

Hajók keltette hullámozás hatásának terepi feltárása a litorális zónában

Fleit Gábor¹, Baranya Sándor¹, Krámer Tamás¹, Józsa János^{1,2}

¹BME, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

²MTA-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

Kivonat: Jelen tanulmányban a hajók keltette hullámok partközelen megjelenő áramlási hatásait vizsgáltuk a Duna Sződligeti szakaszának egy limányos területén, különös tekintettel a fenék-csúsztatófeszültségre. Kellően nagy feszültségnövekmények esetén, a mederfenéken élő makrogerinctelenek és halikrák elsodródhatnak olyan áramlási sebességek uralta területekre, ahol túlélési esélyük zérushoz közeli. Ezen paraméter számszerűsítése szinkronizált akusztikus sebességmérő műszerek terepi alkalmazását igényelte. A nagy időbeli felbontású sebesség-idősorok alapján statisztikai módszerekkel jellemeztük különböző elhaladó hajók (szállodahajó, uszály, szárnyashajó, motorcsónak) hatására kialakuló hidrodinamikai változásokat a mederfenéken. A cikk továbbá bemutatja a Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) egy újszerű alkalmazását, mellyel a hullámozás part menti mozgásának időben változó sebességmezővel való leírását végeztük el. Az eredmények rámutatnak a hullámjelenségek térbeli és időbeli összetettségére, de egyúttal igazolják azok kimérhetőségét is.

Kulcsszavak: ADV, Duna, fenék-csúsztatófeszültség, hajók keltette hullámozás, LSPIV, terepi mérés

1. Bevezetés

A hajókkal történő utas- és áruszállítás napjaink egyik legkörnyezetkímélőbb fuvarozási formájaként ismeretes, mindazonáltal számos olyan káros mellékhatása is ismert, melyek nem elhanyagolhatók. Itt egyrészt gondolni kell a közvetlen vízminőségi problémákra, melyet a hajókból szivárgó olajok, üzemanyagok és más poliaromás szénhidrogének okoznak, de számos közvetett hatás is felismerésre került az utóbbi években, melyek hosszú távon a vizes élőhelyek biodiverzitásának degradációjához vezethetnek. Ilyen például a hajók keltette hullámozás hatására a partközelen megnövekvő lebegtetett hordalék koncentráció, melynek a vízi ökoszisztéma szempontból messzemenő következményei lehetnek. Ezen túlmenően a hullámzások jelentős hatással lehetnek egy adott területet jellemző hidrodinamikai paraméterek tér- és időbeli eloszlására is, melyek a vizes élőhelyek egyik legfontosabb abiotikus jellemzői.

A hajók keltette hullámozás hatására a partközelen jelentősen megnövekvő fenék közeli áramlási sebességek és fenék-csúsztató feszültségek alakulnak ki, melyek a mederfenék élővilágát veszélyeztethetik. Megfelelően nagy fenék-csúsztatófeszültségek esetén, a mederfenéken található halikrák, ivadékhalak, makrogerinctelenek és más bentikus élőlények elsodródhatnak a számukra biztonságot nyújtó part közeli zónából olyan áramlási sebességek uralta területekre ahol túlélési esélyük zérushoz közeli. A makrogerinctelenek kapaszkodási képességeinek, valamint a különböző halfajok megiramodási sebességének vizsgálata ugyan kívül esik a klasszikus vízmérnöki ismereteken, azonban fejlett, naprakész terepi mérési és adatfeldolgozási módszereink alkalmazásával lehetőség nyílik interdiszciplináris vizsgálatok végzésére és a témát gondoó biológusok támogatására.

A hajók keltette hullámzások hatását vízmérnöki szemszögből már vizsgálták korábban (*Krouzecky et al., 2013* és *Liedermann et al., 2009*) azonban ezek a vizsgálatok a hullámelméleti paraméterek, jellemző hullámmagasságok hullámhosszak stb. meghatározására fektették a hangsúlyt. Különböző makrogerinctelen fajok hullámozás hatására megjelenő fenék-csúsztatófeszültség növekmény okozta elsodródását már vizsgálták külföldi kutatók (*Gabel, 2012*), azonban a hangsúly itt a biológiai vizsgálatokon volt, a hidraulikai jelenségek részletes vizsgálata nem történt meg.

Jelen tanulmány a hajók keltette hullámok mederfenéken jelentkező hidrodinamikai hatásait vizsgálja, azonban fontos hangsúlyozni, hogy a hullámozás csak egy a számos ismert kedvezőtlen hatás közül, valamint, hogy az általunk végzett vizsgálatok a hullámzások hatásainak is csak egy szűk spektrumát ölelik fel.

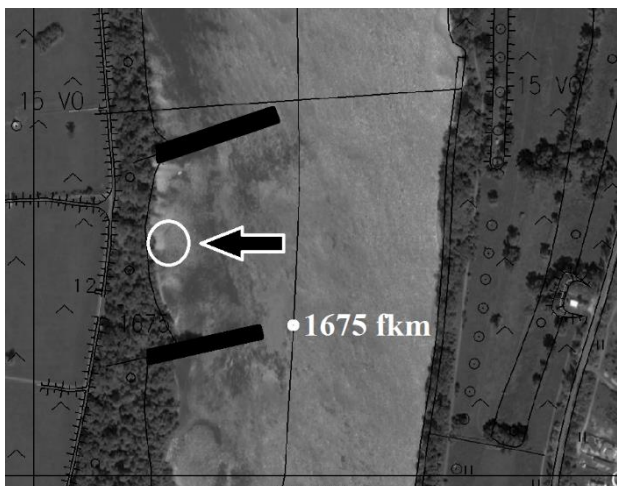
Munkánk során teszteltük a Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) (*Jodeau et al. 2013*) sebességmérési módszer egy újszerű alkalmazását, a megtörő hullámok dinamikájának vizsgálatára és annak kvantitatív jellemzésére. A PIV algoritmus videofelvételek alapján képes időben változó, felszín közeli áramlási sebesség mezők számítására. A módszert ilyen célokra a szerzők ismeretei szerint korábban még nem alkalmazták.

2. Vizsgálati terület

Az esettanulmányra kiválasztott terület a Duna 1675,3 és 1675,0 fkm szelvényei közt található. Ez Sződliget térsége, a folyó jobb partján a Szentendrei sziget, bal partján Sződliget községe található. A Duna teljes vízhozamának közel kétharmada folyik ezen az ágon, melyből következik, hogy a hajóforgalom is itt zajlik, mely esetenként kedvezőtlen hatással lehet a vízi ökoszisztémára.

A Sződligeti Duna szakaszon két, a hajóóút biztosítására megépített sarkantyúpár helyezkedik

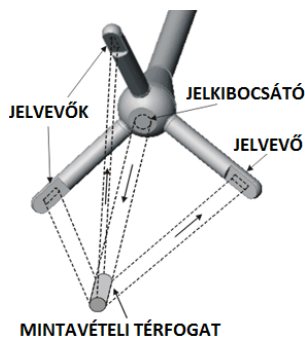
el, melyek komplex áramlástani és morfológiai viszonyokat kölcsönöznek a területnek. Jelen vizsgálatban az északi, jobb parton elhelyezkedő sarkantyúpár közötti áramlási holtterben végeztük a terepi adatgyűjtést (1. ábra), ahol kis- és középvízi állapotban a part menti áramlási sebességek zérushoz közeli, így a mérések során közvetlenül a hullámvás hatására megjelenő növekményeket mérhettük.



1. ábra – A vizsgálati terület és a mérések helye (fehér ellipszissel jelölve)

3. Mérőműszerek, terepi mérések

A mederfenék közeli áramlási sebességek háromdimenziós, nagy időbeli felbontású adatsoraira volt szükségünk, hogy a kialakuló hidrodinamikai jelenségeket megértsük, valamint, hogy lehetséges legyen a fenécsúsztatófeszültségek számszerű becslése. A terepi munka során ezért három korszerű, 16Hz-es mintavételi frekvencián működő akusztikus Doppler-elvű mérőműszert (ADV) alkalmaztunk (2. ábra).



2. ábra – Az ADV és részeinek sematikus ábrája

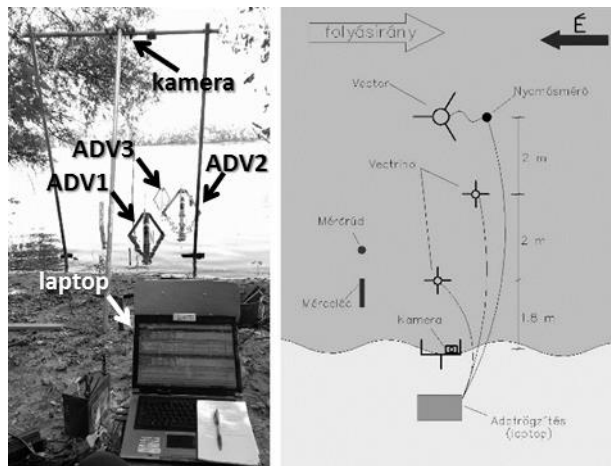
Az ADV-k a Doppler-elvet használják ki méréseikhez, mely a következő: ha egy hangforrás a vevőhöz képest mozog, akkor a vevő által fogadott hang frekvenciája a sebességkülönbséggel arányosan megváltozik a kibocsátott hang

frekvenciájához képest. A műszer hangsugarakat bocsát ki, melyek a vízben lévő és azzal együtt mozgó apró részecskékről (pl. lebegtetett hordalék) visszaverődnek a jelvevőre a víz áramlási sebességétől függő mértékű frekvenciaváltozással.

Az ADV rögzített geometriai kialakításából adódóan egy közel 1 cm^3 -es térfogathoz gyűjt adatot, mely a kibocsátott és az érzékelt hangnyalábok metszetéből adódik. Az ADV tehát jó közelítéssel pontbeli sebességvektorok idősorainak mérésére alkalmas.

A három műszert egymástól közel azonos távolságra helyeztük el a partra merőleges vonalban, egyre nagyobb vízmélységű pontokban. A műszerek rögzítésénél ügyeltünk arra, hogy a mintavételi térfogatuk közvetlenül a mederfenék fölötti vízrétegben legyen. Az ADV-k kezelését, valamint a mért eredmények szinkronizált rögzítését a partról végeztük egy laptop segítségével. A parttól legtávolabbi elhelyezett ADV műszerhez egy nyomásérzékelő is tartozott, melyet a mederfenéken helyeztünk el, hogy detektálni tudjuk a hullámvás hatására változó nyomásviszonyokat.

A mérési installáció része volt továbbá egy Full HD felvételek készítésére alkalmas videokamera, melyet egy állványon rögzítettünk, a partvonal felett. A nagy látószögű kamera így rögzíteni tudta a partra kifutó és ott megtörő hullámokat. Ezeket a felvételeket később az LSPIV módszer segítségével dolgoztuk fel. A terepi mérőműszerek elrendezését a 3. ábra szemlélteti.



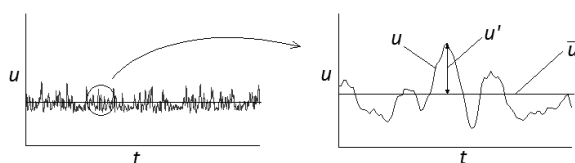
3. ábra – Terepi mérőműszer installáció fényképen (balra) és sematikus felülnézeti ábrán (jobbra)

A mérési kampányra 2014. szeptember 24-én került sor, $1750 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ -os vízhozam idején. Ez egy középvízi állapot, a folyó nem hágtá meg a sarkantyúkat, így a művek közötti zónában, annak part közeli részén az áramlási sebességek elhanyagolhatóan kicsik voltak.

A terepi munka során a www.marinetraffic.com címen elérhető honlapról tájékozódunk a közeledő hajókról, így megfelelően fel tudunk készülni az általuk keltett hullámzások áramlástani hatásainak mérésére. A mérési kampány során négy szállodahajó, egy uszály, valamint egy szárnyashajó által keltett hullámok hatásait rögzítettük, valamint további adatnyerés céljából a saját mérőcsónakunk által keltett hullámzást is vizsgáltunk.

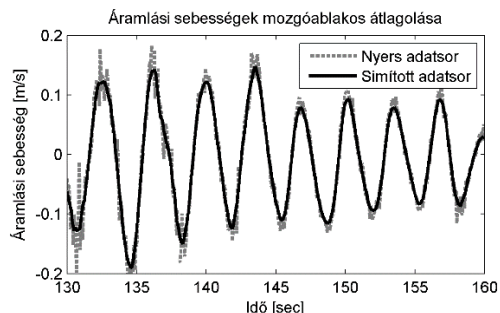
4. Adatfeldolgozás

Az ADV-k háromdimenziós áramlási sebességméréseinek feldolgozása során lényegében azok előkészítését végeztük el, a későbbi fenékcsúsztatófeszültség becslései eljárásokhoz. A mért adatsorok időbeli szinkronizálását követően, a hibás mérések kiszűrését kellett elvégezni. Az adatsorok elkerülhetetlenül tartalmaztak hibás méréseket, melyek nagyságrendekkel nagyobbak voltak, mint az őket megelőző mérések. Ezek kiszűrése így gyorsan elvégezhető volt. A kiugró értékektől megtisztított adatsoron ezután elvégeztük a turbulencia okozta sebességfluktuáció vizsgálatát is. Erre a célra általános esetben a Reynolds-féle szétválasztást szokás alkalmazni, vagyis egy adott pontbeli u pillanatnyi sebességet egy alkalmas t időpontban egy \bar{u} átlagsebesség és egy u' pulzációs sebesség összegeként írjuk fel (4. ábra).



4. ábra – Turbulens áramlási sebességek Reynolds-féle szétválasztása

A hullámzások hatására azonban olyan időben változó áramlási sebesség rendszer alakul ki, mely nem jellemezhető egy teljes idő szerinti átlagolással, így az átlagtól való eltérések sem határozhatók meg triviálisan. A szétválasztást a következő feltételezéssel végeztük el: átlagolt áramlási sebességnek egy mozgóablakos átlagolással ($n=11$) simított adatsort tekintettük, és a nyers (hibás adatoktól megszürt) adatsor ezen átlagoktól való eltérését definiáltuk turbulens fluktuációként (5. ábra).



5. ábra – Áramlási sebességidősor mozgóablakos átlagolása

A fenti ábrán látható, hogy a 11 adatból álló mozgóablak mérettel előállított adatsor jól felveszi a nyers idősor karakterisztikáját, kb. 3,5-4,0 másodperces periódusidő figyelhető meg. Mindazonáltal elvégeztük az ablakméret megválasztásának tudományos megalapozását is. Ez a sebesség adatsor domináns frekvenciájának, illetve periódusidejének meghatározását igényelte, melyet spektrálanalízis segítségével végeztünk el, ami alátámasztotta a fenti értékeket.

A Reynolds-féle szétválasztott idősorok felhasználásával lehetőség van a turbulens fluktuációból eredő fenék-csúsztatófeszültségek számítására. Folyami körülmények közt ez az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer, melynek több változata is létezik.

Amennyiben az áramlási sebességeket három dimenzióban vizsgáljuk, úgy a szétválasztás is mindhárom merőleges sebességkomponensre (u a fő áramlási iránnyal megegyező, v az áramlás irányára merőleges; w az uv síkra merőleges) elvégzendő. Az $-\overline{u'w'}$ pulzációs összetevők átlaga, valamint az u_* fenékcsúsztató feszültség közt a következő, Reynolds-féle összefüggés áll fenn:

$$\frac{-\overline{u'w'}}{u_*^2} = 1 - \frac{1}{\kappa u_* z / \nu} = 1 - \frac{1}{R} \quad (1)$$

ahol κ a von Kármán konstans ($\sim 0,4$), ν a víz kinematikai viszkozitása ($1,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), R a Reynolds-szám. Turbulens áramlások esetén a Reynolds-szám, $R = \frac{\kappa u_* z}{\nu} \gg 1$, így

$$-\overline{u'w'} = u_*^2 \quad (2)$$

továbbá mivel a τ_b fenék-csúsztatófeszültség

$$\tau_b = \rho \cdot u_*^2 \quad (3)$$

ezért

$$\tau_b = \rho(-\overline{u'w'}) \quad (4)$$

ahol ρ a víz sűrűsége.

Korábbi tanulmányokból ismert, hogy a fenékcsúsztatófeszültség és a mederfenéken kialakuló turbulens kinetikai energia mértéke között lineáris kapcsolat áll fenn (Soulsby és Dyer, 1981). Az arányossági tényező $C_1 \sim 0,19$ (Stapleton és

Huntley, 1995). A turbulens kinetikai energia (TKE) mértéke a sebességkomponensek turbulens fluktuációjából számítható:

$$TKE = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (5)$$

így

$$|\tau_b| = C_1 \rho E \quad (6)$$

Létezik továbbá egy alternatív formula is, mely kizárólag a függőleges irányú sebesség fluktuációjából származtatja a fenék-csúsztatófeszültséget (Soulsby és Dyer, 1981):

$$|\tau_b| = C_2 \rho w'^2 \quad (7)$$

ahol az arányossági tényező konstans $C_2 \sim 0,9$.

Hullámzások keltette turbulencia hatására kialakuló fenék-csúsztatófeszültség növekmény számítása esetén azonban ezek a számítások nem triviálisak, hiszen az áramlás iránya időben változó, továbbá a fő áramlási irány sem egyértelmű (pl. jelen tanulmány esetén, a mérések sarkantyúk közti limányban történtek, ahol a nyugalmi állapotban megjelenő áramlási sebességek jelentősen kisebbek a főmedrinél, így a hullámzás hatására kialakuló, partra merőleges áramlási irány volt a mértékadó). A fenti módszerek alkalmazhatósága ily módon nem egyértelmű, ezért egy negyedik számítási eljárást is teszteltünk, mely kifejezetten hullámzási paraméterek alapján becsli a fenék-csúsztatófeszültség értékét (Jonsson, 1966):

$$\tau_b^w = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2 \quad (8)$$

ahol f_w a hullám súrlódási tényező (Pleskachevsky, 2005):

$$f_w = 2 \sqrt{\frac{\nu}{U_w A}} \quad (9)$$

ahol U_w a maximális orbitális sebesség a mederfenéken, továbbá

$$A = \frac{U_w T}{2\pi} \quad (10)$$

Ez a módszer a vizsgált időintervallum alatt megjelenő legnagyobb feszültség értékét adja meg.

5. LSPIV

Az LSPIV egy modern, fejlődésben lévő mérési-adatfeldolgozási módszer, mellyel videofelvételek alapján van lehetőség kétdimenziós felszíni áramlási sebességmezők számítására (pl. *Muste et al., 2008*). A módszer elsősorban vízhozam becslésre lett kifejlesztve és sok szempontból jobb alternatívát jelent a klasszikus mérési eljárásokhoz képest (gyorsabb, olcsóbb). Az LSPIV az egymást

követő képkockákon keres jól beazonosítható foltokat vagy mintázatokat, melyek elmozdulását képes számszerűsíteni, így az egyes képkockák közt eltelt idő ismeretében számítható azok sebessége is. A módszer ereje gyorsaságában és egyszerűségében rejlik, terepi alkalmazásához mindössze egy videokamerára van szükség.

Az adatfeldolgozás során a felvételeket képkockákra bontottuk, majd a szoftver (*Jodeau et al., 2013*) a terepi mérések során rögzített referenciapontok alapján elvégzi a szükséges transzformációkat, hogy a vízfelszínre merőleges felülnézeti képet kapjunk:

$$\begin{aligned} i &= \frac{a_1 x + a_2 y + a_3 z + a_4}{c_1 x + c_2 y + c_3 z + 1} \\ j &= \frac{b_1 x + b_2 y + b_3 z + b_4}{c_1 x + c_2 y + c_3 z + 1} \end{aligned} \quad (11)$$

ahol $[i, j]$ koordináták a kép vonatkoztatási rendszerében (pixelben) és $[x, y, z]$ valós koordináták (méterben).

A képek transzformációját követően néhány számítási paraméter beállítása szükséges. Ezen paraméterek definiálása jelentős hatással van a későbbi eredmények minőségére.

- Vizsgálati cella (interrogation area – IA) mérete: annak a négyzetnek a területe [pixel²] amelyen belül a követni kívánt foltot/mintázatot keresi a program.
- Keresési téglalap méretei (search area –SA): azon téglalap oldalainak az IA középpontjától pixelben mért távolsága, melyben az algoritmus a következő időlépéshez tartozó képen keresi az IA-ban felismert mintázatot.
- Időlépés nagysága (δt): két képkocka rögzítése közt eltelt idő. Az elmozdulások meghatározását követően ez alapján kerülnek számításra a sebességvektorok.

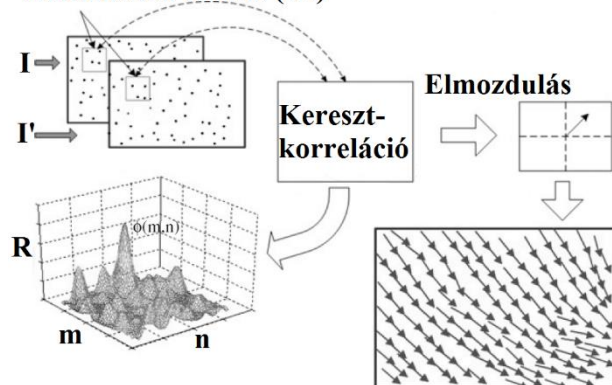
A fenti paraméterek beállítását követően egy rácshálót definiálunk a vizsgálni kívánt területre, melynek minden rácspontja egy IA középpontja lesz. Ezt követően a szoftver minden képkocka, minden pontjának IA-ja és az azt követő képkocka megfelelő pontjaihoz tartozó SA-ja közötti keresztkorrelációt (R) számítja:

$$R(a_{ij}; b_{ij}) = \frac{\sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} (A_{ij} - \overline{A_{ij}})(B_{ij} - \overline{B_{ij}})}{[\sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} (A_{ij} - \overline{A_{ij}})^2 \sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} (B_{ij} - \overline{B_{ij}})^2]^{1/2}} \quad (12)$$

ahol M_i és M_j az IA méretei pixelben; A_{ij} és B_{ij} a szürke árnyalatok intenzitása a két egymást követő téglalapban (IA és SA). A korrelációs együtthatók csak az adott rácsponthoz tartozó SA-n belül eső képpontokra lesz számítva. Minden rácsponthoz a legmagasabb korrelációs együtthatóhoz tartozó elmozdulás lesz elfogadva, melyből δt ismeretében

a sebességvektor is számításra kerül. Az algoritmus folyamatábrája a **6. ábrán** látható.

Lekérdezési terület (IA)

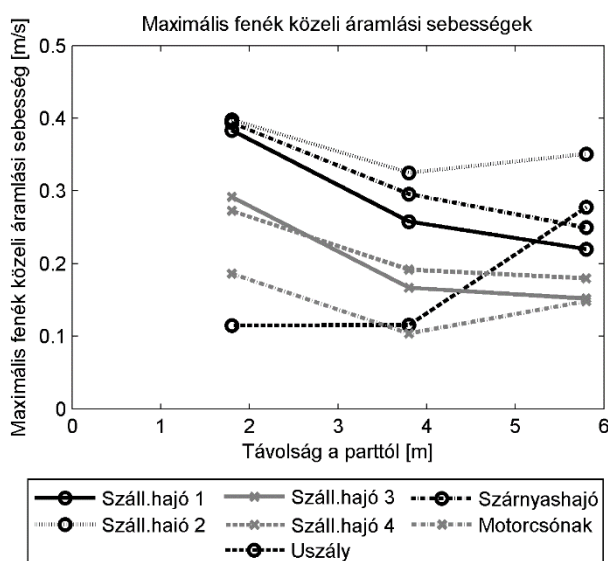


6. ábra – Az LSPIV algoritmus folyamatábrája (Jodeau et al., 2013)

Az így számított eredmények hibáinak szűrésére több lehetőséget is felkínál a program. Megadható, hogy az egyes rácspontokban számított elmozdulásokat milyen korrelációs tényező felett fogadjuk el helyes eredmények. Amennyiben R ezen határ alá esik egy adott időlépésnél, úgy abban a pontban az eredmény törölve lesz. Gyakran előfordult továbbá, hogy az algoritmus valószínűtlenül magas sebességeket ad eredményül. Ilyen jellegű hibák kiszűrése céljából, lehetőségünk van megadni egy ésszerű maximális áramlási sebesség értéket, amelynél magasabb értékű eredményeket a szoftver szintén elvet.

6. Eredmények

A mozgóátlagolással simított idősorok alapján meghatároztuk az egyes műszerek által mért maximális fenék közeli áramlási sebességeket a különböző hajók esetére.



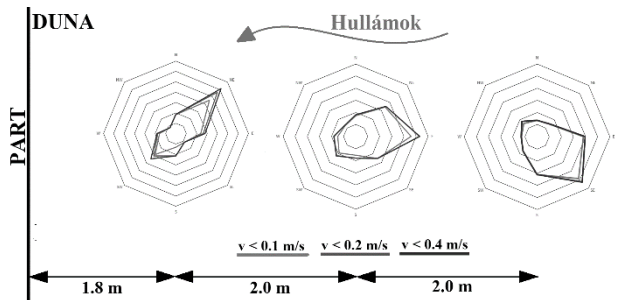
7. ábra – Maximális fenék közeli áramlási sebességek eltérő hajók esetén

Megfigyelhető, hogy a part közelében intenzívebb áramlási sebességek jelennek meg a mederfenéken, mely vélhetően nagyobb fenécsúsztatófeszültségeket is jelent. A magasabb csúsztatófeszültség nagyobb mértékű parteróziót, valamint nagyobb elragadó erők kialakulását eredményezi.

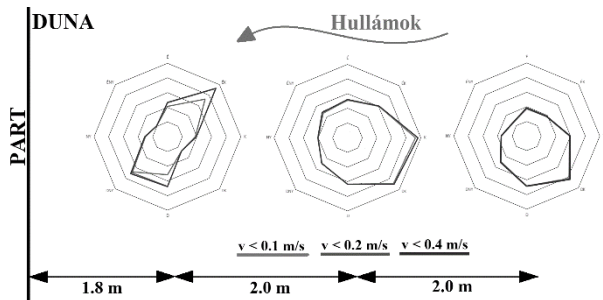
Érdekes kivétel az uszályhoz tartozó görbe, melyen épp ellenkező tendenciát figyelhetünk meg. Legegyszerűbben hibás méréssel magyarázhatnánk az eltérő mintázatot, azonban az adatsorok elemzésekor erre nem találtunk egyértelmű bizonyítékot. Fontos megjegyezni, hogy az uszály esetén a nyomásmagasságok idősora is körülbelül egy nagyságrenddel kisebb értékeket mutatott a többihez képest és a mérések során sem tapasztaltunk jelentős hullámtevékenységet, tehát előfordulhat, hogy valóban helyes a felrajzolt görbe, csak ez esetben a többitől jellegében eltérő hullámjelenség okozza azt.

A nagy időbeli felbontású sebesség idősorokat felhasználva megvizsgáltuk, hogy milyen térbeli karakterisztikát mutatnak a sebességvektorok egy teljes mérés esetén (~15 perc). A **8. és 9. ábrán** egy-egy szállodahajó, a **10. ábrán** egy szárnyashajó elhaladtát követő teljes mérési adatsor szélrözsza szerű megjelenítése látható.

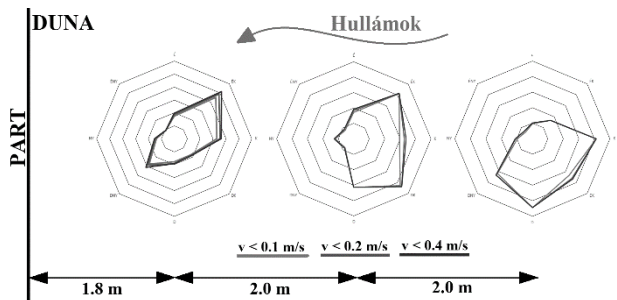
Az ábrák több jelenségre is felhívják a figyelmet. A part közelébe érkező hullámok – a hullámrefrakció következtében – tipikusan a parttal párhuzamosan, esetleg a párhuzamossal kis szöget bezárva érkeznek. Az ábrákon azonban megfigyelhető, hogy a két szélső ADV műszerhez tartozó eloszlásakra fő irányai közt közel 90°-os eltérés van. A hullámok terjedési sebessége tehát nem feltétlenül határozza meg a fenék közeli áramlási sebességek irányát. Fontos továbbá megjegyezni, hogy ez a mintázat minden hajónál megfigyelhető volt, azok haladási irányától függetlenül. Ez fontos észrevétel, hiszen a hajók haladási irányának függvényében más szögben válnak le a hullámok a hajótestről, így azok eltérő kezdeti irányultsággal közelítik meg a sekélyebb vizeket. Ennek fényében nem egyértelmű, hogy a sebességvektorok síkbeli eloszlásában nem jelenik meg ilyen jellegű eltérés. A jelenség okára egyértelmű magyarázatot nem találunk, mindazonáltal az ábrák egyértelműen felhívják a figyelmet a hullámterjedés térbeli komplexitására, és egyúttal arra is, hogy a megfelelő mérőműszerek segítségével ezek a jelenségek kvantitatív módon kimutathatók.



8. ábra – Horizontális sebességvektorok eloszlása a mederfenék közelében, felülről nézve (szállodahajó)

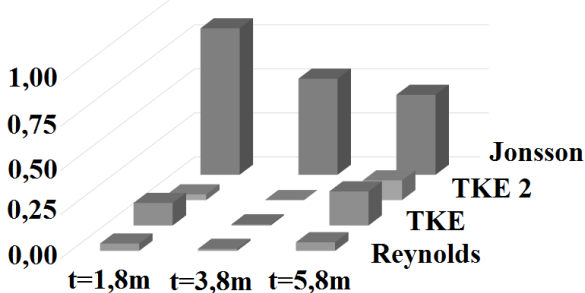


9. ábra – Horizontális sebességvektorok eloszlása a mederfenék közelében, felülről nézve (szállodahajó)



10. ábra – Horizontális sebességvektorok eloszlása a mederfenék közelében, felülről nézve (szárnyashajó)

Fenék-csúsztatófeszültség [N/m^2] - Szállodahajó

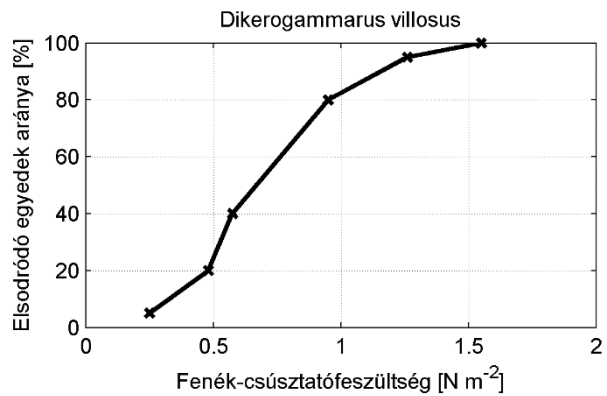


11. ábra – ADV adatokból, különböző módszerekkel számított fenék-csúsztatófeszültség értékek a parttól való távolság függvényében

A korábban bemutatott metódusok alapján, meghatároztuk az egyes hajók keltette hullámzások hatására megjelenő fenék-csúsztatófeszültség növekményeket. A 11. ábra egy szállodahajó példáján mutatja be a parttól különböző távolságokban számított eredményeket a négy ismertetett módszerrel.

Azok az eljárások, melyek a turbulens fluktuáció mértékéből származtatják a csúsztatófeszültségek értékét, akár egy nagyságrenddel is a Jonsson-féle módszer alá becsülnek, valamint tendencia nélküli eredményt adnak. Ez az összes hajótípus esetére kimutatható volt.

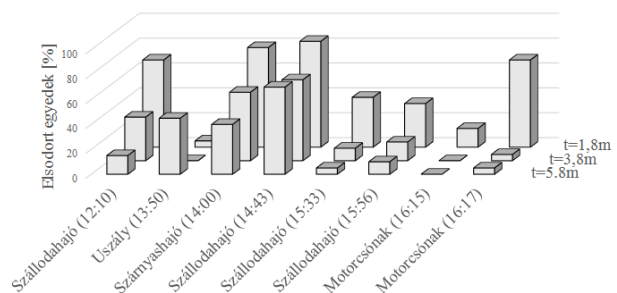
Egy korábbi tanulmányban (Gabel, 2012) megvizsgálták számos mederfenéken élő makrogerinctelen faj hullámok hatására bekövetkező elsodródása és a kialakuló maximális fenék-csúsztatófeszültségek értéke közötti kapcsolatot. A feszültségeket a Jonsson-féle módszerrel számították ADV mérések alapján, így a továbbiakban mi is ezeket az értékekkel dolgoztunk. Egy mintaalkalmazás bemutatása céljából az általuk meghatározott feszültség-elsodródó egyedszám kapcsolatát felhasználva becslést adunk az általunk meghatározott csúsztatófeszültségek hatására elsodródó egyedek hányadára. A *Dikerogammarus villosus* elnevezésű makrogerinctelen rákfaj esetére a következő kapcsolatot találták:



12. ábra – Elsodródó egyedek aránya a fenék-csúsztatófeszültség függvényében

A fenti ábrán látható kapcsolat alapján az összes elhaladó hajó esetére meghatároztuk a fenék-csúsztatófeszültség növekmény hatására elsodródó egyedek arányát, a három – partvontól különböző távolságban lévő – mérési pontra (13. ábra).

Elsodródott egyedek százalékos aránya különböző parttól mért távolságokban, más-más elhaladó hajók hatására



13. ábra – Elsodródó egyedek becsült aránya a mért csúsztatófeszültségek alapján a különböző hajótípusok esetén a parttól való távolság függvényében

Amennyiben feltételezzük, hogy az adott makrogerinctelen rákfaj hasonló megkapaszkodási képességekkel bírna a vizsgált Duna-szakaszon is, úgy a fent bemutatott eredmények alapján kijelenthető, hogy a folyami hajózás jelentős populáció csökkentő hatással lenne ezen élőlényekre, főleg a parthoz legközelebbi zónában. Mindazonáltal fontos hangsúlyozni, hogy az általunk bemutatott eredmények fő célja a vizsgálati módszertan ismertetése, valamint annak alkalmazhatóságának igazolása. Figyelembe véve, hogy erősen interdiszciplináris kutatási területről van szó, a jövőben szükségesnek látjuk az ökológus és biológus kutatókkal való együttműködést, hogy hazai szinten is megalapozhatóvá váljanak a hajók keltette hullámzások ökológiai hatásai.

A fenék-csúsztatófeszültség jellemzésén túlmenően megvizsgáltuk az LSPIV módszer alkalmazhatóságát a hajók keltette hullámok part közelében jelentkező áramlástan hatásának elemzésére. Erre elsősorban azért volt szükség, mert a megtörő hullámok zónájában az akusztikus mérési módszer nem megvalósítható, ugyanis az ADV műszerek csak állandó vízborítottságnál képesek mérni. A képelemzés alapú módszer esetén egyfelől azt kellett megvizsgálunk, hogy a hullámok megtörésekor keletkező hab megfelelően detektálható és követhető mintázatot jelent-e a LSPIV algoritmusnak, másrészt, hogy a módszer, mely elsősorban gyors vízhozam becslésre lett kifejlesztve (vagyis főleg permanens, egy fő áramlási iránnyal jellemezhető áramlások vizsgálatára), alkalmas-e ilyen térben és időben is dinamikus változó áramlástan viszonyok leírására. A nagy időfelbontású videó felvételeket a korábban bemutatottak szerint elemeztük. Az eredményeket a **14. ábra** szemlélteti. Az ábrák bal oldalán a nyers felvétel, jobb oldalán az adott képkockához tartozó számított sebességmező látható. Az alkalmazott skála 0,0 és 2,0 m/s közötti sebességintervallumot fed le, utóbbi előrevetíti, hogy nagyságrendileg ilyen maximális sebességeket tapasztaltunk az adatfeldolgozás során.

Az eredmények igazolják, hogy az LSPIV módszer alkalmasnak bizonyult a hullámok megtörésekor keletkező hab követésére és azok terjedése alapján a felszíni áramlási sebességek, illetve a hullámok terjedési sebességének számszerű kimutatására. A módszer jövőbeli alkalmazása további finomítást igényel mind a mérés kivitelezési, mind az adatfeldolgozási oldalról. Az eredmények ellenőrzésére jelenleg azonban nincs közvetlen lehetőség. Mindazonáltal fontos megemlíteni, hogy már folyamatban van a megtörő hullámok dinamikájának numerikus

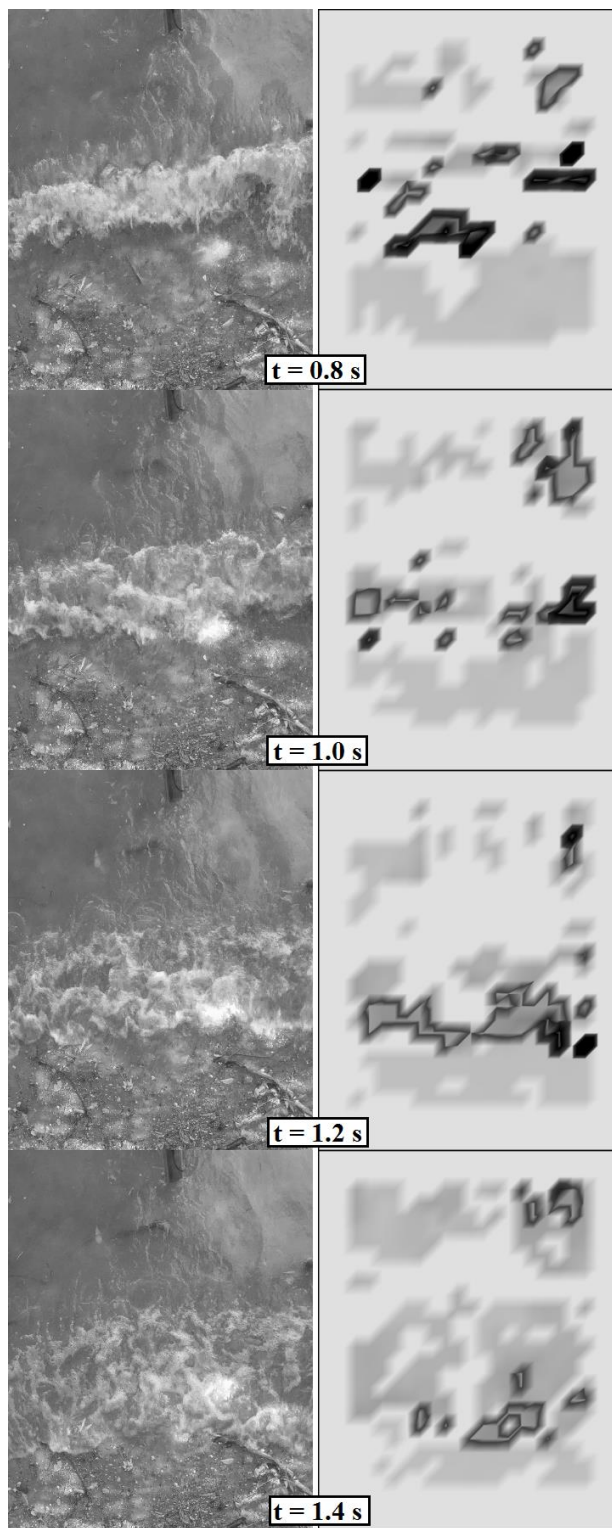
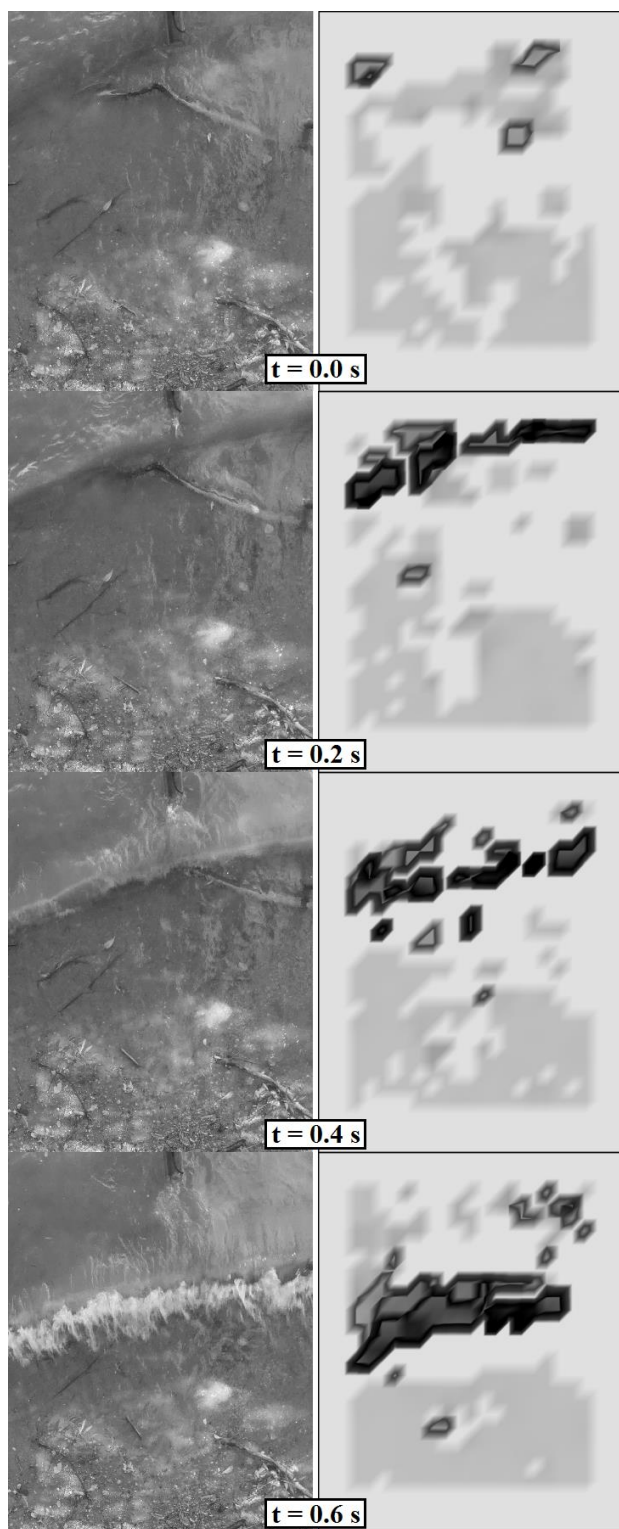
modellekkel történő vizsgálata, mely ezt a hiányt is pótolhatja. A megtörő hullámok sebességének ismerete alapot nyújthat a hullámok energiatartalmának meghatározására, amiből szintén az eróziós hatásra tehetünk becslést, vagyis az akusztikus és képelemzés alapú sebességmérési módszerek együttes alkalmazásával a teljes parti sávra elvégezhetjük a hullámok hatásának kvantitatív értékelését.

7. Diskusszió

A hajók keltette hullámzás kedvezőtlen hatása a folyók part közeli területeire a halbiológiai kutatások alapján már felismerésre került, de kézzelfogható kapcsolat felállítására a jelenséget meghatározó hidrodinamikai paraméterekkel alig találunk külföldi példát, hazai szinten pedig még nem foglalkoztak a témával. A jelen tanulmányban bemutatott eredmények világossá tették, hogy a hullámok által gerjesztett áramlási sebességnövekmények és a lokális fenék-csúsztatófeszültség átmeneti jelentős növekedése számszerűsíthető, sőt a megtörő hullámok dinamikája az LSPIV módszer segítségével szintén detektálható és kvantitatív módon értékelhető. Munkánknak értelemszerűen nem volt célja, hogy összekapcsolja a hullámzás fizikai paramétereit a vizsgált területre jellemző élőlények viselkedésével, de a témát gondozó biológus és ökológus kutatók számára felkínálja a mélyebbre ható összekapcsolt vizsgálatok lehetőségét.

A vizsgálat során számos kérdés és jövőbeli kutatási irány (pl. további mérési módszerek alkalmazása, a jelenségek vizsgálata numerikus hidrodinamikai modellezéssel) fogalmazódott meg. Emellett, a jövőben célszerűnek tartanánk kiterjeszteni a méréseket eltérő vízjárási állapotokra, eltérő mederanyaggal és eltérő áramlási viszonyokkal jellemezhető folyópartra, hogy a módszer általános alkalmazhatóságát igazoljuk. Az LSPIV módszer használatánál több mérés technikai finomítást lesz célszerű elvégezni (képbéállítás, állvány átalakítás, stb.) és indokolt további érzékenységvizsgálat végrehajtása is a számításban szereplő paraméterekre, mint pl. vizsgálati cella (IA) mérete, keresési téglalap (SA) mérete, stb. Az eljárás eredményeként kapott sebességmezőket a jövőben elragadó erők becslésre kívánjuk felhasználni, ahogyan azt az ADV alapú méréseknél is tettük. A megtört hullámok eróziós hatásának számszerűsítése azonban nem kézenfekvő feladat, további kutatást igényel. A kutatás folytatásában tervezzük a vizsgált hajók különböző geometriai és hajódinamikai mozgási paramétereinek hatását is vizsgálni, mint pl. merülési mélység, szélesség, hosszúság, hajócsavar

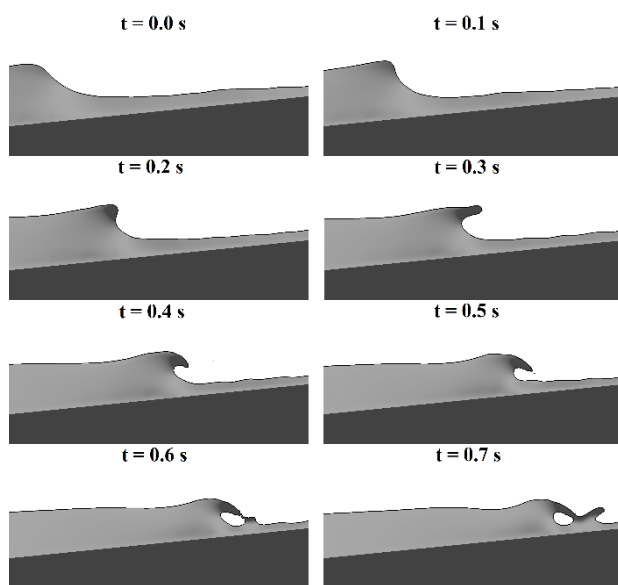
típusa, orr kialakítása, elhaladás sebesség, parttól való távolság, stb.



Velocity [ms⁻¹]: 0.00 0.20 0.40 0.60 0.80 1.00 1.20 1.40 1.60 1.80 2.00
 14. ábra – A parton megtörő hullámok fényképei és az LSPIV módszerrel számított sebességük 0,2 mp-es időlépéssel

A bemutatott korszerű terepi mérési és adatfeldolgozási módszerek kivétel nélkül támogatják a jelenségek számítógépes modellezéssel történő tanulmányozását. A megtörő hullámok ilyen jellegű vizsgálata már folyamatban van egy, a Norwegian University of Science and Technology (NTNU) egyetemen fejlesztett több

fázisú rendszerek kezelésére is alkalmas REEF3D nevű három-dimenziós hidrodinamikai modellel (Bihs, 2015). A modell korszerű szabad felszín számítási eljárása lehetőséget nyújt ilyen komplexitású áramlások pontos és stabil kezelésére is. A modellel számított eredmények ellenőrzésére az ADV-k sebesség idősorait használjuk, továbbá az LSPIV módszerrel számított eredmények is alkalmasak kölcsönös ellenőrzések végrehajtására. A modell ígéretes eszköznek bizonyul a hajók keltette hullámzások részletes vizsgálatára, mely azonban további terepi méréseket igényel. A 15. ábra egy, a mérések alapján paraméterezett modellel számított hullám megtörését mutatja be, hangsúlyozva a numerikus modellek alkalmazhatóságát a témában.



15. ábra – Megtörő hullám szimulációja REEF3D-vel

Az említett modell folyamatos fejlesztés alatt áll, jelenleg a víztérfogatban mozgó testek numerikus szimulációja már teszt fázisban van, mellyel lehetőség nyílik a hajók geometriájának, merülésének illetve haladási sebességének hatásvizsgálatára is.

8. Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönik a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék két munkatársának, Tóth

Károlynak és Pozsgai Istvánnak a terepi mérések során nyújtott segítséget. Köszönjük továbbá az MTA Bolyai János kutatói ösztöndíj által nyújtott támogatást, melyben Dr. Baranya Sándor részesül. Vizsgálatainkhoz segítséget nyújtott az MTA Támogatott Kutatócsoportok Irodája is.

9. Hivatkozások

1. Bihs H. (2015): REEF3D :: User Guide v15.04
2. Gabel F. (2012): Impacts of ship-induced waves on benthic macroinvertebrates. PhD Thesis, Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin
3. Joeau M., Hauet A., Le Coz J. (2013): Fudaa-LSPIV 1.3.2 - User guide. (version v03 07-15-2013)
4. Jonsson I.G. (1966): Wave boundary layers and friction factors. Proceedings of the 10th International Conference on Coastal Engineering, Tokyo, Japan, ASCE, pp 127–148
5. Krouzecky N., Fenton J.D., Huber B., Klasz G. (2013): Investigations of ship-induced waves on the Austrian Danube in the Donau-Auen National Park. 5th Symposium for Research in Protected Areas 10 to 12 June 2013, Mittersil pages 425-430
6. Liedermann M., Tritthart M., Hoyer H., Schludermann E., Keckeis H., Habersack H. (2009): Effects of vessel-induced waves on different bank types and their impact on the 0+ fish fauna. 7th ISE & 8th HIC, Chile
7. Muste M., Fujita I., Hauet A. (2008): Large-Scale Particle Image Velocimetry for measurements in riverine environments. Water Resources Research Vol. 44(4)
8. Pleskachevsky A., Gayer G., Horstmann J., Rosenthal W. (2005): Synergy of satellite remote sensing and numerical modeling for monitoring of suspended particulate matter. Ocean Dynamics 55(1):2–9
9. Soulsby R. L., and Dyer K. R. (1981): The form of the near-bed velocity profile in a tidally accelerating flow. J. Geophys. Res., 86,8067–8074.
10. Stapleton K. R., and Huntley D. A. (1995): Seabed stress determination using the inertial dissipation method and the turbulent kinetic energy method. Earth Surface Processes and Landforms, 20, 807–815.

Field investigation of ship induced waves in the littoral zone

G. Fleit, S. Baranya, T. Krámer, J. Józsa

Abstract: The hydrodynamic effects of ship induced waves were investigated in the littoral zone of the Hungarian Danube with special focus on the bottom shear stress. Local increase of the bottom shear stress might detach macroinvertebrates and fish eggs from the substrate which is lethal for them in most of the cases. Quantitative evaluation of this parameter required the deployment of several synchronized acoustic velocimeters. The high time resolution data series were analyzed with statistical methods, and the effects of different ship types, such as barge, hydrofoil, motorboat, hotel ship, were investigated on the river bed. A new type of application of the Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) was also presented. With this method the hydraulic characteristics of the approaching and breaking waves were investigated at the bank, based on video records. The results pointed out the spatial and temporal complexity of ship induced waves, moreover, proved that these hydrodynamic phenomena can be characterized by up-to-date measurement devices and suitable data analysis methods.

Keywords: ADV, Danube, bottom shear stress, ship induced waves, LSPIV, field measurements

**FLEIT GÁBOR
BARANYA SÁNDOR**

Építőmérnök BSc (2015), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem MSc hallgatója
okl. mérnök (2003), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének egyetemi docense.

KRÁMER TAMÁS

okl. mérnök (1998), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének egyetemi docense.

JÓZSA JÁNOS

okl. mérnök (1981), MTA doktora (2003), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem rektora, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára, az MTA-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoport vezetője