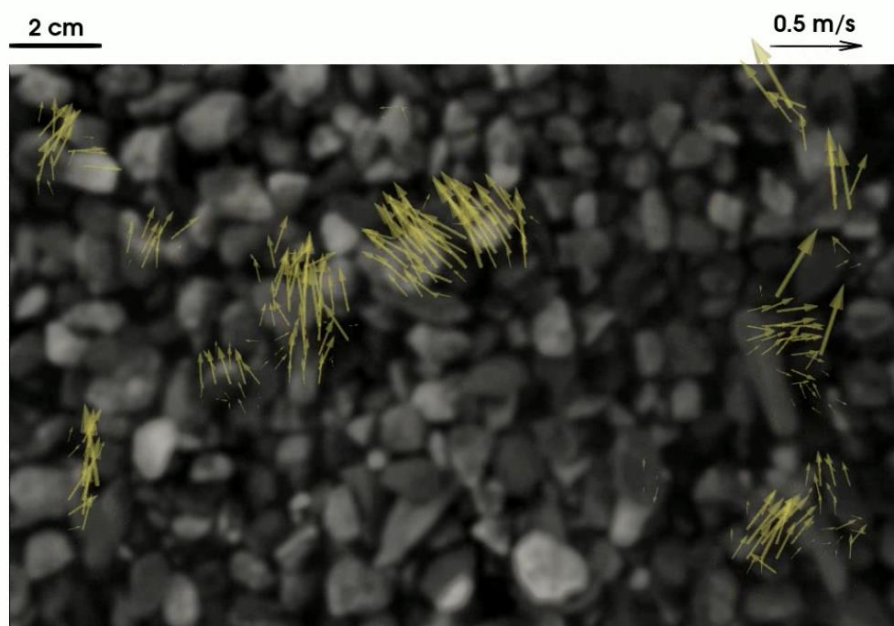


7. ábra. Baloldalon egy 22 m hosszú szakasz hossz-szelvénye, illetve a számított (magas frekvenciájú komponensek) mederérdesség profilja látható. Jobboldalon egy, a szelvény közepéből kiemelt részletet mutatunk be, mely a 6. ábra kavicsosabb részletéhez tartozik.

Görgetett hordalék

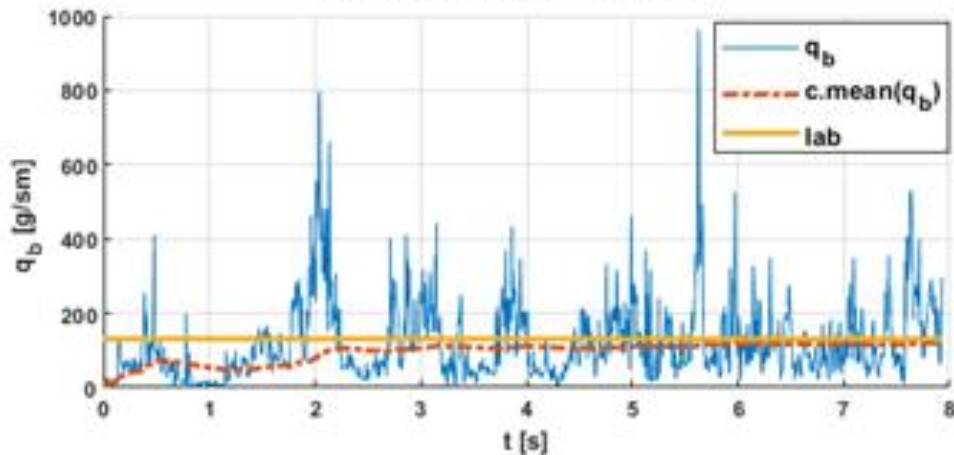
Görgetett hordalékhozam

A kutatás idevonatkozó része egy nemzetközi együttműködés keretében született, részleteit és messzebb menő eredményeit az Ermilov et al., (nyomtatás alatt) angolnyelvű cikk tartalmazza. Egy laboratóriumi, kavics medrű üvegcsatornában áramlási- és görgetett hordalék vizsgálatokat végeztek. A hordalékhozam mérése hagyományos, csapdázó eljárással, valamint akusztikus méréssel került meghatározásra (Conevski et al., 2020). Eközben, egy vízalatti kamera rögzítette a hordalék mozgását a csatorna közepén, felülről. Az így készült felvételekre egy képelemző algoritmust fejlesztettünk, mely képes megbecsülni az áramló hordalék szemcsék méretét, tömegét, valamint magát a hordalékhozamot. Ehhez egyrészt az ún. LSPIV (Large-scale Particle Image Velocimetry; Honkanen és Nobach, 2005), valamint Statisztikai Háttérmodell (Stauffer és Grimson, 1999). Előbbi, vízmérnöki körökben már széleskörben alkalmazott eljárásnak minősül (Fleit és Baranya, 2019), legfőképpen áramlási sebesség számítására. Működési elve az egymást követő képkockák közötti, azonos mintázatok korrelációs eljárásán alapuló azonosításán nyugszik. Az azonosított mintázat két kép közötti elmozdulásának számításával, valamint a két kép között eltelt idő ismeretével a pillanatnyi sebesség-vektor számítható (8. ábra). A Statisztikai Háttérmodell legfőképpen forgalomirányítási, illetve biztonsági-, megfigyelő rendszerekben került eddig alkalmazásra. Lényege, hogy a kép minden pontjában vizsgálja a pixel intenzitás érték változását a videó lefutása alatt. A leggyakrabban előforduló értéket háttérként azonosítja, míg minden más csupán a háttér előtt időszakosan elmozgó objektumként detektál. Egyedülálló módon sikerült a két módszert ötvözni, mellyel egy részben Euler-i (LSPIV), részben Lagrange-i (Statisztikai Háttérmodell) vonatkozású algoritmust hoztunk létre. Ahogy az a 9. ábra példáján is látható, az algoritmus által meghatározott fajlagos görgetett hordalékhozam (egységnyi szélességen egységnyi idő alatt átáramló hordalékáram tömege) átlaga igen jó egyezést hozott, a hagyományos módon meghatározott értékkel. A hagyományos eljárás csupán egy idő-átlagolt értéket határoz meg, ugyanis a mérés alatt összegyűlt hordalék tömegét kell a mérés időtartamával, valamint a csatorna szélességével elosztani.



8. ábra. Egy példa jelenet és a számított sebesség-vektorok, melyek az alattuk látható hordalék szemcsék mozgását jellemzik.

A fajlagos görgetett hordalékhozam alakulása az egyik videó folyamán



9. ábra. Kékkel a saját algoritmus által számított fajlagos görgetett hordalékhozam alakulása látható. Narancssárgával az ebből számított kumulált-átlag, míg sárgával a hagyományos eljárással mért idő-átlagolt érték szerepel.

ÖSSZEGZÉS

Kutatásunk során feltárni igyekszünk a képfeldolgozó algoritmusok alkalmazhatóságát hidromorfológiai mérésekre, valamint új módszereket fejlesztünk ki, melyek lehetővé teszik a hagyományos mederanyag- és görgetett hordalék mintavételezések helyettesítését. Ezekről az automatizálható módszerektől a mérések élmunkaigényének csökkenését várjuk, valamint azt, hogy akár eddig közvetlenül fel nem tárható paraméterek (pl. mederérdesség) és összefüggések meghatározására is lehetőséget nyissanak (pl. az időben- és térben sokkal sűrűbb mintavételezéseken keresztül). A cikkben ilyen jellegű fejlesztéseinket és azok főbb eredményeit mutattuk be röviden, melyek nemzetközi viszonylatban is újszerűnek minősülnek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az ismertetett mérések és fejlesztések egy része az ÚNKP-20-3 és ÚNKP-21-3 Új Nemzeti Kiválósági Program támogatásával valósult meg, az Innovációs és Technológiai Minisztérium valamint a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap jóvoltából, melyért ezúton is köszönjük ki.

IRODALOMJEGYZÉK

- Adams J. (1979): Gravel Size Analysis from Photographs. *J. Hydraul. Div.* 1979, 105, 1247–1255.
- Bogárdi J. (1939): Hordalékmérési kísérletek a Felső-Dunán. *Vízügyi Közlemények*, 21. évf. pp. 115-131.
- Burg D., Ausubel J.H. (2021): Moore's Law revisited through Intel chip density. *PLoS ONE* 16(8): e0256245. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256245>
- Buscombe D. (2013): Transferable wavelet method for grain-size distribution from images of sediment surfaces and thin sections, and other natural granular patterns. *Sedimentology* 2013, 60, 1709–1732.
- Camenen B., Jaballah M., Geay T., Belleudy P., Laronne J. B., Laskowski J. P. (2012): Tentative measurements of bedload transport in an energetic alpine gravel bed river. *River Flow 2012*, Taylor & Francis Group, London, 379-386, 2012.

- Conevski S., Guerrero M., Rennie C., Rütther N. (2020): Towards an evaluation of bedload transport characteristics by using Doppler and backscatter outputs from ADCPs. *Journal of Hydraulic Research*. Volume 59, 2021 – Issue 5. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1818311>
- Covich A. P., Palmer M. A., Crowl T. A. (1999): The Role of Benthic Invertebrate Species in Freshwater Ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling. *BioScience*, Volume 49, Issue 2, February 1999, Pages 119-127, <https://doi.org/10.2307/1313537>
- Csoma, J., Szigyártó, Z. (1975). A matematikai statisztika alkalmazása a hidrológiában (in English: The application of mathematical statistics in hydrology). *Könyv*, pp.341-357; Vízügyi Dokumentációs és Tájékoztató Iroda, Budapest 1975.
- DanubeSediment – Interreg Transnational Programme (2019): Long-term Morphological Development of the Danube in Relation to the Sediment Balance. *Tanulmány*, elérhető [itt](#).
- Detert M., Weitbrecht V. (2013): User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. *Advances in Science and Research*; Taylor & Francis Group: London, UK, 2013; pp. 1789–1795. ISBN 978-1-138-00062-9.
- Doi T., Marinescu I. D., Kurokawa S. (2012): Advances in CMP Polishing Technologies. *Könyv*. 5. fejezet - Promising Future Processing Technology. 2012, Pages 229-295. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7859-5.00005-3>
- Einstein H. (1950): The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. *Technical Bulletins* No. 1026. Washington, DC: US Dept. of Agriculture.
- Ermilov A. A., Baranya S., Fleit G., Török G. T. (2020): Képalapú módszerek fejlesztése folyók morfológiai vizsgálatához. *HIDROLÓGIAI KÖZLÖNY* 100. évf. 3. szám, 74-86.
- Ermilov A. A., Baranya S., Török G. T. (2020): Image-Based Bed Material Mapping of a Large River. *WATER*, 12(3). <http://doi.org/10.3390/w12030916>
- Ermilov A. A., Fleit G., Conevski S., Guerrero M., Baranya S., Rütther N. (nyomtatás alatt): Bedload transport analysis using image processing techniques. *Acta Geophysica*, DOI : 10.1007/s11600-022-00791-x.
- FEMA - Federal Emergency Management (2016): Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping. *General Hydraulics Considerations*. Állami szerv által készített útmutató, U.S.
- Fleit G. Baranya S. (2019): An improved particle image velocimetry method for efficient flow analyses. *Flow Measurement and Instrumentation*, 69 (2019) 101619
- Füstös V, Baranya S, Fleit G, Erős T, Szalóky Z, Józsa J (2019): A felső-magyarországi Duna élőhelyszempontú hidrodinamikai vizsgálata / Habitat based hydrodynamic investigation of the Upper-Hungarian Danube River. *Pisces Hungarici* (2019) 81-90.
- Habersack H., Baranya S., Holubova K., Vartolomei F., Skiba H., Babic-Mladenovic M., Cibilic A., Schwarz U., Krapesch M., Gmeiner P., Haimann M. (2019): Danube Sediment Management Guidance. *Output 6.1 of the Interreg Danube Transnational Project DanubeSediment* co-funded by the European Commission, Vienna.
- Healey K. M., Cox A. L., Hanes D. M., Chambers L. G. (2015): State of the practice of sediment management in reservoirs: Minimizing sedimentation and removing deposits. *Proceedings of the 5th Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference and the 10th Federal Interagency Sedimentation Conference*, April 19-23, 2015.
- Honkanen M., Nobach H. (2005): Background extraction from double-frame PIV images. *Experiments in Fluids*, vol. 38. ((2005), pp. 348-362
- Kondolf, G. M., Gao Y., Annandale G. W., Morris G. L., Jiang E., Zhang J., Cao Y., Carling P., Fu K., Guo Q., Hotchkiss R., Peteuil C., Sumi T., Wang H-W., Wang Z., Wei Z., Wu B., Wu C., Yang C. T. (2014): Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experience from five continents. *Earth's Future*, 2:5, 256-280. doi: 10.1002/2013EF000184
- Micheletti N., Chandler J., H., Lane S., N. (2015): Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, doi: 10.1002/esp.3648
- Moore G.E. (1965): The future of integrated electronics. *Electronics*, Volume 38, Number 8, April 19, 1965.
- Pokrajac D., Manes C. (2009): Velocity Measurements of a Free-Surface Turbulent Flow Penetrating a Porous Medium Composed of Uniform-Size Spheres. *Transport in Porous Media* 78(3):367-383, July 2009. 10.1007/s11242-009-9339-8

- Rákóczi L. (1979): Mederanyag-minták információtartalma és hasznosítása a folyószabályozásban. *Országos vándorgyűlés, Keszthely*. 1979. máj. 17-18. IV.2.
- Rákóczi L., Szekeres J. (2003): A görgetett hordalék mintavétel felülvizsgálata víz alatti video segítségével. *Hidrologiai Közöny* (2003) 83. évf. 3. szám.
- Rátky I., Rátky É. (2012): Sarkantyúhosszabbítás morfológiai hatásának számítása. A Magyar Hidrológiai Társaság XXX. Országos Vándorgyűlése (Kaposvár, 2012. július 4-6.)
- Rice S., Church M. (1998): Grain size along two gravel-bed rivers: Statistical variation, spatial pattern and sedimentary links. *Earth Surf. Process. Landf.* 1998, 23, 345–363.
- Sarker I. H. (2021): Deep Learning: A Comprehensive Overview on Techniques, Taxonomy, Applications and Research Directions. *SN COMPUT. SCI.* 2, 420 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00815-1>
- Soloy A., Turki I., Fournier M., Costa S., Peuziat B., Lecoq N. (2020): A Deep Learning-Based Method for Quantifying and Mapping the Grain Size on Pebble Beaches. *Remote Sens.* 2020, 12, 3659; doi:10.3390/rs12213659
- Stauffer C. and Grimson W.E.L. (1999): Adaptive background mixture models for real-time tracking. Proceedings. 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No PR00149), 1999, pp. 246-252 Vol. 2, doi: 10.1109/CVPR.1999.784637.
- Tavares S. M. O. (2005): Analysis of surface roughness and models of mechanical contacts. Facoltà di Ingegneria – Università di Pisa, *Dissertation*, 2005.
- Török G.T, Baranya S., Rütther N., Spiller S. (2014): Laboratory analysis of armor layer development in a local scour around a groin. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW* (2014/9), pp. 1455-1462.
- USDA (2007): Technical Supplement 13A: Guidelines for Sampling Bed Material. *National Engineering Handbook*, Part 654. (210–VI–NEH, August 2007), U.S.