

A LEBEGTETETT HORDALÉKTÖMÉNYSÉG-ELOSZLÁS INHOMOGENITÁSÁNAK AKUSZTIKUS ELVŰ VIZSGÁLATA A GÖNYŰI VÍZRAJZI MONITORING SZELVÉNYBEN

Pomázi Flóra és Baranya Sándor

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

KIVONAT

A lebegtetett hordalékvándorlás monitoringja az utóbbi évtizedekben nemzetközi szinten is kiemelt jelentőségűvé vált a vízügyi feladatok körében. A lebegtetett hordalékvándorlás dinamikájának, mennyiségének minél nagyobb felbontású feltérképezése érdekében a közelmúltban hazánkban is megindult a hordalékvizsgálati módszerek fejlesztése. Ennek egyik első jelentősebb beruházása az Észak-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság gönyői vízmerce szelvényében kiépítésre kerülő hordalékmonitoring-állomás, amelynek egyik fő eleme egy horizontális akusztikus Doppler-elvű áramlásmérő műszer (ADCP). Az ADCP műszerrel mérhető ún. relatív visszavert jelerősség kalibrálásával előállítható a lebegtetett hordaléktöménység térbeli eloszlása. A gönyői mintaterületen ebben a térbeli eloszlásban inhomogenitást okoz a Mosoni-Dunán érkező hordalékcsóva, amelynek azonosítása a monitoring adatokban rendkívül fontos feladat, ugyanis az a part közeli pontban végzett mérések kiterjesztése (összekapcsolása a szelvény menti átlagértékekkel) során jelentős mértékű bizonytalanságot okozhat. Vizsgálataink eredményeként azonban fel tudunk állítani egy olyan összefüggést a mérésre kerülő vízrajzi adatok között (vízhozam és hordaléktöménység), amellyel a szelvény menti átlagos hordaléktöménység, illetve a teljes lebegtetett hordalékhozam már megbízhatóbban - a hordalékcsóvát is figyelembe véve - becsülhető a part közeli pontban mért lebegtetett hordaléktöménység alapján.

KULCSSZAVAK: akusztikus elvű áramlásmérő műszer, inhomogenitás, lebegtetett hordalék, monitoring, part közeli hordaléktöménység

BEVEZETÉS

Nagy folyók monitoringja jellemzően több szervezet (akár több ország) összehangolt együttműködését követeli meg, fontos a lebegtetett hordaléktranszport ugyanazon jellemzőinek (a legfontosabb a hordaléktöménység, de fontos a lebegtetett hordalékhozam és a lebegtetett hordalék szemösszetétele is) mérése, lehetőleg közel azonos térbeli és időbeli felbontással. Egy jól működő monitoring rendszer létrehozása manapság már mind korszerűbb eljárások alkalmazását igényli, mint például az akusztikai vagy optikai elven működő indirekt módszerek alkalmazása. Mindkét típust széles körben alkalmazzák a hordaléktöménység meghatározására, a működési elvük tudományosan megalapozott, alkalmazási előnyeik és korlátaik pedig sokak által tanulmányozott.

Egy hordalékmonitoring-állomás kialakításánál a közelmúltbeli nemzetközi tanulmányok (Haimann et al. 2012, 2014; DanubeSediment 2019; Aleixo et al. 2020) egy olyan integrált koncepció követését javasolják, amelyben egy part közeli kialakítású, folyamatosan üzemelő mérőrendszer teszi lehetővé a lebegtetett hordalékvándorlás időbeli változékonyságának követését, amely mérőrendszert kiegészítő expedíciós mérésekkel szükséges kalibrálni (illetve azt időnként frissíteni). Egy ilyen mérőrendszer jellemzően egy akusztikus vagy optikai zavarosságmérőből és egy horizontális akusztikus Doppler-elvű áramlásmérő műszerből (H-ADCP) tevődik össze. Noha ez utóbbi elsődleges funkciója a vízhozammérés, az akusztikus elméletet alkalmazva az ADCP által mért visszavert jelerősségből szintén becsülhető a lebegtetett hordaléktöménység (és -hozam). Az ADCP mérési elve ráadásul lehetővé teszi a 2D, mezőszerű térképezést is, ezzel nagymértékben növelve a lebegtetett hordalékmérés térbeli felbontását is.

Azonban egy ilyen folyamatosan üzemelő mérőrendszer létesítésekor különösen fontos, hogy a monitoring állomás választott helyszíne, a mérési pont mélysége kellően reprezentatív legyen az adott folyószakasz lebegtetett hordalékvándorlási viszonyainak leírásához. Jelen tanulmányban egy olyan esetet vizsgálunk a felső-magyarországi Duna-szakaszon, ahol a monitoring szelvénytől nem sokkal feljebb egy jelentős hordaléktartalommal bíró mellékfolyó torkollik a Dunába, jelentős inhomogenitást okozva a lebegtetett hordaléktöménység szelvény menti eloszlásában.

MINTATERÜLET

Az itt bemutatott eredmények a SEDDON II projekt keretében gyűjtött adatokon alapulnak, amely projekt egyik fő célja a határokon átnyúló hordalékmonitoring fejlesztése a Duna mentén. A Duna hazai szakaszán elsőként egy felső-magyarországi szelvényben (1790.61 fkm, Gönyű vízmérce) kerül kiépítésre egy olyan hordalékmonitoring állomás, amely nem csak a lebegtetett hordalékmérés időbeli, hanem térbeli felbontását is jelentős mértékben növeli.

A vizsgált Duna-szakasz morfológiai szempontból átmeneti szakasznak minősül: esése 37 cm/km-ről 6 cm/km-re csökken, s kiszélesedik. Az átlagos vízhozam 2000 m³/s körül mozog, míg a 100 éves visszatérési idejű árhullám 10 000 m³/t-ot jelent. A vízrajzi szelvényben az átlagos vízmélység 5-6 m, az átlagos szelvény szélesség 400 m. Az átlagos lebegtetett hordalékhozam 40 kg/s (azaz kb. 1.3 Mt/év), az átlagos hordaléktöménység 20 mg/l. A gönyői vízmérce szelvényétől 4 km-rel feljebb azonban a hordalékban gazdag Mosoni-Duna torkollik a Dunába, melynek jobb parthoz simuló hordalékcsóvája hosszú km-eken keresztül nem keveredik el teljesen a Duna vizével (1. ábra). Míg a Mosoni-Duna vízhozama ritkán haladja meg a Dunában mért vízhozam 10%-át, addig a hordaléktöménysége akár hatszorosa is lehet a Dunában mértnek – noha a lebegtetett hordalékhozamok aránya már csak 1:5. Mivel a parti mérőrendszer szintén a jobb parton helyezkedik el, a hordalékcsóva igen jelentősen befolyásolhatja a monitoring állomás által szolgáltatott adatokat.



1. ábra. A gönyői mintaterület műholdfelvétele: a Mosoni-Dunán érkező hordalékcsóva jól láthatóan hosszú km-eken keresztül nem keveredik el a Duna vizével

MÓDSZERTAN

Terepi mérések

A mintavétel az US P-61-A1 izokinetikus mintavevővel történt, ezáltal biztosítva, hogy a hordalékos vízminta és az áramlási közeg lebegtetett hordaléktartalma megegyezzen. A mintavételi pontok kiosztása az ún. többpontos mintavételi módszer alapján történt (BMFLUW 2017), melynek megfelelően 5 függélyben, függélyenként 5-5 pontban végeztünk lebegtetett hordalékmérést a monitoring szelvényben. A mintavételi pontok mélysége rendre: 0.05H, 0.20H,

0.60H, 0,85H és 0.95H – ahol H az adott függvényben mért teljes vízmélység. A lebegtetett hordalékhozam meghatározása érdekében a mintavétellel egyidejűleg egy Teledyne RDI Rio Grande 1200 kHz ADCP műszerrel függély menti (rögzített hajós) áramlásmérés is történt. A lebegtetett hordalékhozam számításához szükséges időátlagolt függély menti sebességprofilok utófeldolgozás útján kerültek előállításra az egyenként nagyjából 10 perces mérésekből. Emellett minden mérési alkalommal végeztünk szelvény menti (mozgóhajós) ADCP méréseket is a vízhozam rögzítésére. A mozgóhajós mérések során mért és rögzített visszavert jelerősség kalibrálásával egyúttal a lebegtetett hordaléktöménység szelvény menti eloszlását is feltérképeztük. Jelen tanulmányban 24 mérési kampány eredményei kerülnek bemutatásra – az e mérések által lefedett vízhozam-tartomány mind a Duna, mind pedig a lebegtetett hordalékban gazdag mellékfolyója esetén kellően szélesnek, s reprezentatívnak bizonyult.

Laboratóriumi elemzés

A hordalékos vízminták hordaléktöménységét a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének laboratóriumában határoztuk meg a filtrációs (vagy szűrőpapíros) módszert alkalmazva, egy pozitív nyomású szűrőberendezés segítségével. A filtrációs módszer során az adott térfogatú (V) hordalékos vízmintát egy ismert tömegű ($m_{előtt}$), $0.45 \mu\text{m}$ pórusméretű membránszűrőn kell átteresztetni. A folyamat végeztével a membránszűrőt – rajta a megszárt lebegtetett hordalékkal – $105 \text{ }^\circ\text{C}$ -on tömegállandóságig kell szárítani, majd lemérni a tömegét ($m_{után}$). Ezután a lebegtetett hordaléktöménység (SSC) a következő képlet alapján már számítható:

$$SSC = \frac{m_{után} - m_{előtt}}{V}$$

A hordaléktöménység meghatározásán túl a hordalékos vízminták szemösszetételi elemzését is elvégeztük a LISST-Portable|XR lézerdiffrakciós műszerrel. A LISST-Portable|XR a lézerefény szóródási jelenségén alapuló műszer. A műszer ismert intenzitású és hullámhosszú lézerefényt bocsát keresztül a műszerbe helyezett vízmintán. Az eszköz a szóródott lézerefényt gyűjtőlencse segítségével az érzékelő gyűrűkre fókuszálja. Ezután a koncentrikusan elhelyezett 44 db detektorgyűrűn érzékelt fény mennyiségéből szemeloszlást képes meghatározni, valamint a kibocsátott, illetve érzékelt fényintenzitás különbségéből megbecsüli a mintában lévő szilárd szemcséken elnyelődött fény mennyiségét. A két érték arányából térfogatkonzentrációt számít ($\mu\text{l/l}$), melyet az operátor által becsült hordalékszemcse fajsúlyának segítségével számít át lebegtetett hordalék koncentráció értéké [mg/l]. Elméleti méréstartománya $10\text{-}1900 \text{ mg/l}$ (a szemcsemérettől függően), $\pm 20\%$ -os megbízhatósággal a $0.34 - 500 \mu\text{m}$ szemcsetartományban (Sequoia Inc. 2018).

Az ADCP visszavert jelerősség kalibrálása

Az ADCP visszavert jelerősség kalibrálása során a Baranya és Józsa (2010) által bemutatott eljárást követve az ún. szonár-egyenlet Gartner (2004) féle formáját alkalmaztuk:

$$SSC_{ADCP} = 10^{A+B \cdot RB} = 10^{(A+B \cdot (K_c(EI-E_r) + 2 \cdot (10 \cdot \log(R) + (\alpha_w + \alpha_s) \cdot R))}$$

ahol SSC_{ADCP} az ADCP visszavert jelerősségből származtatott hordaléktöménység, A és B regressziós együtthatók (a relatív visszavert jelerősség (RB) és a mért hordaléktöménység logaritmus között felállított regresszió együtthatói, a legkisebb négyzetek elve alapján meghatá-

rozva), K_c a műszerre jellemző konverziós együttható, E_i a hangintenzitás, E_r a műszerre jellemző referencia zajszint, R a műszerfejtől mért távolság, α_w a víz általi elnyelődést, α_s pedig a hordalékszemcsék általi csillapítást leíró együttható.

A kalibrálás során a rögzített hajós ADCP mérésekből előállított időátlagolt relatív visszavert jelerősség és a filtrációs módszerrel meghatározott lebegtetett hordaléktöménység között állítottuk fel a regressziós kapcsolatot. A víz általi elnyelődés vízhőmérséklettől függő paraméter, mely hőmérsékletet minden méréskor rögzített az ADCP. A hordalékszemcsék általi csillapítás a lebegtetett hordalék jellemzőitől függ: a közepes szemátmérőt (D_{50}) a lézerdiffrakációs szemösszetételi, a hordaléktöménységet pedig a szűrőpapíros elemzés adta.

A hordalékhozam számítása

A többpontos módszert alkalmazva a lebegtetett hordalékhozam eloszlásának leírása diszkrét, pontbeli mérésekkel becsülhető. Az egyes mintavételi pontokhoz tartozó áramlási sebességek és hordaléktöménységek szorzatának szelvény menti integráltja adja meg a teljes szelvény menti lebegtetett hordalékhozam nagyságát. Az integrálás ebben az esetben háromszög-, téglalap-, illetve trapézterületek összegzését jelenti.

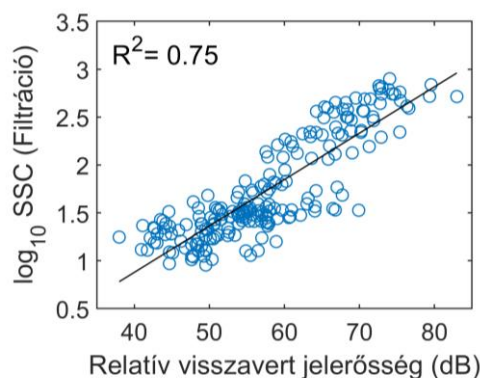
A szelvény menti hordaléktöménység inhomogenitásának vizsgálata

A kalibrációs összefüggés felállítása után a mozgóhajós ADCP mérésekből előállítottuk a lebegtetett hordaléktöménység szelvény menti, 2D eloszlásmezőit. Hogy példázzuk a jövőben a monitoring állomáson üzemelő H-ADCP működését, illetve a hordalékban gazdag hozzáfolyás hatását a part közeli mérésekre, a következő vizsgálatokat végeztük el: 1) egy part közeli pontban (a tervezett zavarosságmérő helyén) származtatott hordaléktöménység értékek összekapcsolása a szelvény menti teljes lebegtetett hordalékhozammal; 2) réteg menti (H-ADCP mélysége mentén) töménységprofilok összehasonlítása a part menti hordaléktöménység, illetve a szelvény menti hordalékhozam függvényében; 3) mintázatok keresése a 2D hordaléktöménység-eloszlásokban.

EREDMÉNYEK

Az ADCP visszavert jelerősség kalibrálása

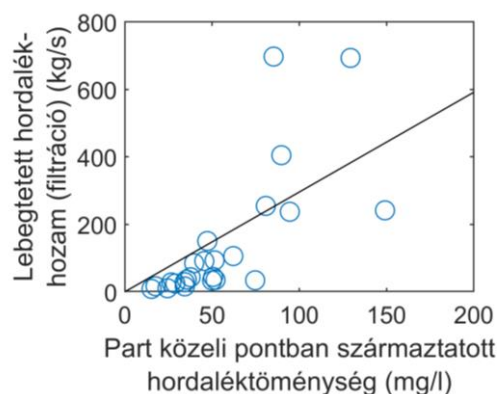
A fent leírt kalibrálási folyamat eredményeként egy jó erősségű ($R^2=0.75$) kapcsolatot (2. ábra) lehetett felállítani a relatív visszavert jelerősség és a mért hordaléktöménység logaritmusá között.



2. ábra. Az ADCP relatív visszavert jelerősség és a mért hordaléktöménység logaritmusá között felállított kapcsolat

A part közeli hordaléktöménység kiterjesztése

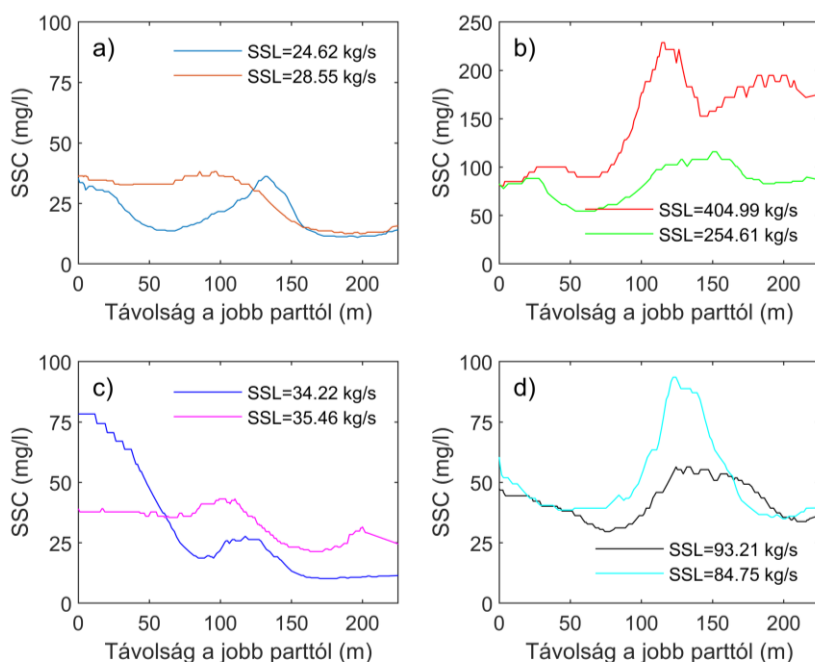
A bevezetésben bemutatott integrált monitoring megközelítést alkalmazva a szelvény menti lebegtetett hordalékhozam a part közeli pontban rögzített hordaléktöménység alapján kiterjesztett érték. Ennek megfelelően egy kellően erős kapcsolatot szükséges felállítani a lebegtetett hordalékvándorlás e két paramétere között. Az ADCP mérésekből származtatott part közeli hordaléktöménységek és a direkt hordalékmérésből (izokinetikus mintavétel és szűrőpapiros elemzés) számított lebegtetett hordalékhozam közötti kapcsolat (3. ábra) alapján azonban a vizsgált szelvényben egyetlen pontban rögzített hordaléktöménység-adat alapján nem határozható meg a hordalékhozam kellő megbízhatósággal. A szórás jelentős, magasabb hordaléktöménység-értékeknél már nagyságrendi eltérések jelentkeznek. Ugyanahhoz a part közeli pontban mért hordaléktöményeghez akár $\pm 50\%$ -os eltérés lehet a hordalékhozamban, amely például 100 mg/l esetén ± 500 kg/s-ot jelent.



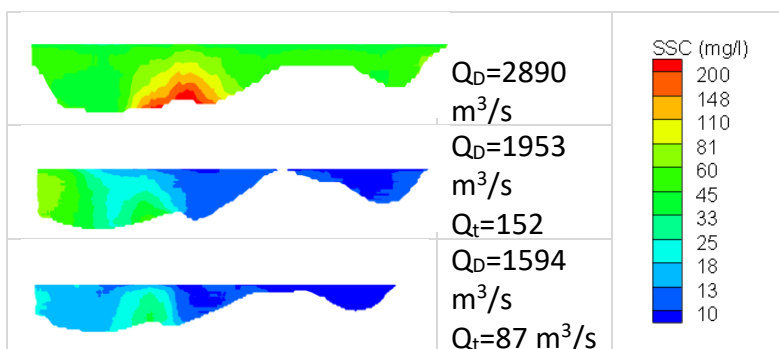
3. ábra. Kapcsolat a part közeli pontban származtatott hordaléktöménység és a teljes szelvény menti lebegtetett hordalékhozam között

Hogy megértsük, hogyan tartozhat ugyanaz a part közeli hordaléktöménység teljesen eltérő hordalékhozamokhoz, megvizsgáltuk a réteg menti hordaléktöménység-profilokat. Különböző esetek (4a-d. ábra) azonosíthatók be: 1) ugyanaz a part közeli hordaléktöménység különböző profilokhoz, de hasonló hordalékhozamokhoz tartozik (4a-d. ábra); 2) ugyanaz a part közeli hordaléktöménység különböző profilokhoz és igen eltérő hordalékhozamokhoz tartozik (4b. ábra); 3) jelentősen eltérő part közeli hordaléktöménységek tartoznak hasonló hordalékhozamokhoz (4c. ábra).

A 2D hordaléktöménység-eloszlásokat elemezve egyértelmű mintázatokat lehet beazonosítani. Normál vízjárási állapotokban, amikor a hozzáfolyás szerepe elhanyagolható, a szelvény közepére jellemzőek a legmagasabb hordaléktöménységek (5. ábra). Ez egybevág az elmélettel, miszerint a legnagyobb hordalékszállítási kapacitás a sodorvonalban alakul ki. Ezekben az esetekben a mederközépi hordaléktöménység 2-5-szöröse a part közeli értékeknek. Ezzel szemben, amikor nagyobb vízhozam érkezik a lebegtetett hordalékban gazdag mellékfolyón, annak hordalékcsóvája egy magasabb hordaléktöménységű „folt”-ként igen jól érzékelhető a monitoring szelvényben (5. ábra). A hozzáfolyás hatásán túl egyéb morfológiai hatások is megfigyelhetők ezeken a térképeken. A monitoring szelvény fölött közvetlenül egy sarkantyúmező található, mely mögött a szelvény bal parti közel egyharmada visszaáramlási zóna. Ennek megfelelően alacsony vízjárási állapotban a sarkantyúk mögötti rész igen alacsony hordaléktöménységgel jellemezhető. Azonban a sarkantyú koronaszintjének meghágása után ($Q=2200$ m³/s) már egy jóval homogénebb hordaléktöménység-eloszlás alakul ki.



4. ábra. A réteg menti (a H-ADCP mélységében) hordaléktöménység-profil különböző esetei (megjegyzés: 1. a folyamatos hordaléktöménység-mérés a jobb parton történik, 2. a megjelölt szelvény menti távolság a H-ADCP maximális mérési távolságát jelzi (kb. 225 m; Teledyne 2013))



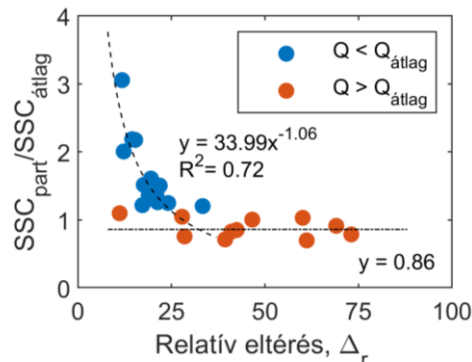
5. ábra. Szelvény menti hordaléktöménység-eloszlások 1) $Q > Q_{\text{átlag}}$ esetén (fent); 2) $Q < Q_{\text{átlag}}$ esetén jelentős hozzáfolyás esetén (középen); 3) $Q < Q_{\text{átlag}}$ esetén, általános hozzáfolyás esetén

Vizsgálataink alapján kijelenthető tehát, hogy az egy part közeli pontban mért hordaléktöménység nem elegendő a lebegtetett hordalékvándorlás szelvény menti eloszlásának megfelelő leképezésére. A Duna (Q_D) és a mellékfolyó (Q_m) vízhozamának arányának figyelembe vételével azonban korrigálható a part közeli hordaléktöménység. A hozzáfolyás hatásának számszerűsítésére bevezettük a vízhozamok ún. relatív eltérését (Δ_r), amely az alábbi képlet alapján határozható meg:

$$\Delta_r = \frac{|Q_D - Q_m|}{\min(|Q_D|, |Q_m|)}$$

A relatív eltérés és a part közeli, illetve szelvény menti átlag hordaléktöménység aránya között erős kapcsolatot lehetett felállítani (6. ábra). Figyelembe véve a sarkantyúk hatását is, látható, hogy $Q = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$ fölötti vízhozamok esetén már szinte elhanyagolható a hozzáfolyás hatása. A

part közeli és az átlag hordaléktöménység aránya konstans (0.86). Ezt a korábban beazonosított mintázatok is alátámasztják: ebben az esetben a szelvény középső részén alakul ki magasabb hordaléktöménység. $Q=2200 \text{ m}^3/\text{s}$ alatt azonban erősen megmutatkozik a hordalékban gazdag hozzáfolyás hatása: a part közeli és az átlagos hordaléktöménység eltérése exponenciálisan ($R^2=0.71$) növekszik, akár a part közelében akár háromszoros értékek is előfordulhatnak.



6. ábra. A Duna és mellékfolyója vízhozamának relatív eltérése, valamint a part közeli és az átlag hordaléktöménység aránya között felállított kapcsolat

Megjegyezzük, hogy méréseink során nem fordultak elő extrém vízjárási állapotok, így azokat nem állt módunkban figyelembe venni jelen tanulmányban. Azonban egy dunai árhullám esetén a hordalékcsova teljes elkeveredése feltételezhető – míg annak valószínűsége, hogy a mellékfolyón jelentős árhullám érkezen egy dunai kisvízre, elhanyagolhatóan alacsony.

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen tanulmányban a szelvény menti lebegtetett hordaléktöménység-eloszlás inhomogenitásának akusztikus elvű vizsgálatát végeztük el a gönyűi vízrajzi monitoring szelvényben. A számos hordalékmérés eredményeként egy erős ($0.70 < R^2$) kapcsolatot lehetett felállítani az ADCP mérésekből kinyerhető relatív visszavert jelerősség és a mért hordaléktöménység között. Bemutattuk, hogy a hordalékban gazdag hozzáfolyás jelentősen befolyásolja a hordaléktöménység szelvényben kialakuló eloszlását. Ez a jelenség egyáltalán nem elhanyagolható, amikor egy hordalékmonitoring-állomás konfigurálásáról van szó, mely során jellemzően egy part közeli pontban mért hordaléktöménységet kell összekapcsolni a szelvény menti hordalékhozammal. Vizsgálataink eredményei alapján javaslatot tettünk egy olyan korrekciós eljárásra, amellyel figyelembe vehető a szelvény menti inhomogenitás.

IRODALOMJEGYZÉK

- Aleixo R, Guerrero M, Nones M, Ruther N (2020) Applying ADCPs for Long-Term Monitoring of SSC in Rivers. *Water Resour Res* 56(1). <https://doi.org/10.1029/2019WR026087>
- Baranya S, Józsa J (2010) ADCP alkalmazása lebegtetett hordalék-koncentráció becslésére. *Hidr. Közl.*, 90 (3), 17-22.
- BMFLUW (2017) Schwebstoffe im Fließgewässer – Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransports. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2. Auflage, Vienna, Austria. https://info.bmlrt.gv.at/dam/jcr:479ff2f0-b143-4560-a9a9-6c464c25125/Leitfaden_Schwebstoffmessung_2te-Auflage.pdf. Hozzáférés: 2022.05.01.
- DanubeSediment (2019b) Handbook on Good Practices in Sediment Monitoring. Projekt jelentés. 2019. <http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danubesediment/outputs>. Hozzáférés: 2022.05.01.

- Gartner JW (2004) Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California *Mar. Geol.* 211(3-4):169-187. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.001>
- Haimann M, Liedermann M, Lalk P, Habersack H (2014) An integrated suspended sediment transport monitoring and analysis concept. *Int J Sediment Res*, 29:135-148. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(14\)60030-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60030-5)
- Haimann M, Liedermann M, Naderer A, Lalk P, Habersack H (2012) Integratives Schwebstoffmonitoringkonzept – Innovative Ansätze auf Basis direkter und indirekter Methoden. *Österr Wasser- und Abfallw.* 64:535–543. <https://doi.org/10.1007/s00506-012-0038-2>
- Sequoia Scientific (2018) LISST-Portable|XR Manual Version 1.3. http://www.sequoiasci.com/wp-content/uploads/2015/06/LISST-PortableXR-Manual-Version-1_3.pdf. Hozzáfézés: 2022.05.01.
- Teledyne (2013) Workhorse H-ADCP Technical Specifications. http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/hadcp_datasheet_lr.pdf Hozzáfézés: 2022.05.01.