

Hajók keltette hullámozás hatásának terepi feltárása a litorális zónában

TDK Dolgozat

Szerző:

Fleit Gábor

Konzulensek:

Dr. Baranya Sándor

Dr. Józsa János

Dr. Krámer Tamás

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest, 2014



Tartalom

Kivonat	3
1 Bevezetés	4
1.1 Háttér	4
1.2 Hajók keltette hullámzások halakra gyakorolt hatásai	6
2 Szakirodalmi kitekintés	7
3 Témaválasztás indoklása	13
4 Vizsgálati terület bemutatása	13
5 Terepi mérések	14
5.1 Alkalmazott mérési eljárások	14
5.1.1 Akusztikus Doppler-elvű sebességmérés	14
5.1.2 LSPIV	16
5.2 A mérési kampány	18
6 Adatfeldolgozás	22
6.1 Hullázási paraméterek	22
6.2 Fenékközeli áramlási sebességek	24
6.3 Fenék-csúsztatófeszültségek becslése	29
6.3.1 Turbulens fal-törvény	29
6.3.2 Reynolds-féle fenékközeli feszültség	29
6.3.3 Turbulens kinetikai energia (TKE)	30
6.3.4 Fenék-csúsztatófeszültségek becslése hullámzási paraméterek alapján	31
6.4 Videofelvételek feldolgozása LSPIV-vel	32
7 Eredmények	36
7.1 Fenék-csúsztatófeszültségek (ADV mérésekből)	36
7.2 Elsodort makrogerinctelenek (mintaalkalmazás)	40
7.3 LSPIV-vel számított sebességmezők	43
8 Összefoglalás	47
9 Következtetések	48
10 Irodalomjegyzék	51



Kivonat

A hajókkal történő áru- és teherszállítás napjainkig az egyik legkörnyezetkímélőbb fuvarozási formaként ismeretes, mindazonáltal köztudott, hogy a járművekből szivárgó olajok és üzemanyagok káros hatással vannak a vízminőségre és így a vízi élővilágra is. Számos egyéb hatás ismert még, azonban ezekről keveset tudunk. Jelen dolgozatban a hajók keltette hullámok partközelségben megjelenő áramlástanai hatásait vizsgáljuk, különös tekintettel a fenékcsúsztatófeszültségre. A kialakuló feszültségek komoly hatással vannak a mederfenéken élő makrogerinctelenekre, valamint a halak oda lerakott ikráira. Megfelelően nagy értékek esetén ezek az élőlények elsodródhatnak olyan nagy áramlási sebességek uralta területekre, ahol túlélési esélyük zérushoz közeli. Külföldi tanulmányokban már találunk példát a probléma ökológiai szempontú vizsgálatára, de mérnöki szempontú célirányos áramlástanai vizsgálatok alig állnak rendelkezésre, hazai szinten a kutatási téma pedig egyértelműen hiánypótló.

Munkámat szakirodalmi kitekintéssel kezdem, mely egyben iránymutató is volt a további elvégzendő munkarészek felé. Ezt követően felmértük a terepi adatgyűjtéshez alkalmazható és rendelkezésre álló eszközöket, amelyek közül a legfontosabb szerepet a pontbeli akusztikus sebességmérő műszerek (ADV - Acoustic Doppler Velocimeter) játszották. Több eszköz párhuzamos használatával a Duna Sződligeti szakaszán végeztünk méréseket, melyek során számos különböző hajótípus (uszály, szárnyashajó, utasszállító hajók) által keltett hullámok mederfenék közeli sebesség-idősorát rögzítettük a folyó part menti sávjában. A nagy időfelbontású adatsorok alapján a hajók keltette hullámozás egyes szakaszait jellemeztük statisztikai módszerekkel, hullámmagasság, áramlási sebesség és fenék-csúsztatófeszültség paraméterekkel. A dolgozatban továbbá próbát teszek a hullámozás part menti mozgásának időben változó sebességmezővel való leírására is, amihez a Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) módszert alkalmazom. A vizsgálat eredményei rámutatnak a hullámjelenségek térbeli és időbeli összetettségére, de egyúttal igazolják annak kimérhetőségét is. A dolgozat eredményei lehetőséget adnak arra, hogy a különböző hajótípusok keltette hullámok élőhelyre gyakorolt hatását feltárjuk, és az ökológiai vizsgálatokat számszerű adatokkal támogassuk meg.



1 Bevezetés

A belvízi hajóutak a Föld felszínének 0,8%-át teszik ki. Ez világszerte ~900, Európa szerte ~36 ezer kilométer belvízi hajóutat jelent. Ezeken a területeken változó súlyossággal ugyan, de megjelennek a hajózás környezetkárosító hatásai. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy a kedvezőtlen hatások ellenére, jelenleg mégis a hajózás az egyik leggazdaságosabb és legkörnyezetkímélőbb teherszállítási és utazási forma a világon.

Ezen hatások vizsgálata szünet nélkül folyik, szinte mindig aktuális téma és sok tudományterületet érint. Foglalkoznak a hajókból szivárgó olajok, üzemanyagok és más poliaromás szénhidrogének vízminőségre gyakorolt hatásával és ennek ökológiai vonzataival. Általánosságban elmondható, hogy ezen anyagok jelenléte az élővizekben negatív hatással van a vízi élőlények növekedésére, fejlődésére és reprodukciójára is.

A hajók motorjai és propellerei is károsíthatják egy vízfolyás élővilágát, és itt nem pusztán a mechanikai hatásokból eredő sérülésekre kell gondolni. Ezek az alkatrészek rendkívül erős zajt bocsátanak ki működésük közben, így könnyen károsíthatják például egyes halfajok érzékszerveit, hallásukat. A káros hatás természetesen felerősödik olyan fajok esetén, melyek elsősorban hallásukra támaszkodva tájékozódnak illetve jutnak élelemhez (ragadozó halak).

Egy másik gyakran vitatott hatás, mely közvetlen és közvetett módon is származtatható a hajózásból, a biodiverzitás csökkenése. Előfordul ugyanis, hogy a teherszállító hajók, a ballasztvizükben több száz vagy akár több ezer kilométerre szállítanak olyan vízi élőlényeket (pl. halakat) melyek a ballasztvíz későbbi kieresztésének helyén nem őshonosak. Egy másik, közvetettebb, de hasonló következménnyel járó tevékenység a hajózási célú csatornák építése. Ilyen mesterséges vízi útvonalak építésekor előfordul, hogy eltérő ökoszisztémájú, korábban biogeográfiaiilag elszigetelt víztestek kerülnek közvetlen kapcsolatba egymással. A fent említett jelenségek elsőre talán épp a biodiverzitás növekedéséhez látszanak hozzájárulni, azonban ezek a biológiai rendszerek általában instabil viselkedést mutatnak ilyen jellegű külső behatásokra, így egyes – esetenként invazív – halfajok kiszoríthatják az őshonos egyedeket eredeti élőhelyükről, amivel tehát összességében a biodiverzitás degradációját okozhatják.

Vízmérnöki oldalról azonban aligha tisztünk ítéletet hirdetni a fent említett kérdésekben, mindazonáltal az egyik legfontosabb hatás, a hajók keltette hullámmások megértése és hatásuk vizsgálata már saját feladatunknak tekinthető.

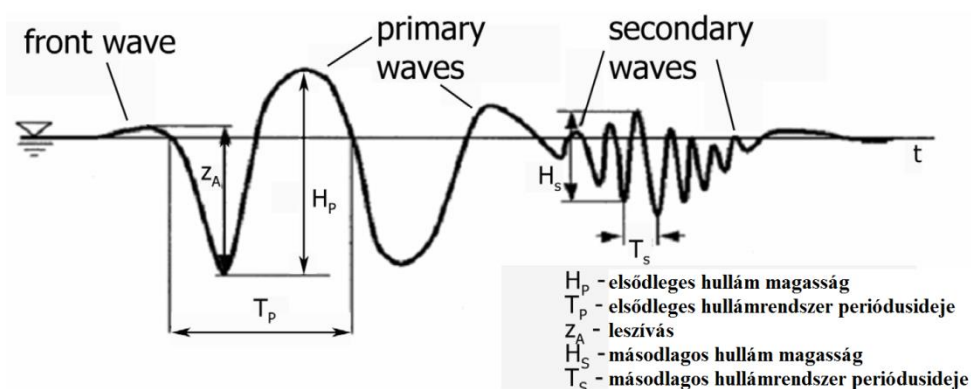
1.1 Háttér

A hajók keltette hullámok abból adódnak, hogy a víztest nyugalmi állapotban lévő felszínét a hajó megzavarja egyensúlyában, ugyanis a hajó orra folyamatos nyomást fejt ki a vízterre

frontális és oldalirányban, minek hatására a vízszint a hajó orránál megemelkedik, ezzel egyidejűleg a hajótest mellett leszívás jön létre, mellyel egyenértékű többlet vízmennyiség farhullám formájában a hajó után jelenik meg. A víztest egyes részei tehát más-más szintekbe kerülnek, ezzel a vízrészecskék függőleges mozgásba lendülnek, a szomszédos vízrészecskékkal együtt, mivel azok a gravitáció hatására igyekeznek visszatérni dinamikus egyensúlyi helyzetükbe. Ez a mozgás, csillapítottan ugyan, de továbbterjed a víz felszínén. Fontos azonban megjegyezni, hogy a víz ilyen irányú mozgása csak látszólagos – feltéve persze, hogy sem szél, sem más oldalirányú erő nem hat a vízfelszínre –, a víz részecskék ellipszis pályákon mozognak.

A hullámok fizikai paraméterei szoros kapcsolatban állnak az adott víztest morfológiai és hidrodinamikai jellemzőivel. Folyók esetén általánosságban elmondható, hogy minél szélesebb és sekélyebb a vízfolyás, annál nagyobb hullámverést szenvedhet el a hajók, vagy akár a szél keltette hullámzásoktól. Ilyen tekintetben a Duna igencsak „vékony” folyónak tekinthető, az átlagos mélység/szélesség aránya közelít az 1/100-hoz. A hajók keltette hullámok jellemzőit ezen felül nagyban befolyásolják a járműveket jellemző különböző paraméterek is. Ilyen fontos befolyásoló tényező például a hajók mérete, merülése, alakja valamint a haladási sebessége is.

A hajók keltette hullámok rendkívül komplex rendszert alkotnak, különösen heterogén morfológiai viszonyok közt, ami egy természetes vízfolyás esetén adott körülmény. Egy hullám szerkezete három jól elkülöníthető részből tevődik össze: kezdeti vízszint csökkenés (leszívás); elsődleges (primer) hullámrendszer, általában nagy periódusidővel; másodlagos (szekunder) hullámrendszer melyet kisebb periódusidők jellemeznek (1. ábra).



1. ábra – Hajók keltette hullámrendszer részei és paraméterei

Az elsődleges vízmozgás a hajó által okozott víztér megmozdulásával áll kapcsolatban, ami a vízszint süllyedését és a visszaáramlást foglalja magába. A visszaáramlás a hajótest melletti és alatti víztér elmozdulásával egy időben jelenik meg. A kialakuló másodlagos hullámrendszer



szintén a hajók keltette vízmozgásból származik, de ezek rövid hullámok. Amplitúdójuk nagyban függ a hajó sebességétől, valamint a hajótest alakjától és annak méreteitől. Ezért tapasztalható az, hogy a kisebb, de gyorsabb hajók szekunder hullámai nagyságrendben megközelítik a primer hullámokat.

1.2 Hajók keltette hullámozások halakra gyakorolt hatásai

A bevezetésben több ökológiai szempontból káros hatást (és azok kiváltó okait) mutattam be. Dolgozatom célkitűzése azonban az, hogy megismerjem a hajók keltette vízmozgások hidraulikai és hidromorfológiai jellegzetességeit különböző karakterisztikájú hullámok esetén is. Amikor már pontosan ismerjük ezeket a jelenségeket és számszerűsített, mért és számított eredményekkel is rendelkezünk, elkezdhetünk vizsgálni a vízmérnöki tudomány határterületein is, így górcső alá kerülhetnek a hajók keltette hullámozások vízi élőlényekre gyakorolt hatásai is. Fontosnak tartom itt megjegyezni, hogy nem célirányos hidrobiológiai vizsgálódásokba vágnánk a fejszénket, a mi munkák célja a témában aktív biológusok mérnök oldalról történő támogatása, valamint a két tudományág képviselői közötti érdemi párbeszéd kialakulásának elősegítése. A korábban említettekhez hasonlóan, ez is egy gyakran vitatott téma a szakirodalomban, és összetettebb, szerteágazóbb következményei vannak, mint az elsőre gondolhatnánk.

Az első és talán legközvetlenebb jelenség, az ikrák és ivadékhalak kisodródása a biztonságot nyújtó élőhelyükről. Ahogy a hullámok az alacsonyabb vízszintű, part menti zónákba érkeznek úgy azok hatása már a mederfenéken fokozottabban megjelenik, többek közt a fenék-csúsztatófeszültség növekedésében. A megnövekedett feszültségek kellően nagyok lehetnek ahhoz, hogy megmozgassák az ott – normál áramlási körülmények közt stabil állapotban – lévő mederanyagot. Ez a stabilitás az, amiért a folyami halak kedvelt ívóhelyeül szolgálnak az ilyen jellegű part közeli szakaszok, ugyanis ebbe a mederanyagba rakva ikráikat, azokat – többé-kevésbé – biztonságban tudhatják a ragadozók elől, valamint a kikéltést követő időszakban az ilyen kavicsokon, illetve azok közt található mikroszkópikus élőlények elengedhetetlen tápanyagforrást jelentenek a lárva állapotban lévő halaknak. Abban pillanatban azonban, ahogy ez a mederanyag jelentősebb mozgásba lendül, felkavarodik, a látszólagos biztonságnak vége és az ikrák könnyen kisodródnak a mélyebb, mostohább áramlású zónákba, ahol túlélési esélyük zérushoz közeli. Az ivadék halak kilátásai sem jobbak, a hajók keltette hullámrendszerek első szakaszában ugyanis a leszíváskor, a part folyásirányra merőleges esésének függvényében akár több méterrel is beljebb kerülhetnek, ahol a nyugalmi vízszint visszaálltakor olyan áramlási sebességekkel találkozhatnak melyekre



koruknál fogva nincsenek felkészülve, így sok esetben nincs esélyük visszakerülni az enyhébb sebességű zónákra, ami ugyancsak a veszélyt jelentheti.

Egy másik jelenség, mely a hajók keltette hullámzásokhoz köthető, a lebegtetett hordalék mennyiségének növekedése az alacsony vízszintű zónákban. Ezeken a területeken, ahol a hullámok hatása a mederfenéken is megjelenik, az ott lévő finom szemcsék kimozdulnak nyugalmi helyzetükből és lebegni kezdenek. Ez a jelenség szél keltette hullámok esetén is megjelenik, azonban a hajók keltette hullámok esetén a hatás a sokszorosára is felerősödhet. Megjegyzendő, hogy ezeken a területeken a hullámzások ideje alatt a turbulencia is fokozódik, így a mederből felúszó, most már lebegtetett hordalék ülepedése is lassabban, nehezebben következik be. A litorális zónában nagy mennyiségben megjelenő lebegtetett hordaléknak számos ökológiai következménye ismert. Hatására csökken a víz átlátszósága, így a bejutott napfény mennyisége is. Ebből következik, hogy a fitoplanktonok kevesebb fényhez jutnak, mely limitálja a növekedésüket és reprodukciójukat, valamint a biofilm réteg vastagsága is lecsökken. Ezek a növényi planktonok azonban fontos tápanyagforrást jelentenek a litorális zóna élővilágának, így például a halaknak is. A víz átláthatóságának csökkenése azonban más szinten is károsíthatja a part menti zónák ökológiai stabilitását, ugyanis a vizuálisan tájékozódó halfajok a táplálékszerzés során jelentős hátrányba kerülnek azon társaikkal szemben, melyekre különösebb hatással nincs a lebegtetett hordalék mennyiségének növekedése.

2 Szakirodalmi kitekintés

A Donau-Auen Nemzeti Park (Krouzecky et al., 2013) végzett egy kutatást, amely a hajók keltette hullámzások fizikai jellemzőinek vizsgálatát célozta. A méréseket a Duna Bécs és Pozsony közötti, vízlépcsőktől mentes szakaszának litorális zónájában végezték. A Duna Európa egyik legjelentősebb belvízi hajóútja, így a járművek keltette hullámzások élőhely védelmi szempontból komoly kihívást jelentenek a nemzeti park számára.

A mérések során összesen 40 elhaladó hajó hatását rögzítették, nagy időbeli felbontással. Mérték a hajók keltette hullámok frekvenciáját, azok maximális és minimális magasságát valamint a hullámzás időtartamát. Az adatokat a statisztikai analízis során rendezték a hajók típusa, alakja és sebessége szerint. Rögzítették továbbá – a pontos idővel együtt – az elhaladó hajók típusát, irányát (hegymenet/völgyment), partvontaltól való távolságát valamint az adott mérési helyszínen a part folyásirányra merőleges esését. A hajókat illetően további adatokat nyertek a DoRIS-nak (Danube River Information Services) köszönhetően, a rendszer ugyanis a hajók pontos GPS koordinátáit, méreteit, merülését valamint pillanatnyi sebességét is tárolja.

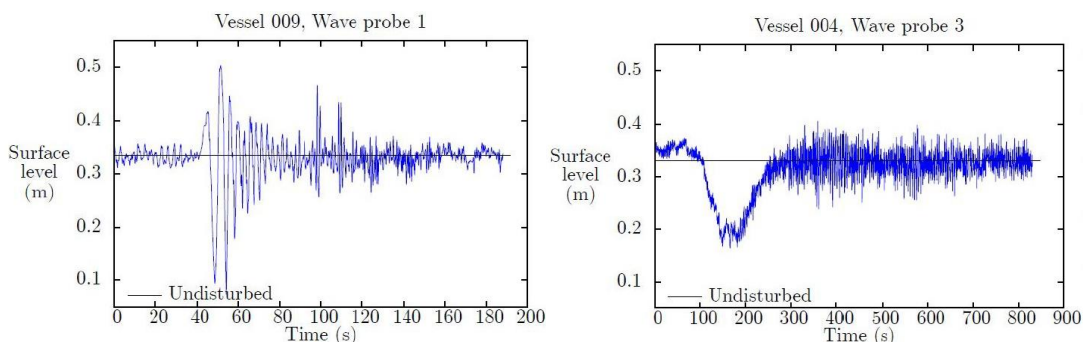
A terepi mérésekhez egy kísérleti műszer installációt alakítottak ki (**2. ábra**). A rendszer három vízszint mérőből állt, melyek háromszög alakban voltak elhelyezve, így számítható volt a hullámok terjedésének iránya is. Mérték továbbá a hullámok terjedési sebességét, valamint az adott part rézsűjére való felfutásukat is.



2. ábra – Kísérleti mérőműszer installáció

A mérések eredményei közül két jellemző hullámképet emelnék ki (**3. és 4. ábra**). (Az ábrákon a vízszintes kék vonal jelöli a nyugalmi vízszintet). A **3. ábra** egy Bécs és Pozsony közt menetrendszerűen közlekedő gyors utasszállító katamarán (Twin City Liner) hullámképét mutatja. A hajó által keltett hullámokat gyakorlatilag nem előzte meg leszívás és a mért legnagyobb hullámmagasságokat is ezek elhaladtakor rögzítették.

A **4. ábrán** egy két uszályos tolóhajó keltette hullámozás vízszintjei láthatók az idő függvényében. Jól látható különbségek vannak a két ábra közt. A bárka elhaladása előtt jelentős leszívás tapasztalható (~20 cm), továbbá az is feltűnő, hogy a **4. ábrán** sokkal magasabb frekvencián érkeznek a hullámok, ráadásul közel azonos hullámmagasságokkal. Az eredmények alapvető következményének azt tartom, hogy nem szabad feltétlenül egy kalap alá venni minden jelentősebb hullámot keltő vízi járművet, ugyanis látható, hogy hajó és hajó közt is milyen szignifikáns különbségek lehetnek a hullámok fizikai jellemzőiben, és így vélhetően azok hatásai is erősen differenciáltak lehetnek a part menti zóna morfológiájára és ökoszisztémájára.

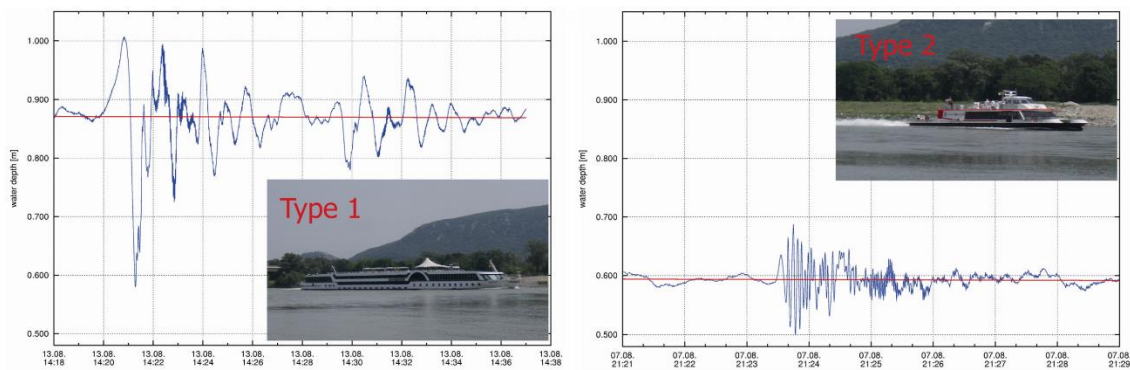


3. és 4. ábra – A gyors utasszállító katarán (balra) valamint a két uszályos bárka (jobbra) keltette hullámok

Egy korábbi, ugyancsak osztrák tanulmányban (Liedermann et al., 2009), a Duna ugyanezen szakaszán végeztek méréseket a hajók keltette hullámlások ivadékhalakra gyakorolt hatásának vizsgálata céljából. A kutatás hasonló megfontolásokból indult, mint a nemzeti park esetében. Három vizsgálati ponton végeztek terepi méréseket: egy sarkantyúk közötti területen, egy öbölben, valamint egy kisebb, folyó építette kavics sziget környezetében. Erre azért volt szükség, mert a hajók keltette hullámlások karakterisztikája nem pusztán a jármű méretétől, merülésétől, alakjától és sebességétől, de a part morfológiájától és a part közeli vízmélységektől is erősen függ.

A hullámok méréséhez két DOBIE (NIWA Instrument Systems, Új-Zéland) elnevezésű hullámlás mérőt alkalmaztak. A műszer 1 mm-es pontossággal és 5 Hz-es mérési frekvenciával dolgozik, így kellően sűrű és pontos adatot tudott biztosítani a kutatóknak. Mindhárom területen 20-20 napon keresztül végeztek méréseket, így különböző hidrológiai állapotokban is meg tudták vizsgálni a hullámok természetét. Mérték a hajók elhaladtának áramlási sebességre gyakorolt hatását Doppler-elvű sebességmérővel (ADV), lebegtetett hordalékmennyiséget, távolságot a partvonal és hajók közt, a hajók sebességét valamint videó analízis alapján a hullámok által nedvesített és szárazra került területeket is. Az abiotikus paraméterek mérésén felül, a háromból két mérési területen (kavics sziget, öböl) a part közelébe kisodródott halak számát is rögzítették, melyeket speciális, fixen rögzített hálókkal fogtak. Ezeket a hálókat 15 percenként ürítették, a hajók elhaladtától függetlenül.

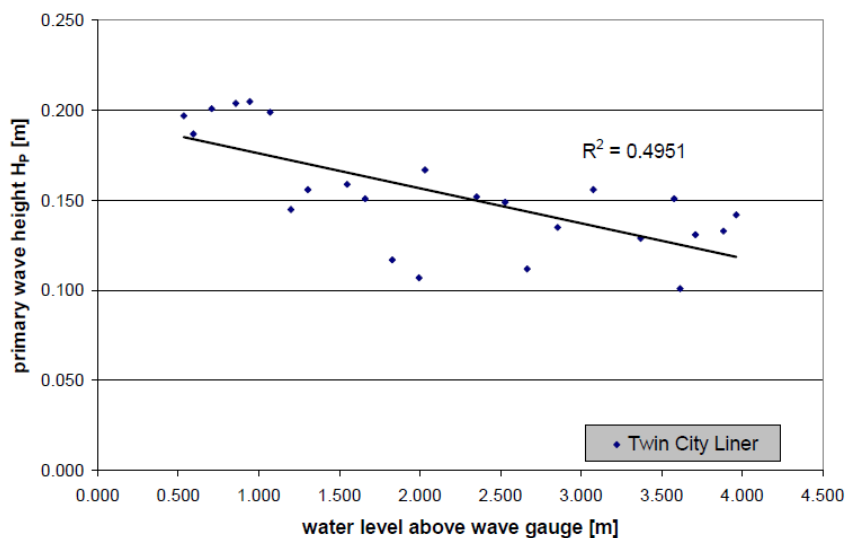
A hullámok hatását illetően a hullámmagasságot tartották a domináns paraméternek, így az adatfeldolgozás során is ennek volt elsődleges szerepe. A legnagyobb elsődleges hullámokat két hajó típus keltette: a nagy személyhajók és a már korábban említett Twin City Liner, így ezeket vizsgálták részletesebben a továbbiakban. A hajók hullámképei az **5. és 6. ábrán** láthatók.



5. és 6. ábra – A nagy személyhajó (balra) és a Twin City Liner (jobbra) keltette hullámok

A **5. ábrán** megfigyelhető a szállodahajó keltette első és legmagasabb hullám, melyet jelentős leszívás és nagy periódusidejű másodlagos hullámozás követ. Az **6. ábrán** látottak egybeesnek **3. ábra** tanulságaival. A hullámok kis periódusidejűek, a nyugalmi vízszinthez képest pozitív és negatív irányban is közel azonos nagyságú, fokozatosan csökkenő mértékű oszcilláció figyelhető meg az idő múlásával.

Az adatfeldolgozás során kimutatták, hogy az elsődleges hullámmagasság pozitívan korrelál a hajó parttól mért távolságától, valamint, hogy erős függés van a hullámmagasságok és az aktuális hidrológiai állapot között is. Az öbölben mért, Twin City Liner által keltett hullámmagasságok, valamint a nyugalmi vízszint közötti kapcsolatot vizsgálták, és azt tapasztalták, hogy kisebb vízmélységek esetén nagyobbak az ébredő hullámok. 24 mérési pont alapján $R^2=0,495$ -ös korrelációjú összefüggést állapítottak meg (**7. ábra**).



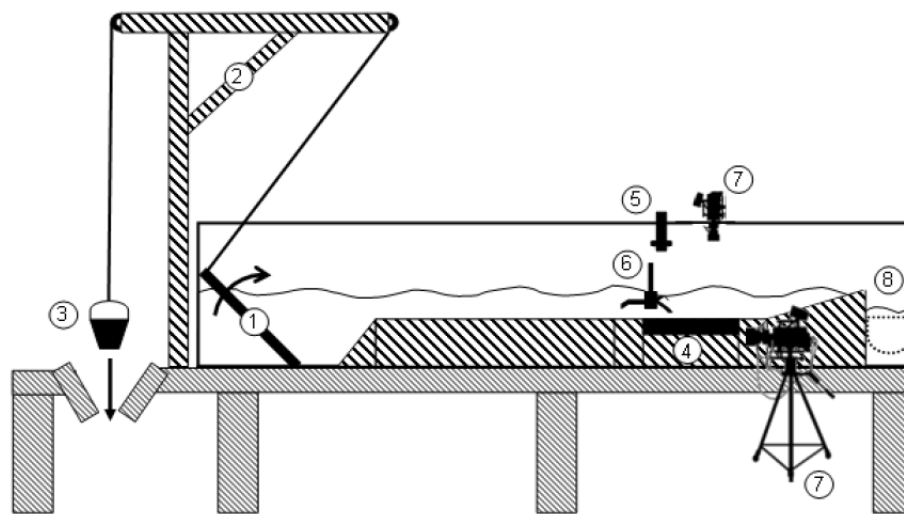
7. ábra – A nyugalmi vízszintek és a Twin City Liner által keltett elsődleges hullámmagasságok közötti korrelatív kapcsolat

A befejezésben kimutatták, hogy a part közelében lévő halak hajlamosak besodródni a mélyebb és nagyobb áramlási sebességű zónákba. Kisvízi állapotban, egy hajó keltette leszívás akár több méterrel is beljebb viheti a partvonalat, melynek hatására az ivadék halak

olyan áramlási sebességű területekre kerülnek, mely esetenként meghaladhatja az ök – életkorukból adódó – maximális úszási teljesítményüket.

Egy viszonylag friss, mégis a szakirodalomban gyakran hivatkozott doktori értekezés is része volt az irodalomkutatásomnak, ami a hajók keltette hullámzások makrogerinctelenekre gyakorolt hatásait taglalja (Gabel, 2012). Az anyagból számomra két fejezet volt kiemelkedően tanulságos illetve a dolgozat szempontjából releváns, ami különböző élőhely típusok (ezeket a mederanyaguk alapján különíti el), a hullámzások hatására kialakuló fenékcsúsztatófeszültségek, valamint makrogerinctelen fajok elragadásának kapcsolatait vizsgálja.

A szerző elsőként laboratóriumi kísérletekről ír, ahol külön erre a célra kifejlesztett és felépített hullámkeltő szerkezettel (8. ábra) végez vizsgálatokat.



8. ábra – A kísérleti hullámkeltő szerkezet

A szerkezeten egy állítható súllyal mozgatható billenő lap kelti a hullámokat. A hullámok áthaladnak egy cserélhető tálcán, amin különféle mederanyagokra telepített makrogerinctelenek találhatók. A kísérlet célja, hogy különböző vízmélységekben, különböző súlyok hatására keltett hullámok esetén vizsgálják, hogy a kezdeti élőlény állományból ($n=20$) mennyi sodródik le a szerkezet végén található hálóra. A hullámok hidraulikai paramétereit ADV-vel és akusztikus hullámmérővel mérik, valamint minden esemény rögzítésre kerül egy videokamerával is. A fenék-csúsztatófeszültséget a következő formulával számították:

$$\tau = \frac{1}{2} f \rho U_b^2$$

ahol ρ a víz sűrűsége; U_b a maximális orbitális sebesség a fenéken (ADV-vel mérve), f pedig a súrlódási faktor a következő formula alapján (Dyer, 1986):

$$f = 2 \sqrt{\frac{\nu}{U_b A_b}}$$

ahol ν a víz kinematikai viszkozitása; A_b a fenékhullám maximális amplitúdója.



Összesen öt különböző, litorális zónában előforduló élőhely típust alakítottak ki a tálcákon. Ezeket különböző mederanyagok használatával építették be: nádas, fagyökerek, homok, kő és elhalt faágak. Az öt különböző habitatra az egyes vizsgálatok során öt különböző mederfenéken élő gerinctelen fajt telepítettek, ezzel vizsgálva azt is, hogy a különböző fajok mennyire képesek rákapaszkodni az eltérő mederanyagokhoz. A különböző fajok ezen képességét nagyban befolyásolja eltérő formájuk, valamint a sajátos technika ahogyan a mederanyagra rátapadnak.

A laboratóriumi mérések eredményeit szükségesnek vélték alátámasztani terepi mérésekkel is, így hasonló rendszerben (5 habitat, 5 faj) elvégezték a méréseket egy közeli természetes tó partján is. A terepi installáció lényegében egy alulról, felülről és előlről nyitott ketrec volt, benne a laboratóriumihoz hasonló mederanyag telepítve, rajtuk az apró állatokkal. A könnyebb láthatóság céljából az egyes egyedeket megfestették. A hullámokat nyomás alapon működő hullámzásmérővel, a fenékközeli áramlási sebességeket Vectrinoval mérték. A hullámokat egy 6,5 méter hosszú hajóval keltették, mellyel a parttól különböző távolságokban (20 és 35 m) különböző sebességekkel ($9-18 \text{ km h}^{-1}$) haladtak el a mérési állomás előtt.

A laboratóriumi körülményektől csak kis mértékben mértek eltérő értékeket, tehát kijelenthető, hogy a kifejlesztett szerkezet megfelelő eredményeket produkál.

Kimutatták, hogy adott paraméterekkel bíró hullámok esetén sokkal inkább a habitat jellege befolyásolja az elragadott egyedek számát, mint az adott élőlény faja. Az adott élőhely morfológiai komplexitása jobb menedékhellyé teszi azt, a kimosott egyedek száma szignifikánsabb kisebb, illetve a kinetikai energia disszipációja is jelentősen nagyobb, mint például a homokos meder esetén. Ezek az eredmények a laboratóriumi és a terepi mérések esetén is egyértelműen kimutathatóak voltak.

A hajó sebessége és a parttól mért távolsága komoly hatással volt a kialakuló fenécsúsztatófeszültségekre és így az elsodort egyedek számára is. Egy-két km/h -s sebesség növekedés akár 5-10 %-kal is megnövelheti az elragadott egyedek számát és a hajó parthoz való közeledése is komoly növekedést okozott a fent említett értékekben.

A felszíni vizek part menti zónái ökológiai szempontból gyakran instabil rendszert alkotnak, így az ilyen makrogerinctelenek kimosódása és populációjuk esetleges csökkenése komoly káros hatást jelenthet a lokális ökoszisztémára.

A kapott eredmények alapján a szerző érdemesnek tartaná szigorítani a hajózási sebességkorlátozásokat, valamint azt, hogy a vízi útvonalak megfelelő távolságba legyenek a partoktól. Folyókák esetén azonban az utóbbi kritérium gyakran sajnos korlátozva van a meder



morfológiai adottságai miatt, sok helyen még így is nehezen tartható a hajózáshoz szükséges minimális hajóút szélesség.

3 Témaválasztás indoklása

Dolgozatom célja a fent leírtakhoz hasonló vizsgálatok végzése egy hazai Duna szakaszon, hogy rámutathassunk, hogy a tanulmányozott területen milyenek a jelenlegi partviszonyok hullámválasztási és áramlási paraméterek tekintetében. Munkánkkal támogatást nyújtanánk a témával foglalkozó biológusoknak, hiszen egy mérnöki irányból közelítenénk meg a jelenségeket, így azok jellemző paramétereit a megfelelő terepi mérései – a jövőben akár numerikus modellezési – eljárásokkal számszerűsíteni is tudnánk. Ezzel elérnénk, hogy a folyami beavatkozások hatására a litorális zónában bekövetkező hatásai kimutathatóak legyenek a hullámok következtében kialakuló fenékközeli áramlási sebességek és fenécsúsztatófeszültségek értékeivel. Egy ilyen kifejlesztett módszer alkalmazása lenne hatásvizsgálatok készítésére, illetve már a tervezési fázisban is komoly segítséget nyújthatna a tervezőmérnökök számára.

Jelen tanulmányban elsődleges cél a hajók keltette hullámok hatására kialakuló áramlási jelenségek megértése és a jelenlegi állapot feltárása, valamint egy a művek közé építendő kavicspad áramlási paraméterekre gyakorolt hatásának vizsgálata. Hosszú távú célom a hajózás negatív hatásainak mérséklése a Duna part menti zónáiban valamint az ilyen vizes élőhelyek javítása vízmérnöki eszközökkel.

Hazai viszonyok közt ilyen jellegű vizsgálatokat korábban még nem végeztek, ezért szeretnénk elkezdni a téma feltárását hazai viszonyokra, a különböző hajók keltette hullámok vizsgálatát, kezdetben külföldi munkákra támaszkodva.

4 Vizsgálati terület bemutatása

A vizsgált terület a Duna 1675,3 és 1675,0 fkm szelvényi között található. Ez Sződliget térsége, a folyó jobb partján a Szentendrei sziget, bal partján Sződliget községe helyezkedik el. A Duna teljes vízhozamának közel kétharmada folyik ezen az ágon, a maradék a Szentendrei Duna-ágon folyik keresztül. Ebből adódik, hogy a hajóforgalom is ezen az ágon zajlik, mely bizonyos esetekben előnytelen hatással lehet a vízi ökoszisztémára. A térség áramlási karakterét két sarkantyúpár adja, északon a jobb, délen a bal paron. Jelen tanulmányban a felvízi sarkantyúk közt fekvő, part menti szakaszon vizsgáltunk (9. ábra). Kíváncsiak voltunk, hogy a különböző hajók elhaladta milyen hatással van a művek közti limányban kialakuló hidraulikai helyzetre, mind áramlási, mind hullámválasztási paraméterek tekintetében.

A térségben az élőhelyek javítását célzó beavatkozásokat terveznek, melyek jelen művek esetén azok part menti szakaszának átvágását, part menti mederrendezést, valamint a művek közt egy kavicspad kialakítását jelentenék. Utóbbi célja többek közt a hajók keltette hullámok negatív hatásainak enyhítése, ezzel egy biztonságosabb ívóhely biztosítása a térségben élő (ívó) halak számára. Az átvágások és az ehhez tartozó mederrendezés a part közeli áramlások intenzívebbé tételét szolgálja, mely egyfelől lassítja/gátolja a limány feltöltődését, másrészt pozitív hatásokat várunk a halas élőhelyek tekintetében (pl. folyami halak általában az áramló vizet preferálják; vízkémiai paraméterek javulása (oldott O_2 , stb)).



9. ábra – A vizsgálati terület

5 Terepi mérések

5.1 Alkalmazott mérési eljárások

A következő bekezdésekben a mérési kampány során alkalmazott mérőműszereket és mérési eljárásokat ismertetem, azok rövid elméleti háttérrel.

5.1.1 Akusztikus Doppler-elvű sebességmérés

A hajók keltette hullámok következtében kialakuló fenék közeli sebességek mérésére ADV-eket (Acoustic Doppler Velocimeter) használtunk. Ahogy a nevéből is adódik, a műszer a Doppler jelenséget felhasználva végzi a méréseket, mely a következő: ha egy hangforrás a vevőhöz képest mozog, akkor a vevő által fogadott hang frekvenciája eltolódik a kibocsátott hang frekvenciájához képest. Több vízmérnöki mérőműszert is kifejlesztettek erre az elvre építve, ezek a víz sebességét mind indirekt módon mérik. Hangsugarakat bocsátanak ki,

melyek a vízben lévő és azzal együtt mozgó apró részecskékről (pl. lebegtetett hordalék, apró élőlények) visszaverődnek a jelvevőre, a víz áramlási sebességétől függő mértékű frekvenciaváltozással.

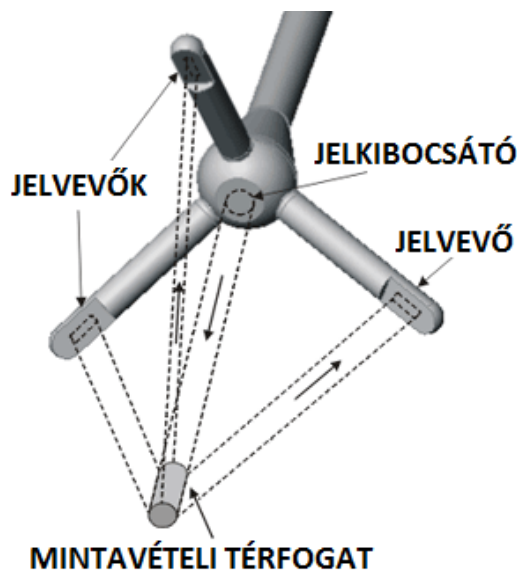
A frekvencia változása és a víz sebessége közti kapcsolatot a következő egyenlet írja le:

$$f_{\text{doppler}} = 2 \cdot f_{\text{forrás}} \cdot \frac{v}{c}$$

ahol f_{doppler} a frekvenciaváltozás a vevőnél; $f_{\text{forrás}}$ a kibocsátott hang frekvenciája; v a részecske relatív sebessége; c a hang terjedési sebessége vízben.

A Doppler-elvű műszerek működéséről számos cikk található a szakirodalomban (pl.: Baranya et al., 2008), valamint egy hosszabb leírás korábbi TDK dolgozatomban (Fleit, 2013), így a további részletezést itt mellőzöm.

Az ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) egyrészes mérőfejével ellentétben az ADV külön jelátalakított alkalmaz a jelkibocsátásra és a jelvétele (10. ábra).



10. ábra – Az ADV és részeinek sematikus ábrája

Az ADV a rögzített geometriai kialakítása miatt nem képes az ADCP-hez hasonló függélymenti eloszlások vizsgálatára, csak egy apró ($\sim 1 \text{ cm}^3$) mintavételi térfogatról gyűjt információkat, mely a kibocsátott és az érzékelt hangnyalábok metszékéből adódik.

A mérési kampány során 3 ilyen műszert vetettünk be, egy nagyobb, három jelvevővel rendelkező ún. Vectort (11. ábra), valamint két kisebb, négy jelvevős Vectrinot (12. ábra).



11. és 12. ábra – Vectrino (balra) és Vector (jobbra)

A Vector három egymással 120° -os, a függőlegessel 30° -os szöget bezáró jellevője lehetővé teszi háromdimenziós sebességvektorok mérését illetve számítását. Kialakítása miatt a műszer érzékenyebb a függőleges irányú sebességkomponensekre, mint a síkbeliekre, ezért a mérés ezen tagjai némi bizonytalansággal terheltek. Ez azonban nem jelent jelentősebb hibát a mérések során, ugyanis az ilyen irányú sebességkomponensek általában jóval kisebbek, mint a síkbeli irányokéi. A mérési sűrűség 8 és 64 Hz között állítható. A műszer rendelkezik továbbá nyomásérzékelővel is, így a hullámok okozta hidrodinamikai nyomásváltozások rögzítését is ezzel végeztük.

A Vectrinok négy egymással 90° -os szöget bezáró jellevője a háromdimenziós sebességvektorok mérésén túlmenően csökkenti a vízszintes irányú komponensek bizonytalanságát, ugyanis két jellevő is a műszer tengelyében kialakuló áramlási sebességvektorokat rögzíti. A Vectrinók mérési sűrűsége 1 és 25 Hz között definiálható. Megfelelő szoftverrel a két Vectrino egyidejű mérési eredményei szinkronizálhatóak.

5.1.2 LSPIV

Az LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry) egy fejlődőben lévő mérési-adatfeldolgozási technika, mely lényegében videó felvételek alapján képes a vizsgált területre kétdimenziós felszíni áramlási sebességvektor mezőket számítani. Ehhez egy mintázat követő algoritmust használ, mely beprogramozása igen körülményes feladat, szerencsés tehát, hogy jelenleg több ilyen fejlesztési fázisban lévő szoftver is elérhető, melyet a témában aktív kutatók tettek nyilvánossá (pl. Muste et al., 2008). Az algoritmus képes két egymást követő képkockán azonosan megjelenő mintázatok felismerésére, így számszerűsíteni tudja azok elmozdulás vektorait képről képre. Klasszikus esetekben a mérésekhez meg kell festeni/szórni a vizsgálati területet valamilyen jelölő anyaggal, azonban speciális esetekben, pl. műtárgyak alvívén, az ott kialakuló hab önmagában elegendő lehet a feldolgozó szoftver megfelelő működéséhez.



A kompakt, nagy felbontású videokamerák (pl. GoPro) fejlődése és elterjedése miatt egy gyors és praktikus vízmérnöki eszközzé válhat a következő években, hiszen hosszabb előkészület nélkül képesek lehetünk felszíni vizeink vízfelszínhez közeli áramlásainak feltérképezésére. Ebből az is következik, hogy amennyiben rendelkezünk egy megfelelő medergeometriai térképpel a mérési területre, illetve valamilyen közelítő becslést adunk a mélységátlagolt sebességekre a vízfelszín közeli sebességekből (az irodalomban a kettő hányadosát 0,85 körülnek veszik) úgy akár vízhozam becsléseket is végezhetünk az eljárással. Megfelelően felmért keresztmetszvények esetén, fixen rögzített kamerákkal akár monitoring rendszerek szerves részeként is alkalmazható eszköz lehet a jövőben.

A módszer egyszerű adaptálhatóságát mutatja, hogy az általunk használt szoftver fejlesztője például kisebb vízfolyások heves árvizeiről készült Youtube-on megosztott amatőr videók alapján végzett vízhozam becsléseket (Boursicaud et al., 2014). Ehhez szükség volt az adott terület digitális terepmodelljére, melyet utólagos felmérésekkel épített fel.

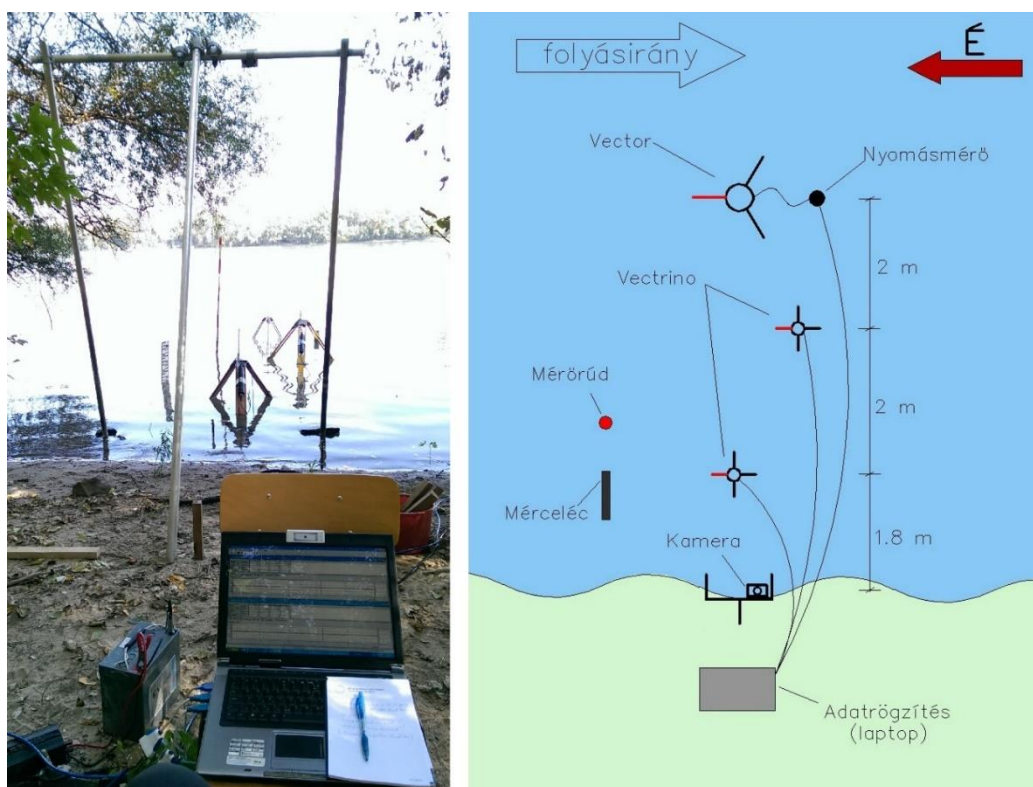
A témában napjainkban még főleg tudományos jellegű vizsgálódások folynak, a legtöbb elérhető szoftver egyetemek és kutatóintézetek „háziilag” fejlesztett programja. A módszer egyszerűsége abban rejlik, hogy egy videokamerán, egy számítógépen valamint az adatfeldolgozó szoftveren kívül nem igényel költséges felszerelést, sőt, a terepi mérések elvégzéséhez gyakorlatilag a kamera és egy GPS is elegendő lehet.

A mérés során megfelelően stabil helyet kell keresni a kamerának, ugyanis egy zavaros, ugráló képsorozat általában használhatatlan, vagy csak értelmetlenül sok munkával lehet használhatóvá tenni. A felvételeket az adatfeldolgozás elején képkockákra kell bontani, valamint a szürke 256 árnyalatára kell konvertálni a színeket. A számításokhoz szükséges ismerni, hogy hány képet készít másodpercenként az adott eszköz – illetve, hogy a képekre bontásnál mi mennyire ritkítottuk meg azokat –, mivel az egyes képek között eltelt idő alapján számítja az algoritmus a sebességeket. Mivel a célunk a vízfelszín síkjában lévő 2D eredményező készítése, így optimális esetben egy a síkra merőleges tengely egy pontjáról kéne készíteni a felvételeket, ami csak extrém esetekben oldható meg. Általában perspektivikus rálátásunk van a vizsgálati területre, ezért ismernünk kell több olyan pont geodéziai koordinátáját (ezt relatív koordináta-rendszerben is elégséges elvégezni), melyek a képeken is jól láthatóak. A szoftver a geodéziai koordináták, valamint a pontok képi koordinátái (pixelek) alapján képes az adott felvételt a számunkra megfelelő, felülnézeti sík vetületre transzformálni. A számítás további részleteit a későbbiekben ismertetem.

5.2 A mérési kampány

A mérési kampányra 2014. szeptember 24-án került sor, $1750 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ -os vízhozam idején. Ezt több napos előkészület előzte meg, ugyanis a mérés megtervezésén túlmenően el kellett készíteni a megfelelő állványokat is a műszerek számára, melyért itt köszönetet is mondok a tanszék technikusainak.

A méréseket a **9. ábrán** piros körrel megjelölt területen végeztük, a tervek szerint. A terepre érkezés előtt kérdéses volt, hogy a kiszemelt terület elérhető lesz-e, illetve megoldható lesz-e a műszerek elhelyezése, ugyanis ez nagyban függ a vízjárástól. Szerencsénkre minden a terveink szerint alakult, a műszerek kísérleti jellegű rögzítései és megtámasztásai is állták a sarat a teljes nap folyamán. A kigondolt és végül sikeresen kiépített mérési elrendezést a **13. ábra** szemlélteti.



13. ábra – Az alkalmazott műszerinstalláció fényképen (balra) és felülnézeti vázlaton (jobbra)

A műszereket egy-egy vékony fémrúdra rögzítettük, melyeket mélyen a mederanyagba vertünk le. Ezen felül, a további biztonság valamint megfelelő stabilitás érdekében minden ilyen rudat egy geodéziai mérőműszerekhez használatos állványhoz rögzítettünk.

Ahogy a fenti ábrán látható, mindhárom ADV egy időben üzemelt, a parttól egyre távolodva, egyre növekvő vízmélységekben. A műszerek úgy lettek telepítve, hogy azok mintavételi térfogata minden esetben a lehető legközelebb essen a mederfenékhez, ügyelve arra, hogy véletlenül se messenek bele a fenék síkjába, mert ez hibás és hiányos mérésekhez vezetett volna. A műszerlábak esetleges zavaró hatását kiküszöbölendő nem egy a partvonalra

merőleges egyenesre helyeztük el őket, hanem némileg eltolva egymástól. A parttól legtávolabb elhelyezett Vector mellett lett lebiztosítva az ahhoz tartozó nyomásérzékelős mérőműszer is. Ezen felül, a biztonság kedvéért egy beszkálázott mércelec, valamint egy 20 cm-es osztásközű mérőrúd is leverésre került, melyekről centiméter pontos maximális hullámmagasság méréseket végeztünk, felkészülve arra az esetre, ha a nyomásmérő esetleg hibásan működne. Ezeket később egy szállodahajó hullámai kidöntötték, azonban mint utólag kiderült a nyomásmérő megfelelően működött, így az eset végül nem befolyásolta a mért eredmények sokféleségét.

A mérési adatok legrészletesebb feldolgozhatósága érdekében minden műszer esetén feljegyeztük a pontbeli vízmélységeket, valamint azt, hogy az egyes műszerek milyen mélyen helyezkednek el a vízfelszín alatt.

Az elektromos eszközöket a parton elhelyezett akkumulátorról láttuk el árammal, valamint a szintén parton lévő laptopra csatlakoztatva volt lehetőségünk a mérési eredmények azonnali megjelenítésére és rögzítésére (Vector illetve PolySync szoftverekkel).

Ezen műszereken túlmenően egy videokamera (GoPro Hero) (**14. ábra**) is telepítésre került, mellyel a partvonal közelében megtört hullámokat filmeztük. A kamera Full HD (1920x1080) felvételek készítésére alkalmas, 30 fps-sel (képkocka/másodperc). A videókra a korábban említett LSPIV eljárás alkalmazásához volt szükség. A gép stabil rögzítéséhez egy alumínium rudakból álló keretet építettünk, melynek köszönhetően közel a vízfelszínre merőleges függőlegesen rögzíthettük az eseményeket. A kamera látószögén belül cölöpöket vertünk le, majd azok egymástól mért távolságát jegyzőkönyvbe vettük, ezzel lehetővé téve a feldolgozás során szükséges transzformációt.



14. ábra – Az alkalmazott GoPro Hero kamera

Miután felállítottuk a rendszert, a tanszék hajójával keltett hullámokkal győződünk meg róla, hogy minden megfelelően működik és készen állunk az éles mérésre.



Amennyire a helyzetünk engedte, igyekeztünk kifizetni az elhaladó hajókat, hogy minél hamarabb fel tudjunk készülni azok érkezésére, továbbá nagy segítségünkre volt a www.marinetraffic.com címen elérhető honlap is, mely lehetőséget kínál bolygónk minden nagyobb vízi útvonalán közlekedő jelentős hajó követésére, így a Dunán érkező hajókat is előre láthattuk.

Egy tipikus mérés a következő lépésekből állt:

1. Rögzítettük a hajó elhaladásának időpontját, irányát (hegymenet/völgymenet), valamint annak típusát (pl. uszály, szárnyashajó, szállodahajó)
2. A PolySync szoftverrel a Vectrino mérések szinkronizált rögzítésének indítása
3. Vector mérések rögzítésének indítása (mivel a szoftver ezt nem képes összehangolni a Vectrinokkal, ezért stopperrel mértük a két rögzítés indítása közt eltelt időt, hogy a feldolgozás során azonos időbe tolhatók legyenek az eredmények)
4. Fénykép készítése az elhaladó hajóról
5. Videofelvétel (GoPro) elindítása
6. Maximális vízszint leolvasása a vízmércén

A mérést minden esetben azelőtt elindítottuk, hogy a hajók átmentek volna az ADV-kre illeszthető egyenes vonalán, így azok esetleges leszívó hatása is kimutathatóvá vált. Az adatok rögzítését akkor állítottuk le, amikor a folyó visszatért dinamikus egyensúlyi állapotába. Ez átlagosan 10-15 perccel a hajó elhaladását követően következett be.

Az egyszerűség kedvéért, a továbbiakban az egyes mérésekre a hajók elhaladtának időpontjával fogok referálni. Az egyes hajók típusát, elhaladtának időpontját és irányát az **1. táblázat** tartalmazza, valamint a **15-17. ábrákon** az egyes hajótípusok egy-egy képviselőjének fényképe látható.

1. táblázat – Mérések során elhaladt hajók típusa és iránya

Elhaladás időpontja (mérés azonosítója)	Hajó típusa	Irány
12:10	szállodahajó	völgymenet
13:50	uszály	hegymenet
14:00	szárnyas hajó	völgymenet
14:43	szállodahajó	völgymenet
15:33	szállodahajó	hegymenet
15:56	szállodahajó	hegymenet
16:15	tanszéki mérőcsónak	hegymenet
16:17		völgymenet
16:31		hegymenet
16:33		völgymenet
16:36		hegymenet
16:38		völgymenet



15. ábra – Szállodahajó (12:10)



16. ábra – Uszály (13:50)



17. ábra – Szárnyashajó (14:00)

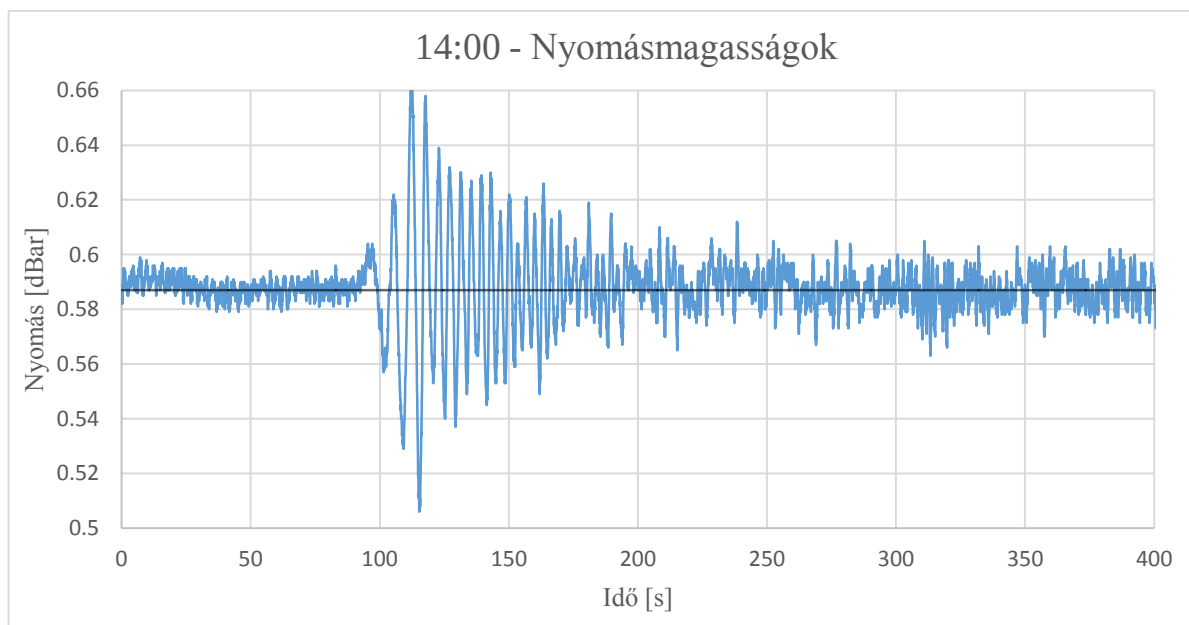
6 Adatfeldolgozás

A következő alfejezetekben bemutatom milyen eszközök és módszerek segítségével volt lehetőségem feldolgozni a nagy mennyiségű mért adatot. Ismertetem az ADV-k sebességméréseinek adatfeldolgozási folyamatát, a nyomásmérő adatsorainak kiértékelését valamint a műszer mérései alapján kísérletet teszek a fenék-csúsztató feszültségek becslésére. Ezen túlmenően bemutatom az LSPIV elméleti hátterét és alkalmazhatóságát is.

6.1 Hullázási paraméterek

A Vector nyomásmérőjével nagy időbeli felbontású nyomás adatsorokhoz jutottunk. A műszer az eredményeket dBar mértékegységben rögzíti, három tizedes élességgel. Az nyers mérési fájlok első megjelenítésre is sok információval szolgáltak, bárminemű elemzés nélkül is komoly különbségeket véltünk felfedezni az egyes hajótípusok közt, érdekes, elgondolkodtató mintázatokat kaptunk.

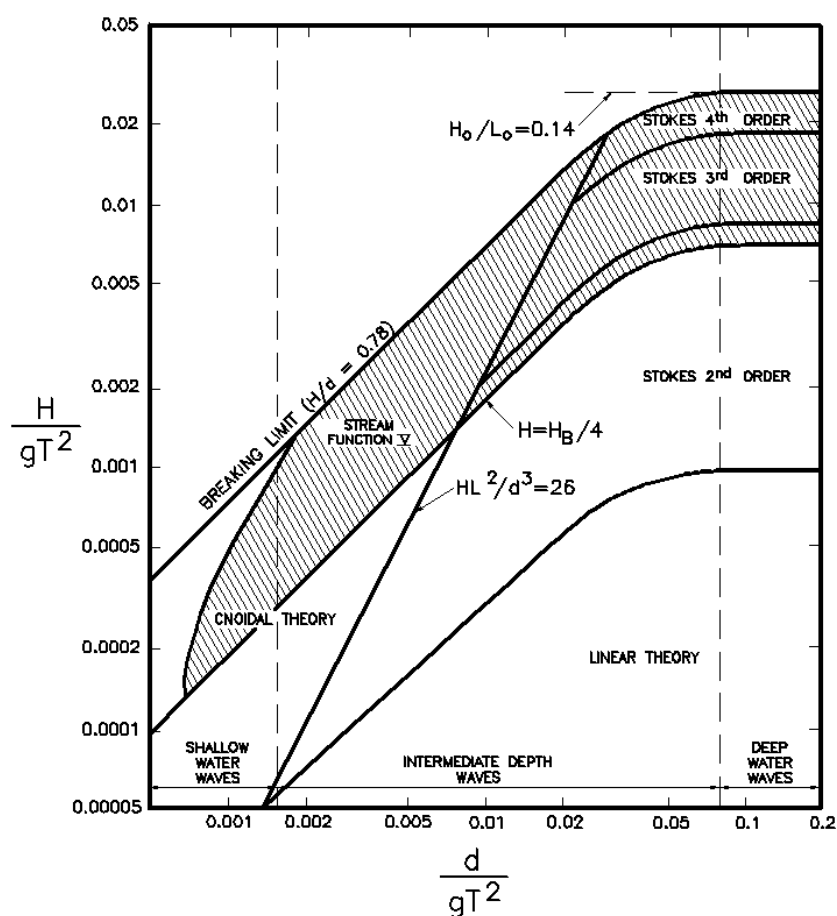
A **18. ábrán** egy szárnyashajó által keltett hullámozás nyomás idősorát mutatom be. (A fekete vízszintes vonal a nyugalmi vízszinthez tartozó nyomást jelzi.). Az ábra remekül visszaadja az **1. ábrán** bemutatott, sematikus hullámképet, könnyen elkülöníthetők egymástól a nagyobb amplitúdójú, kisebb frekvenciájú elsődleges és a kisebb amplitúdójú, nagyobb frekvenciájú másodlagos hullámok.



18. ábra – Szárnyashajó hullámképe (0-400 mp-ig)

Kiemelném, hogy a mérések során elhaladó hajók nagyobb részénél nem volt ilyen egyértelmű a határ a különböző hullámtípusok közt, ami többek közt a számos hullámozási paramétereket befolyásoló paraméter (sebesség, merülés, alaki tényező stb.) változatosságnak tudható be. Ezen kívül szintén fontos hangsúlyozni, hogy ezekből a nyomásértékekből nem

származtatható triviálisan a hullámmagasságok értéke, ilyenkor ugyanis nem hidrosztatikus nyomásállapot uralkodik a mintázott vízoszlopban. A hidrosztatikus nyomásértékek kibővülnek egy dinamikus nyomástaggal is, továbbá figyelembe kell venni a hullámok függőleges mentén történő csillapodását is. Ahhoz, hogy ezek hatások is figyelembe vehetők legyenek, komoly hullámelméleti eszköztárra van szükség. Ehhez azonban le kell szögezni, hogy melyik hullámelmélet alkalmazható az idősorainkra. Ez a hullámmagasságok (H), a mérési pontokban lévő vízmélység (d), és a hullámmás periódusideje (T) határozza meg a **19. ábra** szerint:



19. ábra – Az egyes hullámelméletek alkalmazhatósági határai

A hullámmás idősorok néhány véletlenszerűen kiválasztott szakasza alapján felszerkesztettem néhány pont-párt az ábrára, azonban ezek jelentős szórást mutattak az egyes elméletek közt, így a helyzet komplexitása és az idő rövidsége miatt a hullámmási paraméterek részletes elemzését nem végeztük el. Mivel a dolgozat fő célja a hajók keltette hullámmás mederfenékre és partra kifejtett hatásának a vizsgálata (közvetlenül a sebességmérések alapján) így ezt a hiányt elfogadható áldozatként vagyunk kénytelenek kezelni, mindazonáltal a hullámelméleti vizsgálatok fontosságát nem kérdőjelezzük ilyen célirányos vizsgálatok esetén sem.



6.2 Fenékközeli áramlási sebességek

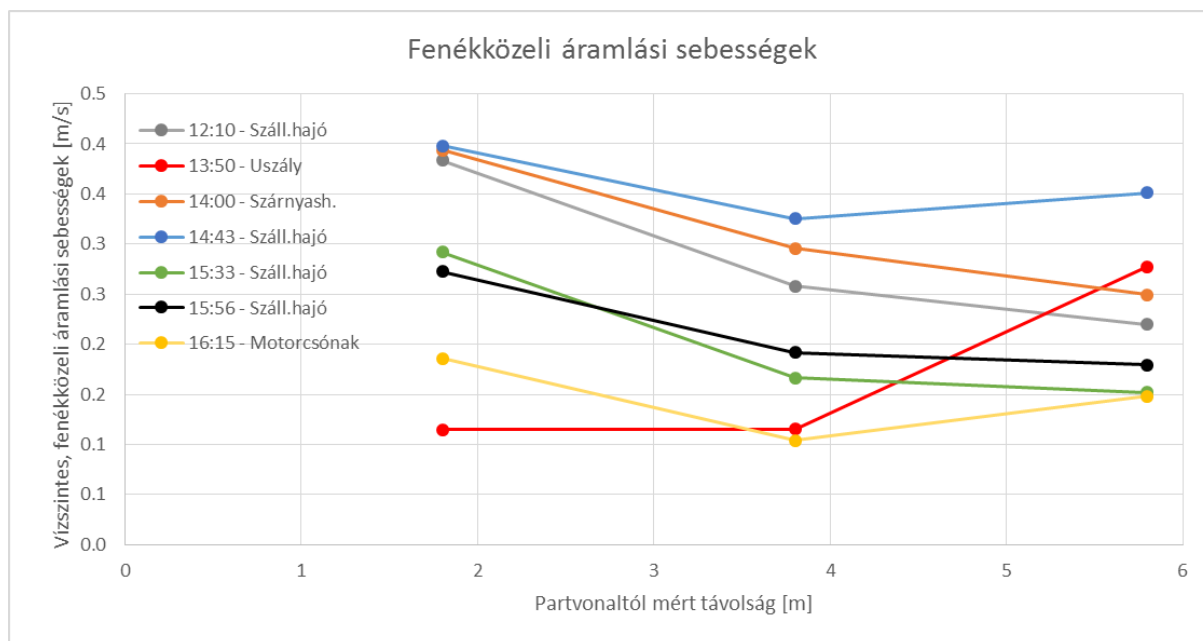
Az ADV-k háromdimenziós áramlási sebességméréseinek feldolgozása során lényegében azok előkészítését végeztem el, a későbbi fenék-csúsztatófeszültség becslési eljárásokhoz. Ahogy azt korábban leírtam, a műszerek úgy lettek beállítva, hogy a lehető legjobban megközelítések a mederfeneket, ügyelve arra, hogy a mintavételi térfogat semmiképp se messen abba bele.

A műszerek bemutatásánál említettem, a Vectrinok két jellevővel is méri a függőleges irányú sebességkomponenseket, mivel a műszer kialakításából adódóan ezen értékekre érzékenyebb, mint a vízszintes síkúakra. Első lépésként tehát a két függőleges komponens számtani átlagát képeztem a további számításokhoz.

Ezt követően a három ADV adatsorainak időbeli szinkronizálását végeztem el. A mérések során a Vectrinokat a PolySync nevű szoftverrel kezeltük, ami már a rögzítés során elvégzi a Vectrinok szinkronizálását. Ehhez kellett tehát a Vector méréseit igazítani, melyet a mérési fájlok időbélyegei valamint az általunk feljegyzett rögzítések indítása közt eltelt idő segítségével végeztem el.

Ezt követően első lépésben az adatok szűrését végeztem el, ugyanis minden adatsor elkerülhetetlenül tartalmazott hibás, akár nagyságrendekkel kiugró értékeket. Ezek jól elkülöníthetőek voltak a jó mérésekhez képest, így a kiszűrésük is egyszerűnek bizonyult. A kiugró értékektől megtisztított adatsorokat ezután mozgóablakos átlagolással simítottam, hogy a turbulens fluktuáció hatásától mentes adatsorhoz jussak. Ehhez olyan megfelelő ablakméretet kellett választani, mely kellően nagy ahhoz, hogy a fluktuáló értékeket simítsa, azonban nem olyan nagy, hogy esetleg egy csúcsértéket jelentősen lecsökkentsen a megelőző és követő kisebb értékek hatására. A műszerrel 16 Hz-en mértünk, vagyis másodpercenként 16 mintavételt végeztünk. Több kísérlet után úgy véltük, hogy a $n=11$ -es ablakméret a legmegfelelőbb az adatok simítására (ez $\sim 2/3$ másodperces szakaszok átlagolását jelenti).

A simított adatsorok felhasználásával, meghatároztam az egyes hajókhoz tartozó maximális vízszintes áramlási sebességeket, illetve megvizsgáltam, hogy a partvonalhoz közeledve mutatnak-e valamilyen tendenciát a mért értékek (**20. ábra**). A legnagyobb értékeket minden adatsor esetén a tíz legmagasabb mért érték számtani közepeként definiáltam.



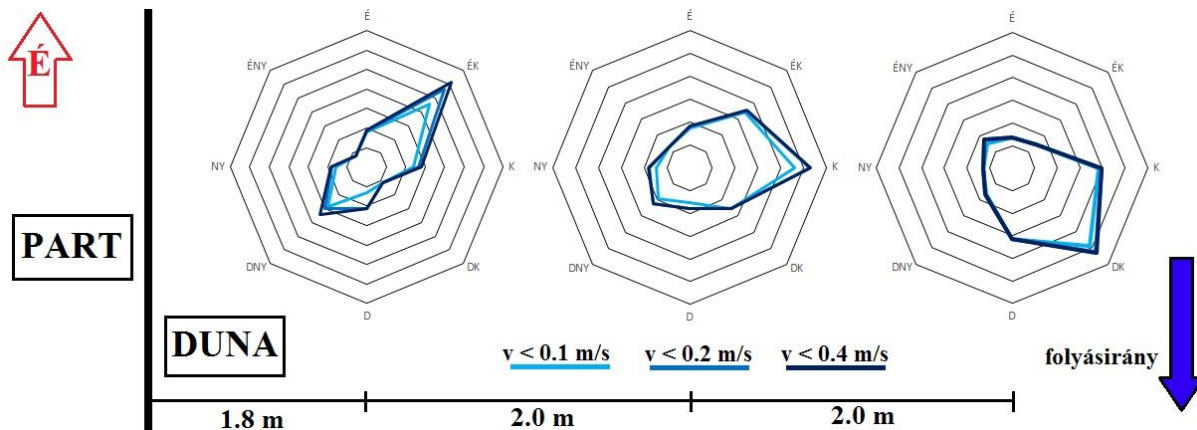
20. ábra – Maximális horizontális fenékközeli áramlási sebességek a parttól mért távolság függvényében, különböző hajók esetén

A fenti ábrán jól kirajzolódik, hogy a part közelében intenzívebb áramlási sebességek jelennek meg a mederfenéken, mely vélhetően nagyobb fenék-csúsztatófeszültségeket jelent. A magasabb csúsztató-feszültség értékek nagyobb mértékű parterózióhoz, valamint nagyobb elragadó erők kialakulásához vezet.

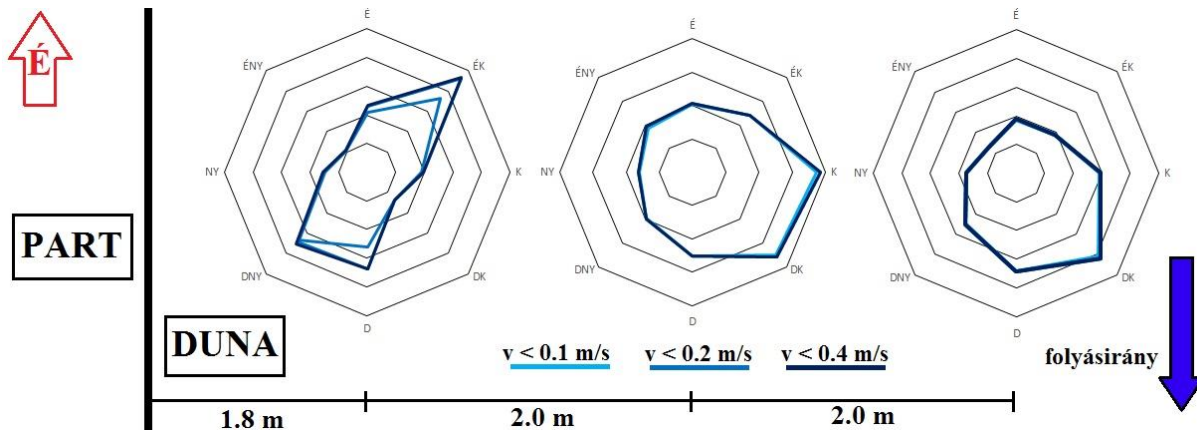
Érdekes kivétel az uszályhoz tartozó görbe, melyen épp ellenkező tendenciát figyelhetünk meg. Első ránézésre hibás méréssel magyaráznánk az eltérő mintázatot, azonban figyelembe véve, hogy a mérési fájlban nem találtam feltűnően hibás mérési szakaszt, valamint azt, hogy az uszály által keltett hullámozás során mért nyomás idősor amplitúdója egy nagyságrenddel kisebb értékeket mutatott a többihez képest, előfordulhat, hogy valóban helyes a felrajzolt görbe, egyszerűen a többitől jelentőse eltérő jellegű hullámjelenség okozza azt.

A hullámozás hatására kialakuló fenékközeli sebességek maximumán túlmenően kíváncsiak voltunk azok síkbeli eloszlásaira is (a függőleges komponens elhanyagolható nagyságú a másik kettőhöz képest). Ennek vizsgálatára minden mérési adatsor alapján egy szélrózsához hasonló eloszlás ábrát készítettem. Az ábrák északi tájolásúak, mivel az ADV-k is úgy lettek lehelyezve, hogy belső koordináta-rendszerük északi iránya megegyezzen a geodéziai Északkal. A műszerek ilyen tájolását iránytűvel, néhány fokos pontossággal végeztük. A következőkben három elhaladó hajó esetére mutatok be ilyen eloszlásábrákat (**21-23. ábrák**) valamint értelmezem is azokat. Az ábrák bal szélén látható a partvonal (ez a valóságban is jó közelítéssel É-D irányú), az egyes ADV-khez tartozó eloszlásábrák középpontjának távolsága innen van felmérve, a korábbiakhoz hasonlóan. Minden ábrarészen három különböző színű

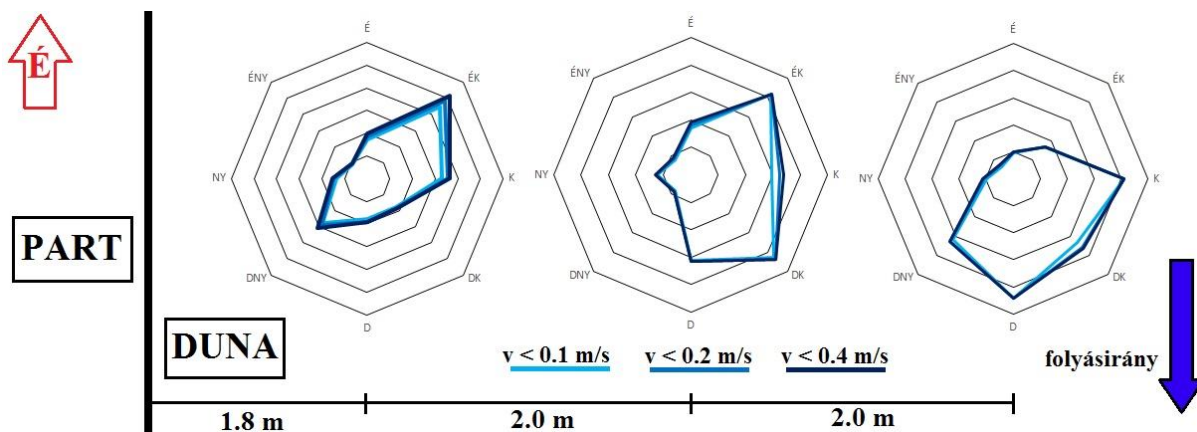
poligon látható. Az irányok eloszlásán túlmenően ezek szolgálnak az áramlási sebességek nagyságának szemléltetésére (ld. jelmagyarázat az ábrákon).



21. ábra –Völgymenetben haladó szállodahajóhoz (12:10) tartozó sebességeloszlások



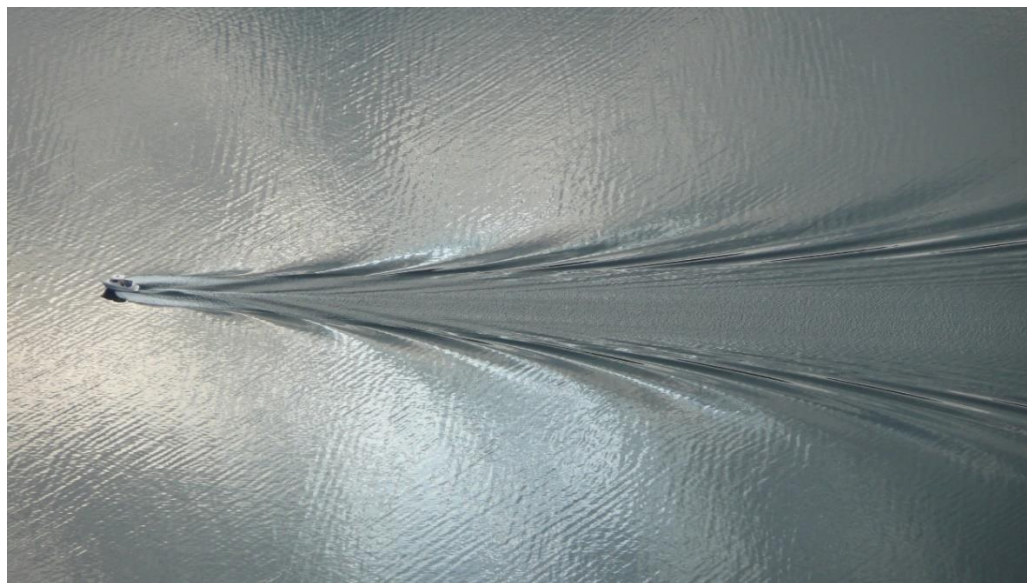
22. ábra –Hegymenetben haladó szállodahajóhoz (15:33) tartozó sebességeloszlások



23. ábra –Völgymenetben haladó szárnyashajóhoz (14:00) tartozó sebességeloszlások

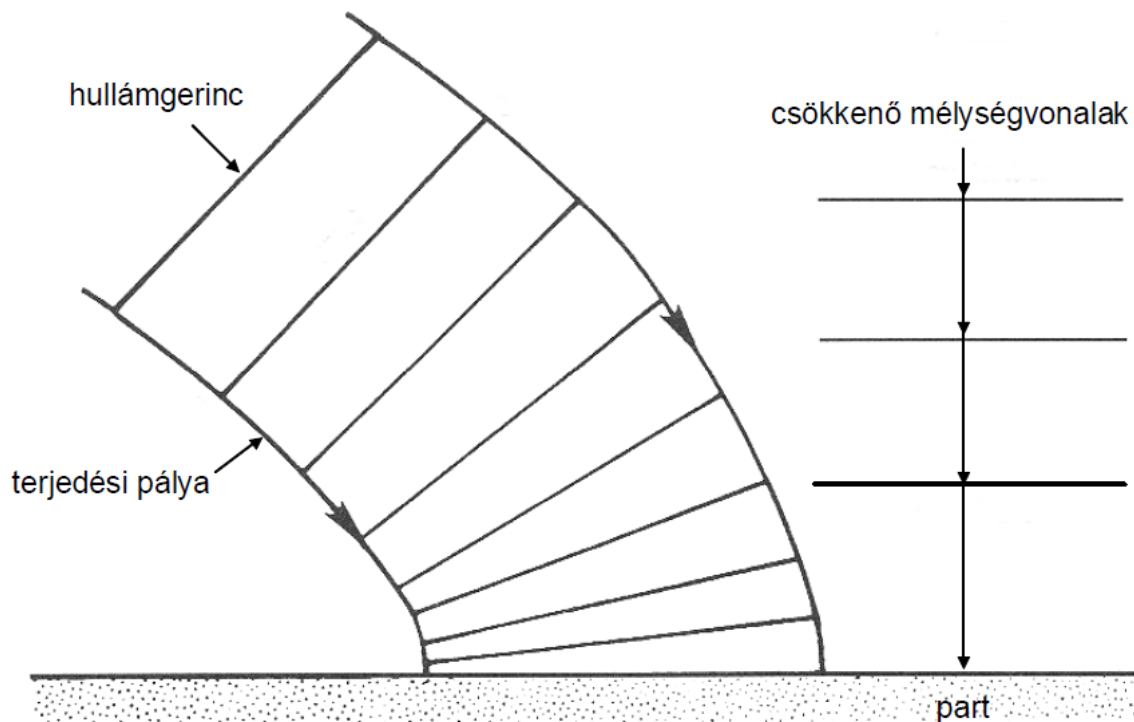
Az első két ábra két hasonló, de ellentétes irányban haladó hajóhoz tartozik. A hajók keltette hullámok a hajó orráról V alakban (a hajó alakjától és méreteitől függő szögben) lesodródva hömpölyögnek a hajótól a part irányába (24. ábra). Ellenkező irányban haladó hajók esetén tehát, a kialakuló hullámok más irányban tartanak a part felé. Kíváncsiak voltunk, hogy ez az eltérés megmutatkozik-e még a part közelében is, megállapítható-e a fenék közeli sebességek síkbeli eloszlása alapján az elhaladó hajó iránya. A 21. és a 22. ábrát összehasonlítva látható,

hogy a part közelében nincs ilyen jellegű kapcsolat az áramlási sebességek és a hajók haladási iránya közt.



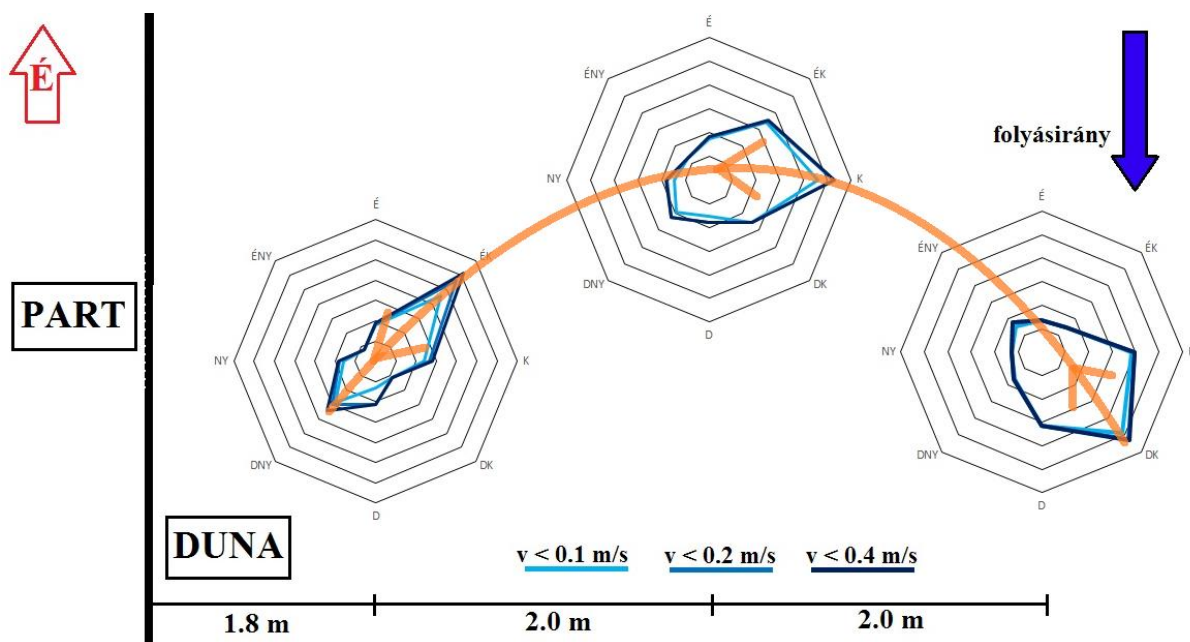
24. ábra – Hajóról V alakban leváló hullámok /Wikipedia/

A legmélyebben lévő, parttól 5,8 méterre elhelyezett ADV-hez tartozó ábrákon az látszik, hogy a hullámok a parthoz közeledve főleg DK-i irányból (tehát a partvonalra nem merőlegesen) érkeznek, függetlenül a hajó irányától vagy típusától. Ez vélhetően a hullám-refrakció jelenségének tudható be, vagyis annak, hogy a mélységváltozás hatására a hullám terjedési iránya és így a hullámfront helyzete folyamatosan változik (25. ábra).



25. ábra - A hullám-refrakció /VIT, 2004/

Az eloszlási ábrákon megfigyelhető, hogy a parthoz közeledve mindhárom esetben közel 90°-kal elfordul az áramlási sebességek fő iránya és a parthoz legközelebbi műszerhez érve jellemzően észak-nyugati irányultság tapasztalható (26. ábra).



26. ábra – A parthoz közeledve megfigyelhető irányváltás sematikus ábrája (21. ábra alapján)

Mint azt említettem, az ADV-k néhány fokos pontossággal lettek Észak felé tájolva, így a fenti ábrán kirajzolódó irányváltás nem magyarázható a műszerek hibás lehelyezésével. Az érdekes jelenségre vélhetően ismét a hullám-refrakció adhat magyarázatot, ennek bizonyításához azonban részletesebb vizsgálatokra lenne szükség, valamint egy a vizsgálati területet lefedő részletes és pontos medertérképre.

A 21-23. ábrákon megfigyelhető továbbá, hogy a part közelében sokkal jobban lehet érzékelni az áramlási sebességek egy tengelyen való mozgását, míg a meder felé közeledve ez az egyirányúság fokozatosan csökken. Az áramlási sebességek nagyságának eloszlása is leolvasható az ábrákról, a parttól távolodva a három poligon szinte egybeesik, ami azt jelenti a 0,1 m/s-nál kisebb sebességek sokkal nagyobb hányadát adják a teljes időornak, az ennél nagyobb sebességek szinte elhanyagolható számban jelentek meg hozzájuk képest. Ezzel szemben a parthoz legközelebb eső ADV méréseinél (főleg a 12:10-es hajó esetén) láthatóan szétválnak a sokszögek, mely azt jelenti, hogy a 0,1 m/s-nál nagyobb áramlási sebességek összemérhető számban vannak jelen a teljes idősorban.

6.3 Fenék-csúsztatófeszültségek becslése

Az ADV-k háromdimenziós áramlási sebességmérései alapján lehetőség van a fenék-csúsztatófeszültségek meghatározására. A következőkben bemutatok néhány szakirodalomban fellelhető becslési módszert (Kim *et al.*, 2000), illetve vizsgálom azok alkalmazhatóságát hullámzásmérések esetén.

6.3.1 Turbulens fal-törvény

Amennyiben egy adott függély különböző mélységű pontjaiban is ismerjük a sebességek nagyságát, úgy lehetőségünk van a turbulens fal-törvényt alkalmazva egy elméleti logaritmikus függvényvel közelíteni a függélymenti sebességeloszlást a következők szerint:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

ahol U az áramlási sebesség; u_* a fenék-csúsztatósebesség; κ a von Kármán konstans ($\sim 0,4$); z a mederfenéktől mért távolság; z_0 a hidrodinamikai érdességmagasság. Amennyiben a mérési adatokra ez a függvényillesztés sikeresen elvégezhető, a fenék-csúsztatósebesség értékét kifejezve lehetőség van a fenék-csúsztatófeszültség számítására:

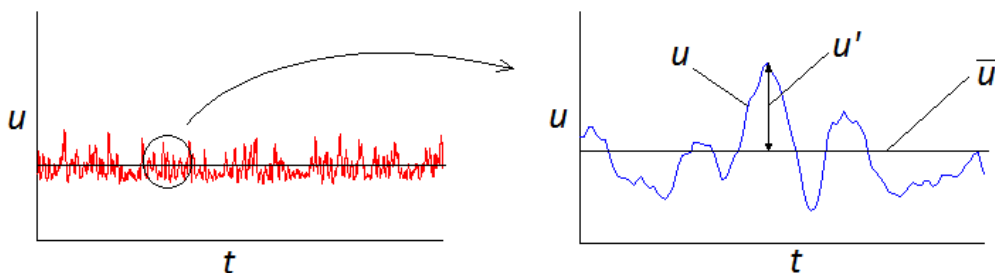
$$\tau_b = \rho \cdot u_*^2$$

ahol τ_b a fenék-csúsztatófeszültség; ρ a víz sűrűsége.

Ez a módszer kiválóan alkalmazható fix hajós ADCP mérések esetén (Fleit, 2013), ahol szinte a teljes függély mentéről kapunk mért értékeket. Elméletileg több ADV egy függélybe való rögzítésével is lehetőség van a módszer alkalmazására, mi azonban méréseink során függélyenként egy műszert alkalmaztunk, így nincs lehetőségünk a módszer használatára. Megjegyzendő, hogy amennyiben kellő pontossággal ismernénk a mérési függélyekben jellemző hidrodinamikai érdességmagasságot, úgy elméletileg már elvégezhető lenne a profilillesztés, és így a fenék-csúsztató feszültségek becslése is.

6.3.2 Reynolds-féle fenékközeli feszültség

Az áramlási sebességek turbulens mivoltának jellemzésére a Reynolds-féle szétválasztást szokás alkalmazni, vagyis egy adott pontbeli pillanatnyi sebességet egy alkalmas t időpontban egy $\bar{u}$ átlagsebesség és egy u' pulzációs sebesség összegeként írjuk fel (27. ábra).



27. ábra – Turbulens áramlási sebesség Reynolds-féle szétválasztása



Amennyiben az áramlási sebességeket három dimenzióban vizsgáljuk, úgy a szétválasztás is mindhárom merőleges sebességkomponensre (u - fő áramlási irányával megegyező; v - áramlás irányára merőleges; w - uv síkra merőleges) elvégzendő.

Az $-\overline{u'w'}$ pulzációs összetevők átlaga valamint az u_* fenék-csúsztató sebességek közt a következő összefüggés áll fent (Tennekes és Lumley, 1972):

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

ahol R a Reynolds-szám.

Turbulens áramlások esetén a Reynolds-szám, $R = \kappa u_* z / \nu \gg 1$, így:

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

továbbá mivel:

$$\tau_b = \rho \cdot u_*^2$$

ezért:

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

Hullámzások hatására kialakuló fenék-csúsztató feszültség növekmény számítása esetén azonban ezek a számítások nem triviálisak, hiszen az áramlás iránya időben változó, továbbá a fő áramlási irány sem feltétlenül egyértelmű (pl. jelen tanulmány esetén, a mérések sarkantyúk közti limányban történtek, ahol a nyugalmi állapotban megjelenő áramlási sebességek jelentősen kisebbek a főmedrieknél, így meglehet, hogy a hullámzás hatására kialakuló – partra merőleges – áramlás lesz a mértékadó).

A hullámzásokkor mért mederközeli áramlási sebességek esetén a turbulens fluktuációból eredő tagok (u' , v' , w') elválasztása sem egyértelmű. hiszen az áramlás fő iránya és nagysága is időben változó, így a trendmentesítéskor nem egy konstans értékkel, hanem valamilyen időben változó függvénnyel kell redukálni a teljes mérési sort.

6.3.3 Turbulens kinetikai energia (TKE)

Az áramlási sebességek turbulens fluktuációs komponensének kinetikai energiája is alkalmas lehet a fenék-csúsztatófeszültségek becslésére. Már az 1980-as években felfedezték, hogy a csúsztatófeszültségek és a kinetikai energia mértéke között lineáris kapcsolat áll fent (Soulsby és Dyer, 1981). A két paraméter hányadosa tehát állandó: $C_1 \sim 0,19$ (Huntley, 1995). A turbulens kinetikai energia:

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

így a fenék-csúsztatófeszültség abszolút értéke:

$$|\tau_b| = C_1 \rho E$$



Létezik továbbá egy alternatív formula is, mely pusztán a függőleges irányú sebesség fluktuáció alapján származtatja a csúsztatófeszültség értékét:

$$\tau_b = C_2 \rho w'^2$$

ahol $C_2 = 0,9$.

6.3.4 Fenék-csúsztatófeszültségek becslése hullámmási paraméterek alapján

Fontos megjegyezni, hogy az előző pontokban vázolt elméleti leírások csak idealizált esetekre igazak, kifejlett, turbulens áramlások esetén, ahol a meder érdessége is közel egyenletes, míg a valóságban és főleg hullámmások esetén, ennél jóval összetettebb áramlási viszonyok uralkodnak. Ezen felül ezek az elméletek az áramlás turbulens fluktuációjából vezetik le a csúsztató-feszültségeket, ezért véleményünk szerint nem feltétlenül alkalmasak a hullámmás hatására kialakuló többlet feszültségek leírására.

A fenti okokból kifolyólag egy negyedik számítási módszer is alkalmazásra került. Ez a módszer az előzőekkel ellentétben nem a turbulens fluktuáció alapján vezeti le a csúsztató-feszültségek értékét, hanem hullámmási paraméterekből, a következők szerint (Jonsson, 1966):

$$\tau_{b,max} = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2$$

ahol U_w a maximális orbitális sebesség a mederfenéken (ADV mérések alapján határoztam meg) és f_w a hullámmási súrlódási tényező, mely a következő képlettel számítható:

$$f = 2 \sqrt{\frac{\nu}{U_w A}}$$

ahol ν a víz kinematikai viszkozitása ($1,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) és

$$A = \frac{U_w T}{2\pi}$$

ahol T a hullámmás periódusideje, melyet a mért sebesség idősorok alapján becsültem minden elhaladt hajó esetén.

Azon felül, hogy a módszer valóban a hullámmások okozta fenék-csúsztatófeszültségek becslésére alkalmas, további előnye, hogy minden hullámmás eseményhez egy maximális feszültség értéket ad eredményül, szemben a korábbi módszerek átlagolt értékeivel. Ezzel egy hosszabb (10-15 perc) hullámmás eseménynél is kimutathatóvá válik az az akár néhány másodperces szakasz az idősorokból, amikor a legmagasabb feszültségek alakulnak ki és így az is, hogy mikor lesz a várható legnagyobb elsodrott egyedszám is.

Szerencsés körülmény az is, hogy az irodalomkutatásom során bemutatott doktori értekezésben (Gabel, 2012) is ezt a módszert használták a fenék-csúsztatófeszültségek becslésére (szintén ADV mérések alapján) és ezen értékekkel hozták kapcsolatba az



elragadott egyedek számát. Ezek után belátható, hogy ez a módszer a témában alkalmas lehet a biológusok és vízmérnökök közötti érdemi kommunikáció megteremtésére és így kulcsfontosságú lehet a további sikeres vizsgálatokhoz és gyakorlati alkalmazásokhoz is.

6.4 Videofelvételek feldolgozása LSPIV-vel

Ahogy azt a korábbiakban említettem, az LSPIV egy relatív új, folyamatos fejlődés alatt álló része a jövő vízmérnöki eszköztárának. A módszerrel a vízfelszíni áramlási sebességek számítására van lehetőségünk videofelvételek alapján. Ezen sebességek, valamint a mélységátlagolt áramlási sebességek közt lineáris kapcsolatot feltételezve (a szakirodalomban a kettő hányadosát gyakran 0,85-nek veszik), valamint a medergeometria – és a mérés kori vízszint – ismeretében lehetőség van a vízhozam becslésére. Jelen tanulmányban egy az általánostól eltérő alkalmazásra teszünk kísérletet. A mérési kampány során három elhaladó hajó által keltett hullámozás eseményt rögzítettünk nagy felbontású videóra (1080p) a part közelében (partvonal $\pm 1-2$ m). Célunk a part közelébe kifutó és ott megtörő hullámok vizsgálata volt, illetve annak kiderítése, hogy az LSPIV egyáltalán alkalmas-e ilyen „mérések” kiértékelésére. A módszer a képsorozatokon jól körülhatárolható foltok követését hajtja végre, amit a megtörő hullámok esetén a hab mozgása jelentett. Fontos tehát tisztában lenni azzal, hogy ezzel az eljárással a megtörő hullámfront terjedési sebességét tárjuk fel.

Mivel a módszer egymást – jól definiált időközzel – követő fényképek feldolgozására alkalmas, így a videofelvételeket első lépésben képkockákra kellett bontani. Erre az LSPIV szoftver fejlesztője által ajánlott VirtualDub nevű programot használtam. A módszer a szürke 256 árnyalatában lévő képek alapján képes a számítások elvégzésére, így szükségszerűen elvégeztem a színes képek ilyesfajta konvertálását a – szintén a fejlesztő által ajánlott – XnView nevű szoftver segítségével. Ezen előkészítő lépések elvégzését követően van lehetőség az LSPIV szoftver használatára. (Jelen tanulmányban a felvételeket egy halszem optikájú GoPro kamerával végeztük, aminek a képeit nem volt lehetséges feldolgozni az alkalmazott szoftverrel, így egy 0. lépésként a gyártó saját alkalmazása segítségével ki kellett iktatnunk ezt az effektust a felvételekből.)

A számítások első lépése a képek – vízfelszín síkjára való – merőlegesítése. Ehhez a mérések idején szükséges néhány (a szoftver minimum 6-ot megkövetel) fix pontot rögzíteni, melyek jól látszódnak a felvételeken, valamint ismertek a koordinátaik (akár valamilyen geodéziai vetületben, akár relatív rendszerben). Mi a fix pontokat cölöpökkel rögzítettük, és mivel a fák árnyékában nem volt lehetőségünk pontos GPS koordináták mérésére, ezért azok egymástól mért távolságát rögzítettük. Az egymástól mért távolságok alapján egy relatív koordinátarendszerben helyeztem el a fix pontokat. A képek importálást követően a szoftver



bekéri a referenciapontokat, azok képbeli (pixelekből értelmezett $[i, j]$) és valós (méterben értelmezett $[X, Y]$) koordinátáit, majd elvégzi a képek transzformálást a következő egyenletek legkisebb-négyzetek elvével való megoldásával:

$$X = \frac{a_1 i + a_2 j + a_3}{a_7 i + a_8 j + 1}$$

$$Y = \frac{a_4 i + a_5 j + a_6}{a_7 i + a_8 j + 1}$$

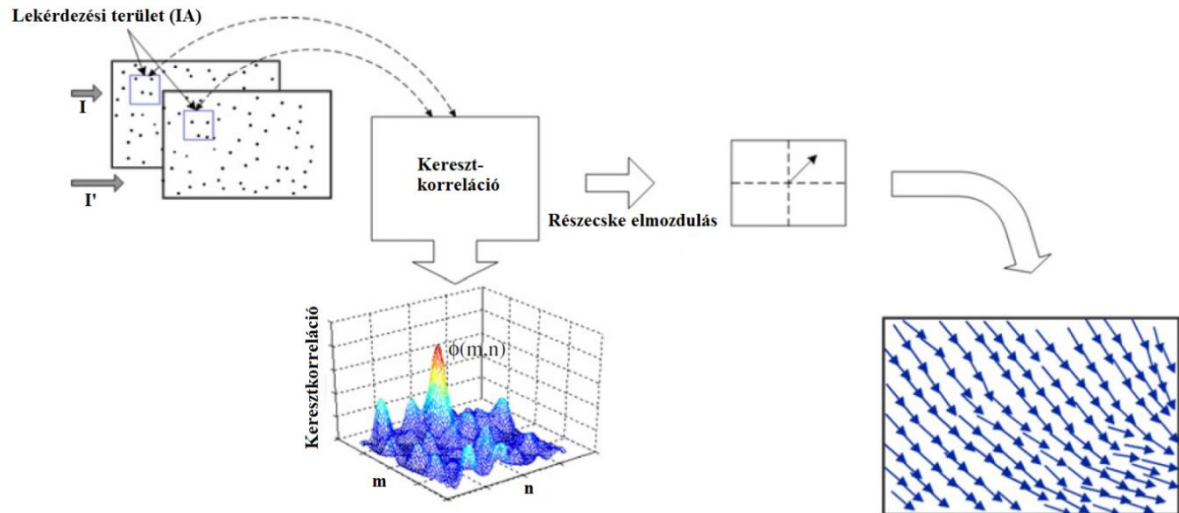
Az képek transzformálása előtt azonban még szükséges definiálnunk, hogy milyen felbontású képekkel szeretnénk dolgozni. Ezt egy *méter/pixel* mértékegységű paraméterrel adhatjuk meg (pl. a 0,01-es felbontás azt jelenti, hogy egy pixel egy $1 \times 1 \text{ cm}^2$ -es valós nagyságú területet fog leírni). Lehetőségünk van továbbá levágni a képekből, ami célszerű, hiszen a transzformálást követően azok valamilyen szabálytalan négyszög alakot vesznek fel.

A képek végleges transzformálása után a számítási paraméterek megadása szükséges. Itt a következőket kell definiálnunk:

- vizsgáló cella (interrogation area – IA) mérete – annak a négyzetnek a területe [pixel^2], amelyen belül a követni kívánt foltot/mintázatot keresi a program
- keresési téglalap méretei (searching area – SA) – azon téglalap oldalainak az IA középpontjától pixelben mért távolsága, melyben mindig a következő időlépéshez tartozó képen keresi az IA-ban felismert foltot
- minimális és maximális sebesség nagyságrend X és Y irányú áramlásokra
- időlépés (δt) – két képkocka közt eltelt idő a valóságban, fontos paraméter, hiszen a megtett utak számítása után, az eltelt idővel való hányados képzés alapján kapjuk a sebességvektorok értékét
- korrelációs együttható (R) elfogadott minimális és maximális értéke – a PIV algoritmus (**28. ábra**) számítja egy kép a_{ij} középpontú IA-ja, valamint a δt időlépéssel későbbi kép b_{ij} középpontú IA-ja közötti keresztkorrelációt ($R(a_{ij}; b_{ij})$):

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

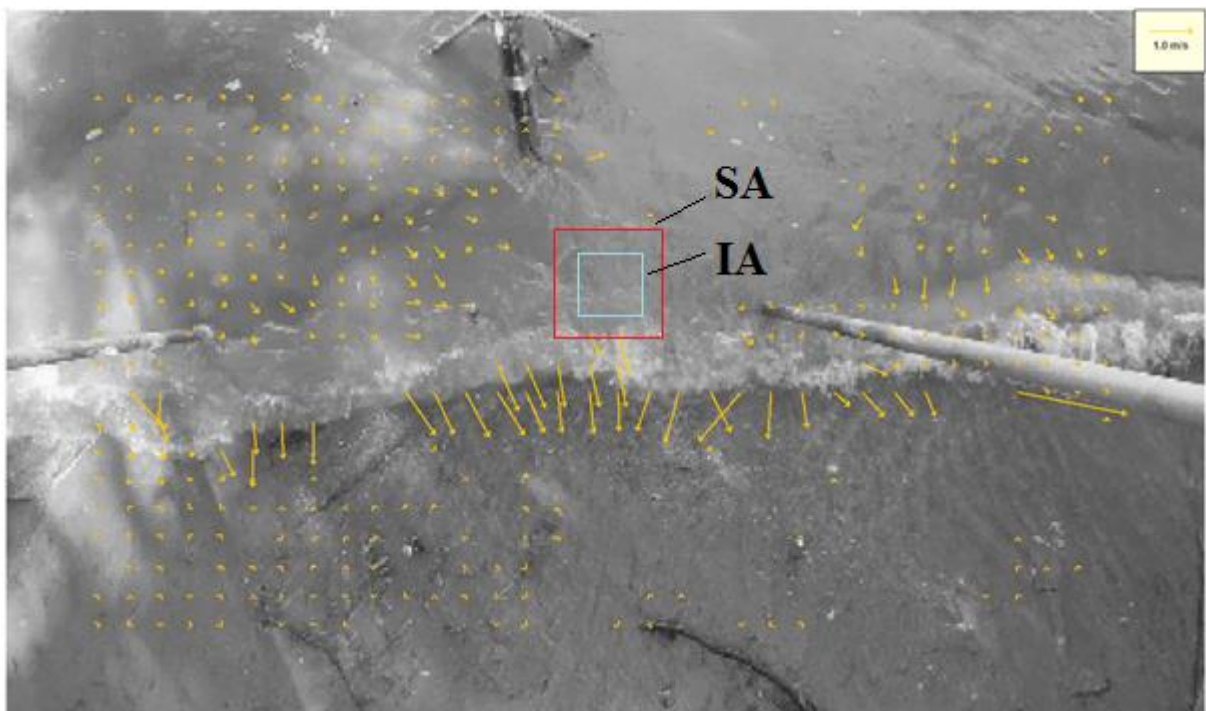
ahol M_i és M_j az IA méretei pixelben; A_{ij} és B_{ij} az szürke árnyalatok intenzitása a két egymást követő IA-ban. A korrelációs együttható csak az SA-n belül eső pontokra lesz számítva. A legmagasabb korrelációs együtthatójú elmozdulás lesz elfogadva, amennyiben az az általunk definiált intervallumon belül esik. Ezen elmozdulás vektorok δt időközzel való osztása eredményeként a vízfelszíni áramlási sebességeit kapjuk.



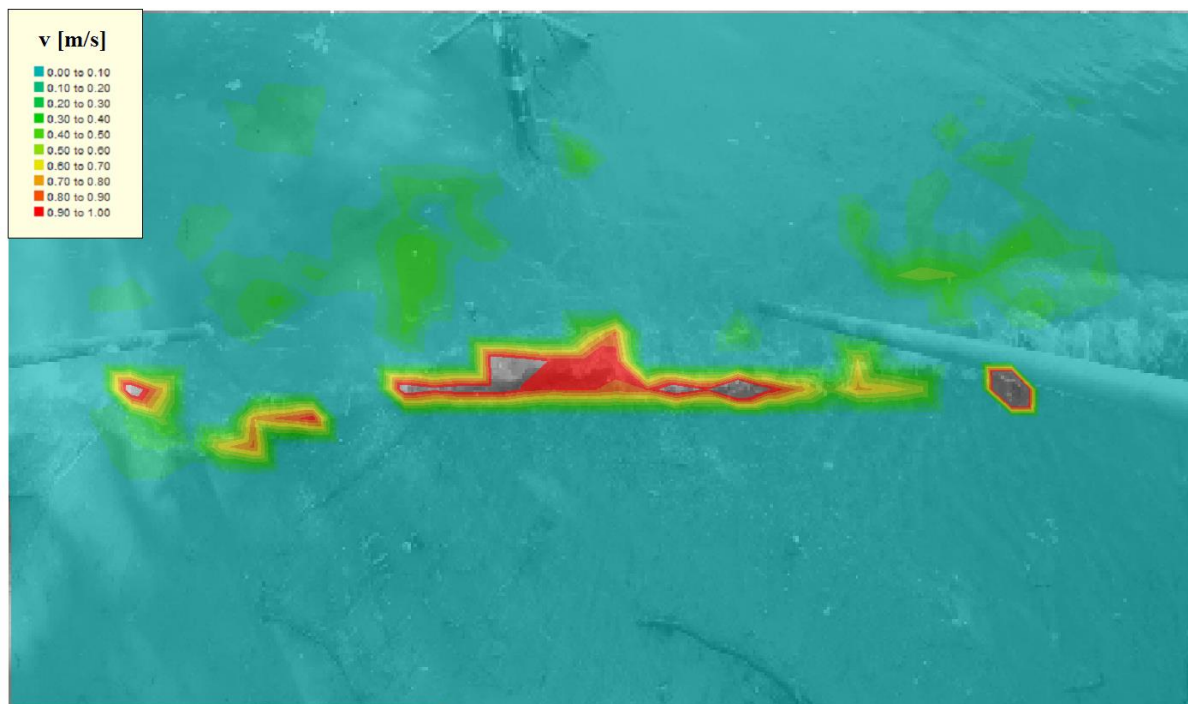
28. ábra – A PIV algoritmus folyamatábrája /Hauet, 2007/

A számítási paraméterek megadását követően, a számítási rácshálót kell definiálni, melynek rácspontjai egy-egy IA középpontjai lesznek. A rácsháló felvétele a befoglaló téglalap sarokpontjainak megadásával, valamint a függőleges és párhuzamos oldalak osztásközeinek megadásával történik.

A számítások előkészítését követően, a szoftver elvégzi minden egymást követő képpár feldolgozását, és megjeleníti az eredményeket vektoros (29. ábra) és mezőszerű (30. ábra) formában.



29. ábra – LSPIV eredmény vektoros megjelenítése



30. ábra – LSPIV eredmény mezőszerű megjelenítése (15. ábrával egyező időpillanat)

Ezt követően lehetőségünk van az eredmények átlagolására valamint keresztaszelvények megadására, ez azonban csak vízhozam számítások esetén indokolt.

A számított eredmények minősége, valamint a számítási időigény rendkívül érzékenyek bizonyult a transzformálási és számítási paraméterek változtatására. Idő hiányában részletes érzékenységvizsgálatot nem volt lehetőségem végezni, az általam végzett vizsgálatok során szerzett tapasztalatokat azonban a következő néhány mondatban összefoglalom.

A transzformációs paraméterként megadott felbontás kismértékű növelése is jelentősen emelte a számítási időigényt, azonban az esetek döntő többségében a számítási eredmények minőségét lényegében nem befolyásolta. Az IA és az SA egymáshoz viszonyított méretének növelése is jelentős többlet számítási igényhez vezetett, ilyenkor ugyanis jóval több korrelációs együttható számítása szükséges egy-egy rácspontra. Az IA méretének megválasztása komoly megfontolásokat igényel. Kellően kicsinek kell lennie, hogy az áramlási sebességek nagyságrendileg vizsgálhatóak legyenek, azonban elég nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy a követni kívánt foltok felismerhetőek legyenek a cellán belül. Az SA méreteinek megválasztásánál célszerű a fő áramlás irányában megnyújtani a területet, mivel várhatóan ilyen irányban fognak elmozdulni a felismert mintázatok. Az időlépés megválasztása adott képsorozat esetén adott, ezt még a képek előkészítése során lehet módosítani. Mi a GoPro által rögzített másodpercenkénti harminc képkockával dolgoztunk, ez 0,033 másodperces időlépésnek felel meg. Az felsorolt paraméterek megfelelő megválasztása esetén úgy tapasztaltam, hogy a 0,75 és 1,00 között elfogadott korrelációs együtthatójú



elmozdulások alapján számított sebességvektorok kellően konzisztens és folytonos eredményekhez vezettek.

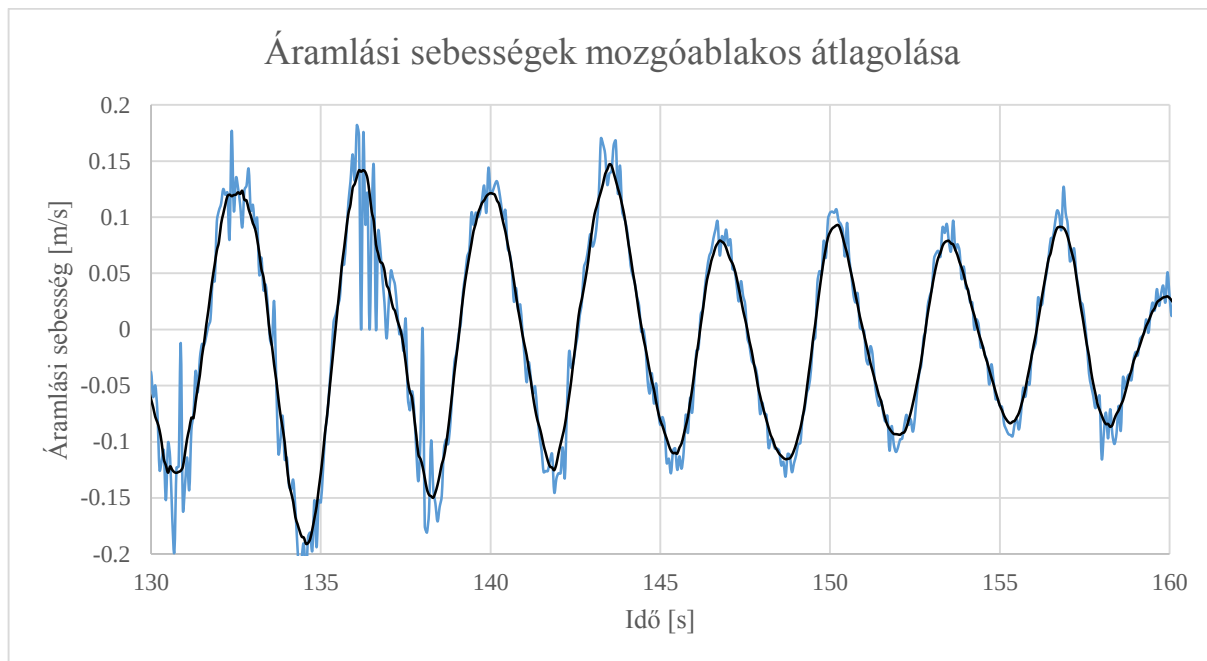
Fontos azonban hangsúlyozni, hogy jelen tanulmány keretein belül rendhagyó vizsgálatokat végeztünk az LSPIV-vel, így az általam iteratív módon meghatározott optimálisnak talált paraméterek vélhetően nem egyeznek az általános alkalmazáskor használatosakkal. Ezen felül a paraméterek megfelelő megválasztása nagymértékben függ a vizsgálati terület nagyságától, illetve az áramlási sebességek nagyságrendjeitől is.

7 Eredmények

7.1 Fenék-csúsztatófeszültségek (ADV mérésekből)

Ahogy azt a 6.3-as fejezetben bemutattam, több módszer is ismeretes a fenék-csúsztatófeszültségek becslésére ADV mérések alapján. Jelen tanulmányban minden mérésre négy módszerrel határoztam meg a csúsztatófeszültségek értékét. Három módszernél a turbulens fluktuáció mértékéből adtam becslést az idősorokra jellemző átlagos feszültségekre: Reynolds-féle módszer, valamint a TKE módszerének két változata. Ezen felül egy maximális feszültség értéket is meghatároztam a hullámzási paraméterek alapján a Jonsson-féle módszerrel az egyes idősorokra, melyek – mint azt láthattuk – mértékadóbbak lehetnek élőhelyes vizsgálatok esetén.

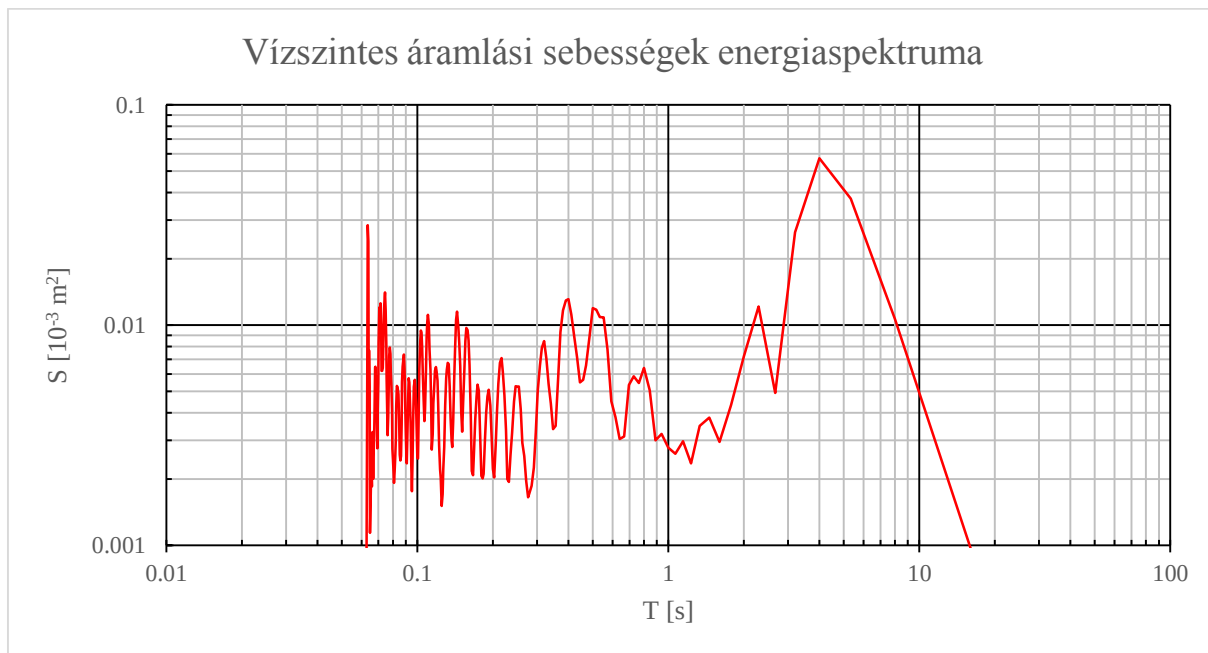
A **27. ábránál** bemutattam, hogy a turbulens fluktuáció mértékét – általános esetben – a teljes adatsor idő szerinti átlagától való eltérésként lehet definiálni. A hullámzások hatására azonban olyan időben változó áramlási sebesség rendszer alakul ki, mely nem jellemezhető egy teljes idő szerinti átlagolással, így az átlagtól való eltérések sem határozhatók meg triviálisan. A szétválasztást a következő feltételezéssel végeztük el: átlagolt áramlási sebességnek a mozgóablakos átlagolással ($n=11$) simított adatsort tekintettük, és a nyers (hibás adatoktól megszűrt) adatsor ezen átlagoktól való eltérését definiáltuk turbulens fluktuációként (**31. ábra**).



31. ábra – Nyers sebesség időssor (kékkel) és a mozgóátlagolt időssor (feketével)

Jól látható, hogy a bemutatott esetben a 11-es mozgóablak mérettel előállított időssor jól felveszi az nyers mérési adatsor karakterisztikáját ($\sim 3,5\text{-}4,0$ másodperces periódusidő figyelhető meg), illetve hogy az átlagolás nem lapítja el a csúcsokat sem. Mindazonáltal szükségesnek találtuk az ablakméret megválasztásának tudományos megalapozását. Ez a sebesség adatsor domináns frekvenciájának, illetve periódusidejének meghatározását igényelte, melyet spektrálanalízis segítségével végeztünk el.

A különböző vízszintes sebesség-összetevők (u , v) mozgási energiáit egy tanszéken fejlesztett MATLAB script segítségével határoztam meg. A MATLAB-ban számított eredmények további elemzését, valamint a mozgási energiák energiaspektrumon való megjelenítését MS Excelben végeztem. A 32. ábrán a fent látható 31. ábrához tartozó mérés azonos szakaszának ($t = 130\text{-}160$ s) energiaspektruma látható a vízszintes tengelyen a periódusidővel. Az ábra tengelyei logaritmikus beosztásúak, így két szomszédos főosztás között tízszeres a viszony.



32. ábra – A 31. ábrán látható áramlási sebességek mozgási energiájának spektruma

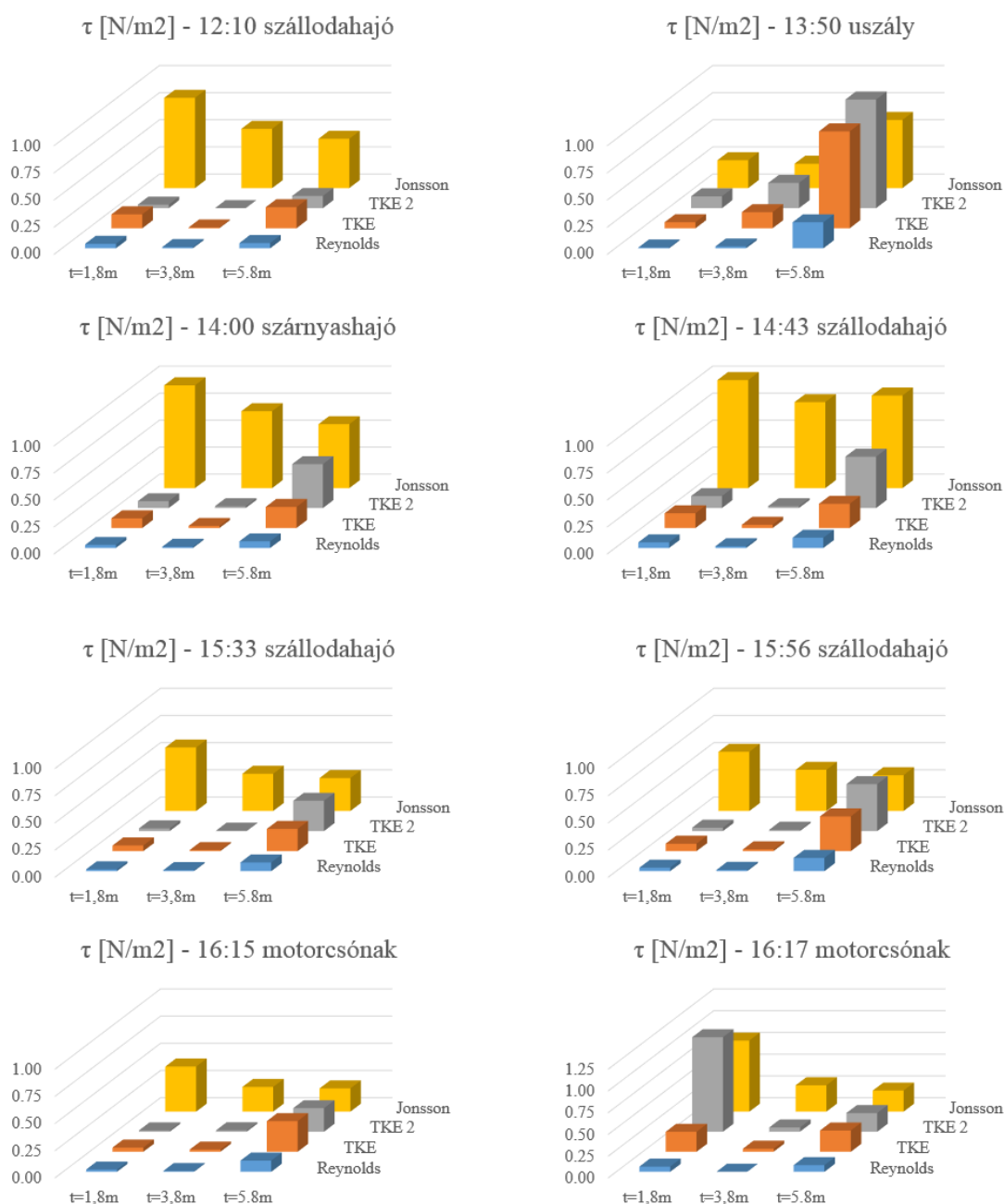
Az áramlási sebességek energiaspektrumában kiemelkedik a kb. 4 másodperces periódusidejű ingadozás. Ez alátámasztja, hogy a 11-es mozgóablakkal előállított simított sebesség idősor a maga 3,5-4,0 másodperces periódusidejével megfelelő közelítés ahhoz, hogy nyers adatsorról leválaszthassuk ezt az időben változó trendet és így meghatározhassuk a turbulenciából eredő fluktuáció mértékét.

A kimutatott 4 mp-es periódusidő a legintenzívebb hullámok érkezésének idejére lettek meghatározva, némi csillapodást követően már nem tudtam ilyen egyértelműen kimutatni olyan domináns periódusidőt amihez igazítani lehetett volna az átlagolás ablakméretét, így a teljes szakaszon azonos ablakméretet használtunk. Ez a feltételezés azonban vélhetően nem befolyásolja érdemben a mértékadó csúsztatófeszültség értékeket, hiszen azok épp az általunk vizsgált, intenzív hullámvázú időszakban jelentkeznek. Ez a lassú és zavaros csillapodás többek közt például azzal is magyarázható, hogy a sarkantyúk közé érkező hullámok hosszú ideig ide-oda verődnek a művek közt, míg le nem csillapodnak.

Az egyes mérésekhez tartozó sebességkomponensek (u , v , w) ilyen szétválasztását követően lehetőségem nyílt becslést adni a kialakuló fenék-csúsztatófeszültségekre, a bemutatott eljárásokkal. A számításokat az adatfeldolgozástól kezdve MS Excelben végeztem, így lehetőségem volt a részeredmények gyors megjelenítésére és értelmezésére. A nagy mennyiségű adat praktikusán kezelhető volt táblázatos formában, a későbbiekben azonban célszerű lehet egy MATLAB script fejlesztése a feladatra.

A **33. ábrán** bemutatom a különböző eljárásokkal számított fenék-csúsztatófeszültségeket a parttól különböző távolságokban mért sebességek alapján. Az így kapott eredmények

értelmezésekor azonban néhány dolgot szükséges figyelembe kell venni. A turbulens fluktuáció mértékének becslését a fent említett feltételezésünkre építettük. Ezen felül az áramlás turbulens jellegéből adódó csúsztatófeszültségek számításakor egy átlagértéket kapunk, mely ugyan hosszú időbeli folyamatok (pl. parterózió) esetén fontos paraméter, azonban jelen esetben – élőhely szempontú vizsgálatok támogatásakor –, nem feltétlenül ez lesz a mértékadó. Itt jön elő a Jonsson-féle módszer, mellyel maximális csúsztatófeszültségek számítására van lehetőség, mely sokkal inkább alkalmas lehet arra, hogy egy adott hullámeseményhez tartozó kritikus elsodródásokat vizsgálhassuk.



33. ábra – Fenék-csúsztatófeszültségek különböző parttól mért távolságokban, a négy eljárással számítva



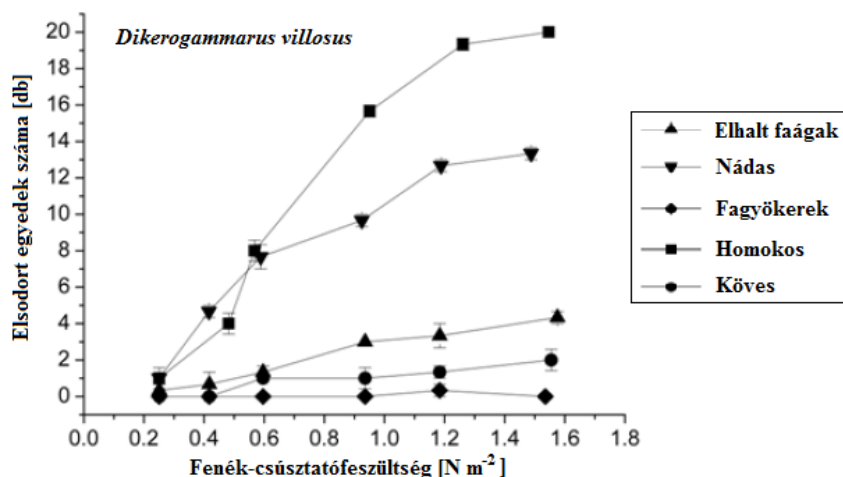
A Jonsson-féle módszer esetén, az uszályhoz tartozó eredményeket leszámítva jól kirajzolódik a sejtésünk, miszerint a part közelében magasabb fenék-csúsztatófeszültségek alakulnak ki. Ez, illetve az uszályok esetén eltérő tendencia azonban nem meglepő, mivel a számított értékek szoros kapcsolatban állnak a maximális fenékközeli sebességekkel (**20. ábra**). Megfigyelhető az is, hogy nagyságrendi eltérés az egyes hajók által gerjesztett csúsztatófeszültség értékek között nem jelentkezik, jóllehet – ahogy azt a következőkben bemutatom – az itt kapott $0,5-1 \text{ N/m}^2$ közötti értékek éppen kritikus állapotot reprezentálhatnak bizonyos élőlények elragadásánál.

Ami az uszály hullámai által keltett csúsztatófeszültségeknél mégis kiemelendő, hogy a fordított tendencia (parttól távolodva növekvő) a turbulens fluktuációra alapuló becslések esetén is egyértelműen kimutatható. Ezen felül a parttól legtávolabb (5,8 m) felállított Vector esetén a turbulens fluktuáció mértéke alapján számított feszültségek a maximális orbitális sebességekből származtatott értékével azonos nagyságrendben mozognak, sőt a turbulens kinetikai energia alapján számított eredmények meg is haladják azt.

Az ADV-kel végzett méréseket összességében sikeresnek tartom, várakozásainknak megfelelő eredményeket kaptunk a számítások során. Fontosnak tartom hangsúlyozni azonban, hogy az általunk alkalmazott módszerek további vizsgálatokat és finomításokat igényelnek, nem szabad átsiklani a feltételezéseken, amiket a számítások elején leszögeztünk. Érdeemesnek tartanám a jövőben más csúsztatófeszültség becslési módszerek alkalmazását is, illetve az egyes módszerek szűk keresztmetszeteinek, érzékenységeinek vizsgálatát.

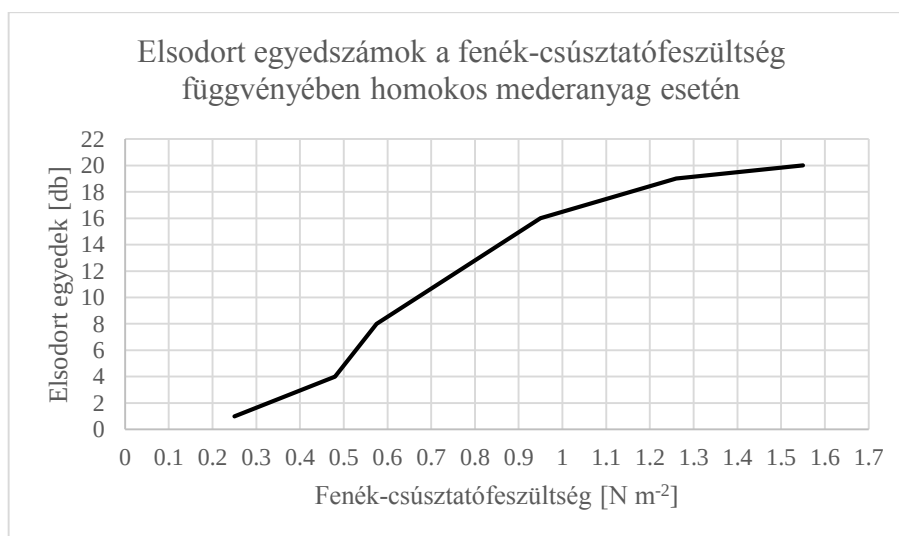
7.2 Elsodort makrogerinctelenek (mintaalkalmazás)

Ahogy azt korábban említettem, a Jonsson-féle módszert már alkalmazták a témában dolgozó biológusok és az így mért/számított feszültségértékeket konkrét makrogerinctelen fajok elsodródásával is kapcsolatba hozták mind laboratóriumi, mind terepi mérések során, különböző meder borítottságok esetén (*Gabel, 2012*). Egy ilyen eredménygrafikon látható a **34. ábrán**.



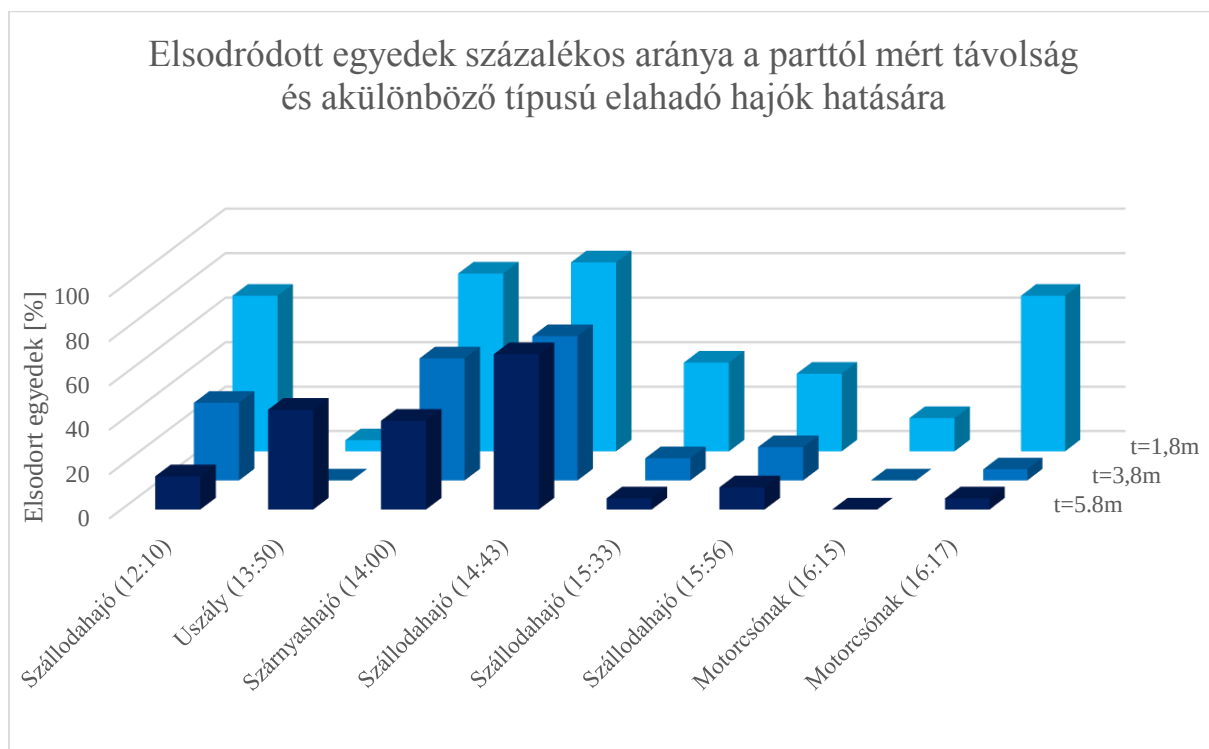
34. ábra – Elsodort egyedek száma a csúsztatófeszültség függvényében különböző mederanyagok esetén

A fenti ábrán egy apró rákfaj, a *Dikerogammarus villosus* elsodort egyedszámai láthatók a fenék-csúsztatófeszültségek függvényében, $n=20$ kezdeti létszám esetén. Szignifikáns különbségek figyelhetők meg a különböző mederborítottságok esetén, jól látható, hogy a mederanyagok morfológiai komplexitásának növekedésével jelentősen csökken az elsodort egyedek száma. Az ábra azért került bemutatásra, hogy szemléltessem, milyen módon lehet összekapcsolni az általunk mért/számított eredményeket élőhely szempontú vizsgálatokkal. Ehhez azonban a jövőben mindenképp szükségesnek látom a biológusokkal történő kooperációt, ugyanis a vizsgálatok sikerességéhez mindkét szakág hozzáértése szükséges. A következőkben egy mintaalkalmazást mutatok be, ahol a mért fenék-csúsztatófeszültségek értékei alapján becslést teszek a várhatóan elsodródó egyedek számára. Az általunk vizsgált területen jellemzően homokos-aprókavicsos mederanyag volt a jellemző, így a **34. ábrán** látható *Dikerogammarus villosus* egyedeinek elsodródását a homokos mederanyag esetén mért eredmények (**35. ábra**) alapján végeztem el.



35. ábra – Elsodort *Dikerogammarus villosus* egyedek száma a csúsztatófeszültségek függvényében (kezdeti létszám: $n=20$)

Az egyes hullámjelenségekhez tartozó, különböző parttól mért távolságokban számított maximális csúsztatófeszültségek alapján a fenti ábrát felhasználva becsültem meg az elsodródó egyedek várható százalékos arányát.



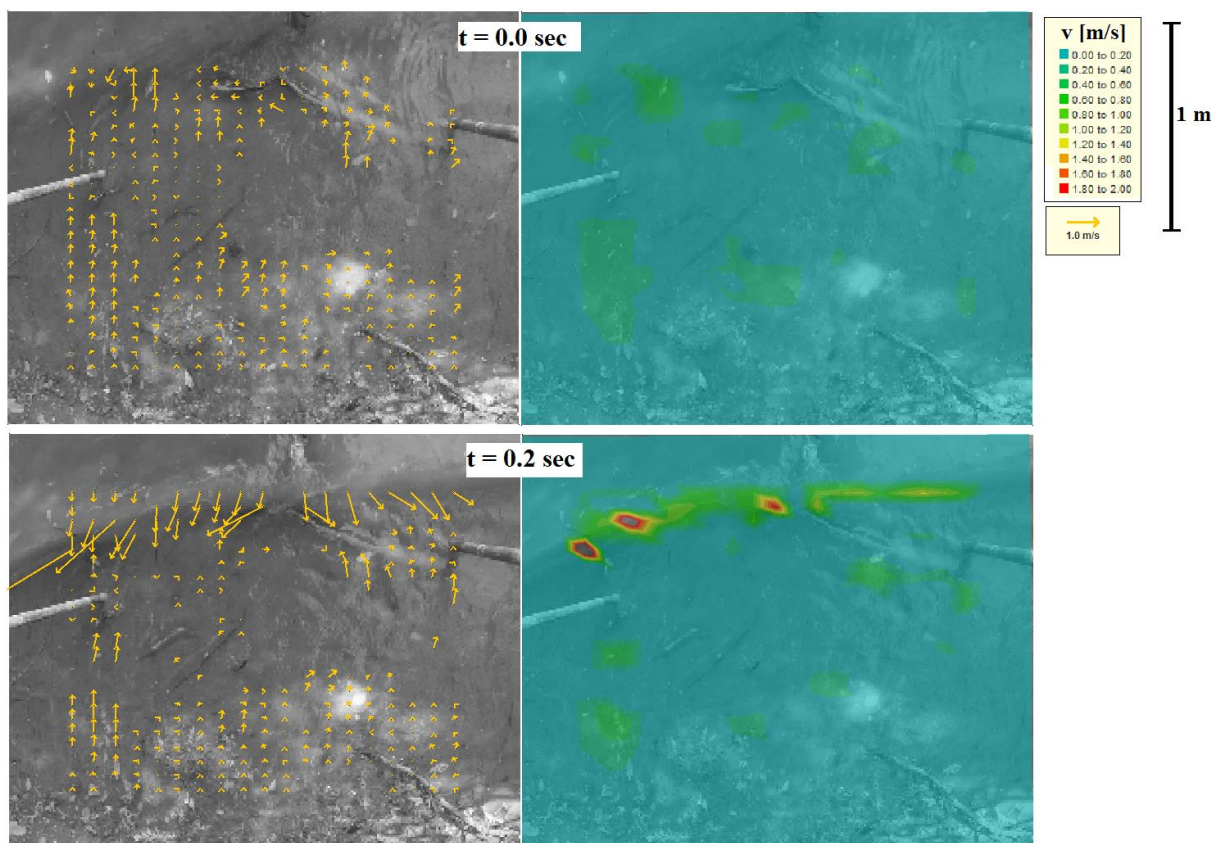
36. ábra – Elsodródott egyedek százalékos aránya különböző parttól mért távolságokban, más-más elhaladó hajók hatására

A csúsztatófeszültségek és az elragadott egyedek száma között durva közelítéssel lineáris kapcsolat áll fent, így a fenti ábrán látható eredmények a maximális sebességek és maximális Jonsson-féle feszültségek analógiáját követik. Megfigyelhető tehát, hogy a parthoz legközelebb eső, legsekélyebb vizű zónában várható az egyedek legnagyobb arányú elsodródása. A *Dikerogammarus villosus* számára a szárnyashajó és a 14:43-as szállodahajó volt a legkritikusabb az elragadások tekintetében.

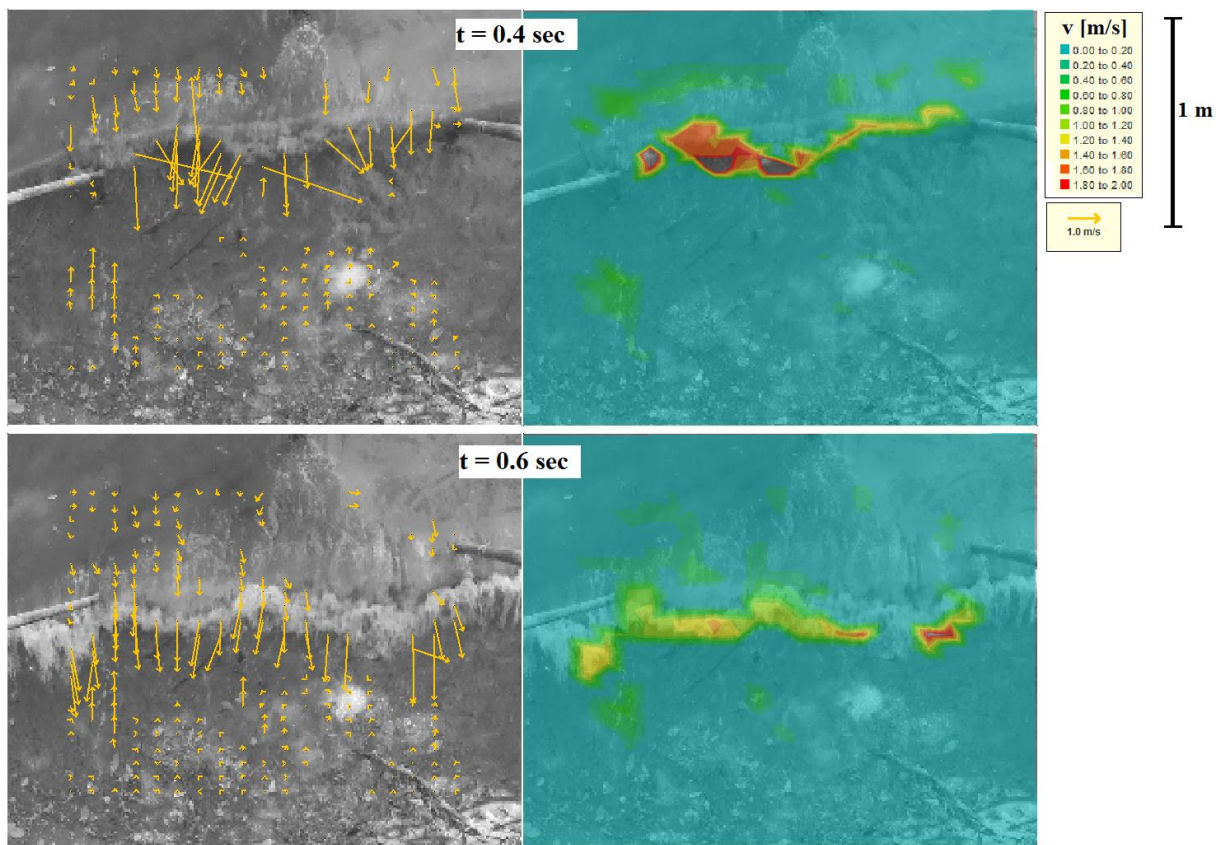
A fenti eredményekkel kapcsolatban rendkívül fontos hangsúlyozni, hogy egy mintaalkalmazásról beszélünk. Az eredmények a vizsgált területre nem tekinthetők reprezentatívnak, célunk az volt, hogy bemutassuk, hogy amennyiben ismerjük egy adott – hullámmás által veszélyeztetett – élőlény populációjának várhatóan elsodort hányadát különböző fenék-csúsztatófeszültségek esetén, úgy lehetőségünk van a **36. ábrán** láthatóakhoz hasonló becsléseket végezni. Jelen esetben ezek a becslések rendkívül kis ($n=20$) minta alapján történtek, így a **35. ábrán** bemutatott összefüggés nem tekinthető általános érvényűnek az adott faj esetére. Újra aláhúznám: első körben célszerű lenne vizsgálni, hogy az adott vizsgálati területen mik a jellemző fajok, majd azok esetére szükséges elvégezni ezeket a célirányos vizsgálatokat.

7.3 LSPIV-vel számított sebességmezők

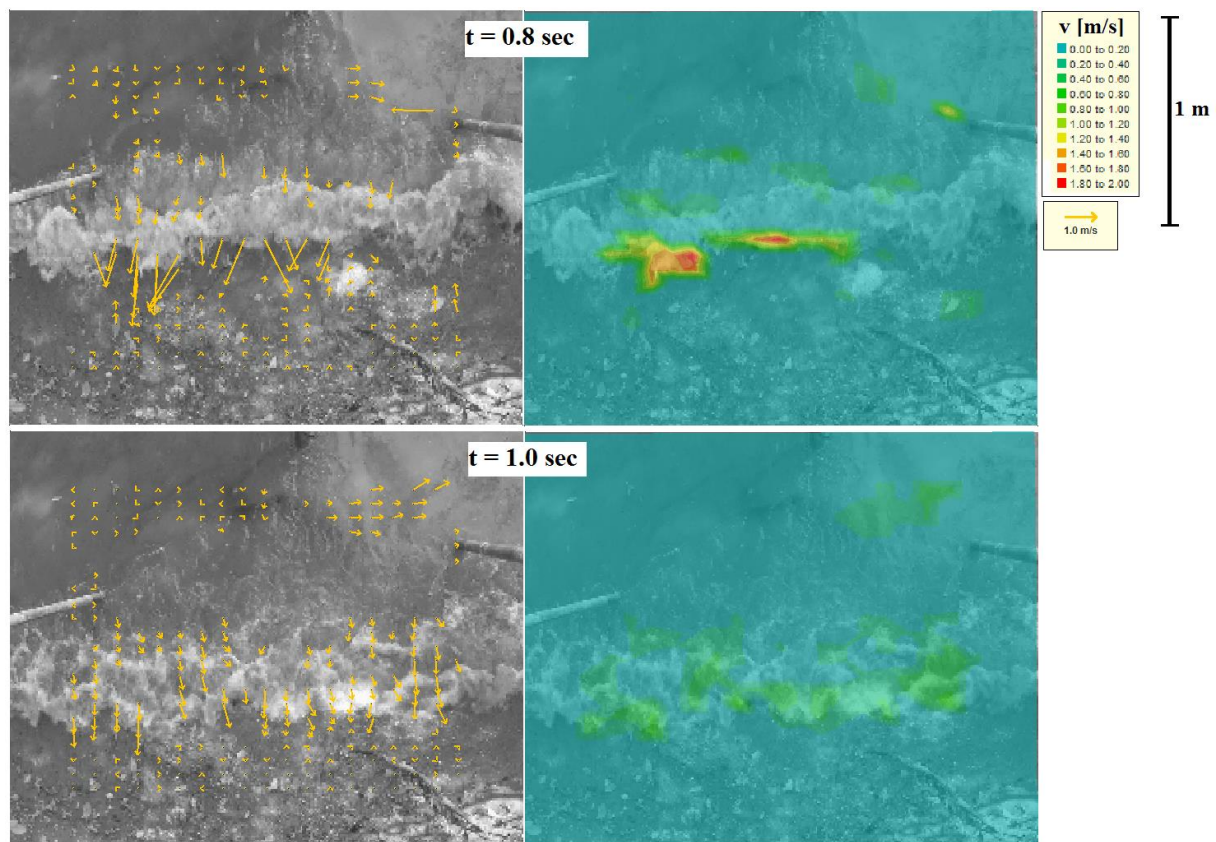
A mérési kampány során három elhaladó hajót követő hullámeseményt rögzítettünk nagyfelbontású videofelvételekre. Jellemzően 10-15 perces videókat készítettünk, azonban ezeknek csak rövid (~15 másodperces) szakaszait dolgoztunk fel a **6.4-es fejezetben** bemutatottak szerint. Ezeket a részleteket általában a hajók elhaladását közvetlenül követő, intenzívebb hullámozások idejéről választottuk, kíváncsiak voltunk, hogy mik a határai – az egyébként vízhozam becslésre kifejlesztett – módszernek hullámozások hatására kialakuló áramlások leírásánál. A következő ábrákon (**37-40. ábra**) egy völgymentben haladó szállodahajó által keltett hullám partközeli kifutását és megtörését bemutató eredménymezőket mutatom be. Az ábrák bal oldalán vektormező, jobb oldalán felületszerű mezős áramlási sebesség eloszlások láthatók. Az ábrák a legintenzívebb hullámozású szakasz néhány másodpercét prezentálják. Jól látható, hogy a PIV algoritmus még ilyen zavaros vízfelszín esetén is kellően konzisztens, folytonos eredményeket ad. Az mezők 0,2 mp-es időlépéssel követik egymást.



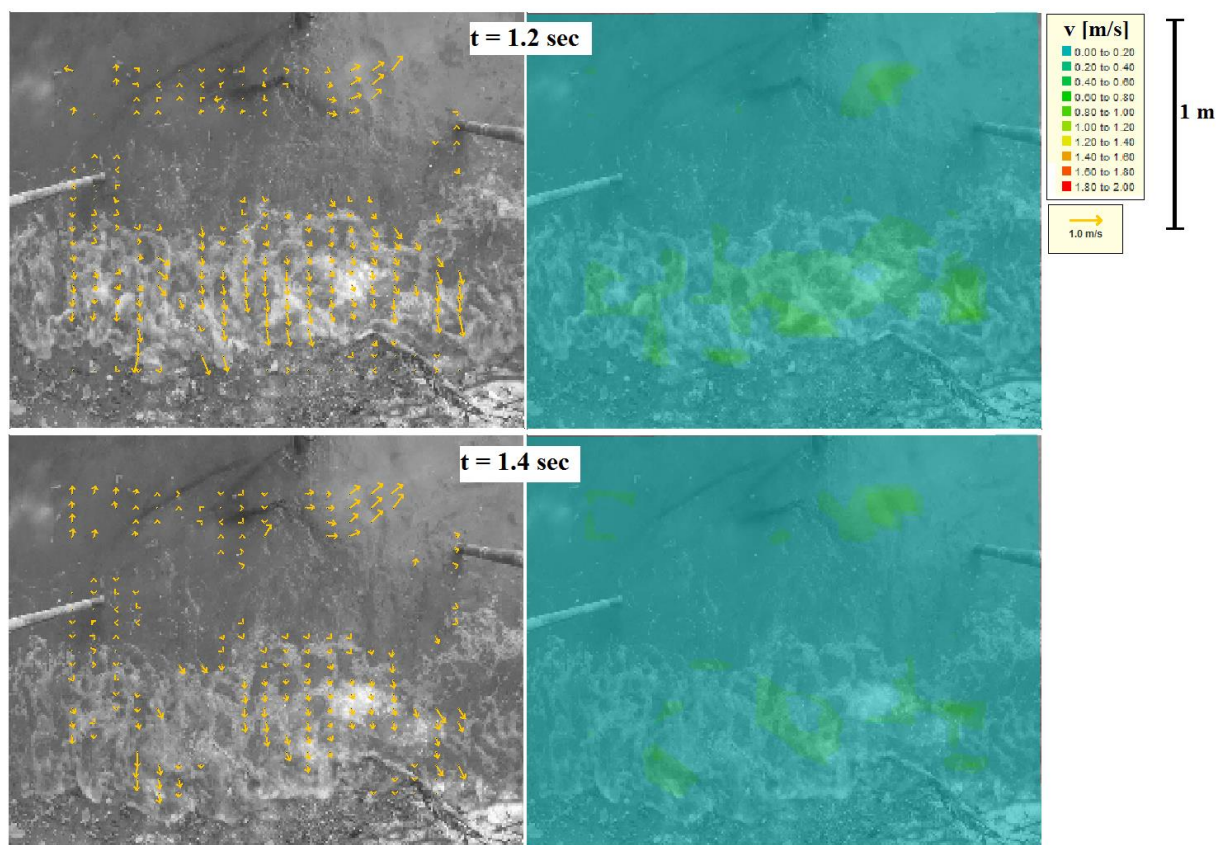
37. ábra – LSPIV-vel számított sebességmezők (0,0-0,2 sec)



38. ábra – LSPIV-vel számított sebességmezők (0,4-0,6 sec)



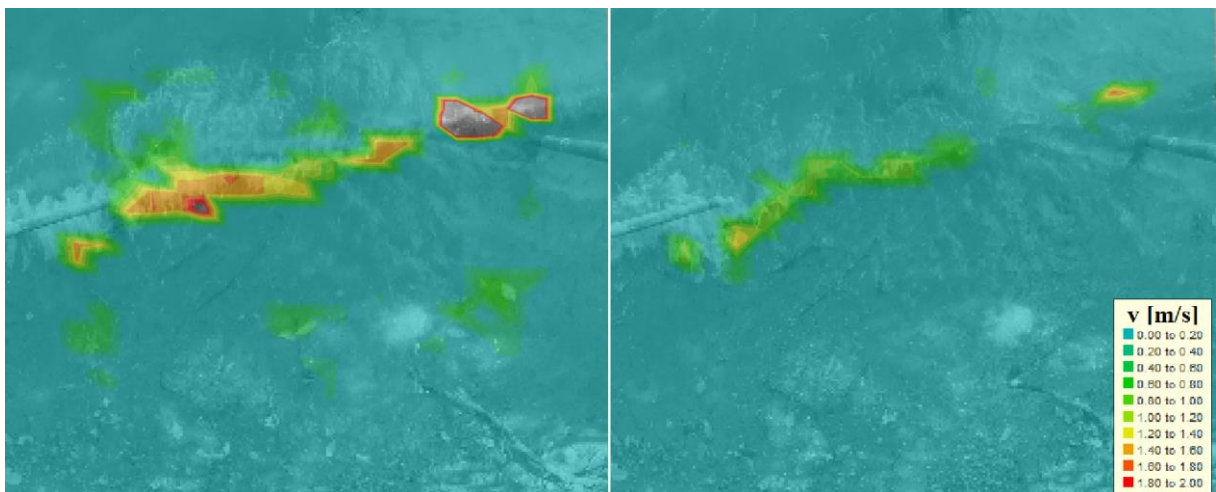
39. ábra – LSPIV-vel számított sebességmezők (0,8-1,0 sec)



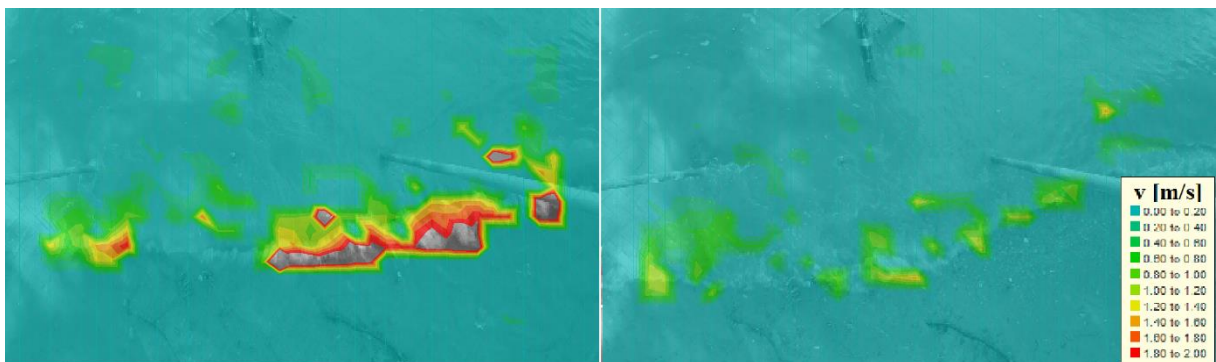
40. ábra – LSPIV-vel számított sebességmezők (1,2-1,4 sec)

Mind a vektoros, mind a felületszerű megjelenítés esetén jól kirajzolódik a megtörő hullámfront, valamint az első képkockán az általunk vizsgált hullámot megelőző, víztest felé történő visszaáramlás is megfigyelhető. A sebességekhez tartozó skála, valamint a referenciavektor nagysága már önmagában sugallja, hogy a maximális számított sebességek 2 m/s körül mozogtak. Az eredmények értelmezése szempontjából fontos újra megemlíteni, hogy a méréseket két sarkantyú közötti limányos területen végeztük, egy áramlási holtterben. Az itt nyugalmi állapotban megjelenő áramlási sebességek elhanyagolhatóak voltak a hullámvázakkor mértékhez képest, ezt ADV méréseink is alátámasztották.

A videóra vett három esetből az egyik az uszály (13:50) által keltett hullámváz volt. Ebben az esetben – ahogy azt korábban említettem – a hullámjelenség igencsak gyenge volt, a partra érkező hullámok nem törtek meg, így nem alakult ki az a hab a vízfelszínen, melyet az LSPIV módszer követni tudott volna. Ez okból kifolyólag csak a másik két hajó (12:10 - szállodahajó, 14:43 - szállodahajó) által keltett hullámváz került feldolgozásra a metódussal. E két esetben elvégeztem a legintenzívebb hullámvázakor, valamint némi csillapodást követően kialakuló sebességek összehasonlítását (41-42. ábra).



41. ábra – Szállodahajó (12:10) által keltett maximális (balra) és csillapodott (jobbra) hullám megtörésekor számított sebességnagyságok



42. ábra – Szállodahajó (14:43) által keltett maximális (balra) és csillapodott (jobbra) hullám megtörésekor számított sebességnagyságok

A két hajó által keltett hullámmás hatására kialakuló áramlási sebességek maximális értékei közel azonosnak (2 m/s) adódtak a két esetben. Megfigyelhető továbbá, hogy a legnagyobb intenzitású hullámok után nem sokkal, némi csillapodást követően a kialakuló áramlási sebességek közel felükre csökkentek. Ezen felül fontos megjegyezni, hogy az ábrák bal oldalán látható maximális sebességeket produkáló, egymást gyorsan követő hullámok csak rövid ideig (30-60 mp) jelennek meg egy hajó elhaladtát követően, tartóssági szempontból sokkal inkább jellemzőek az enyhébb (jobb oldalt látható) percekén keresztül érkező hullámok. Szerencsés lett volna, ha más típusú hajók (uszály vagy szárnyashajó) esetére is sikerül megfelelő videókat készítenünk, így a korábbi elemzésekhez hasonlóan az azok közt esetlegesen fellépő különbségek is kimutathatóak lehettek volna.

A mérési installáció újszerű volt, így számos olyan hasznos tapasztalatot szereztünk, mely a jövőben történő hasonló mérések minőségét és hatékonyságát javítja (ez az ADV-k rögzítésével kapcsolatban is igaz). A kamera rögzítéséhez készített állvány maradéktalanul teljesítette a vele szemben támasztott követelményeket, a kamera a legintenzívebb hullámjelenségek esetén sem mozdult el észrevehetően. Felmerült azonban egy olyan



probléma, mely utólag visszatekintve triviális, azonban első alkalommal nem gondoltunk rá. A műszer víz felé eső lábai minden felvételen belógnak a képbe, így az egyébként mozgó minták közt megjelent két-két statikus objektum, melyek lokális számítási hibákhoz vezetett. Az időlépéses ábrákhoz tartozó felvételek esetén ez a hiba olyan mértékű volt, hogy a számítási rácshálót végül nem a teljes rögzített területre határoztam meg, a képek jobb 1/3-át fel sem tudtam használni a számításhoz. A jövőben tehát olyan állvány alkalmazása javasolt, melynek kialakítása ilyen módon nem zavarja az eredmények minőségét.

Figyelembe véve, hogy a módszer elsősorban vízhozam becslésre lett kifejlesztve, az általunk számított újszerű eredmények mindenképp értékesek és jól bizonyítják, hogy az LSPIV-ban más jellegű mérések végzésére is van potenciál. Jelen tanulmány keretein belül ismertettem az LSPIV elméleti hátterét, a számítások menetét, valamint bemutattam a módszer alkalmazhatóságát a part közelében megtörő hullámok vizsgálata esetén. Az így számított sebességeloszlások alapján a következő fontos lépés a hullámok kifutásakor és megtörésekor kialakuló elragadó erők számítása, melyek élőhely szempontból legalább olyan súlyos bírnak, mint a – hullámvészteg hatására – szárazra nem kerülő területeken kialakuló csúsztatófeszültségek. Kutatásaink jelenlegi állapotában azonban ilyen jellegű vizsgálatokat még nem állt módunkban végezni, ez további szakirodalmi utánajárást, esetleg saját módszerek kifejlesztését igényli.

8 Összefoglalás

TDK dolgozatomban a hajók keltette hullámok litorális zónára való hatását vizsgált, különös tekintettel a fenék-csúsztatófeszültségekre, melyek kiemelt fontosságúak mind a parteróziós folyamatok, mind a vízi ökoszisztéma szempontjából. Bemutattam, hogy milyen terepi mérőműszerekkel és mérési eljárásokkal vizsgálhatók a hullámvészteg hatására kialakuló áramlási viszonyok.

Három akusztikus Doppler-elvű mérőműszer szinkronizált idősorai alapján vizsgáltuk a fenék közeli áramlási sebességek tér- és időbeli változékonyságát valamint rámutattunk a kialakuló áramlások komplexitására. Meghatároztuk az egyes hajók elhaladtakor kialakuló maximális áramlási sebességeket, és beláttuk, hogy ez az érték a parthoz közeledve növekvő tendenciát mutat. Megvizsgáltuk a vízszintes síkbeli áramlási sebességek szélrózsaszerű eloszlását és beláttuk, hogy a hajók haladási iránya nincs hatással a fenék közeli sebességek fő irányultságára.

Az ADV-k háromdimenziós áramlási sebességmérései alapján négy eltérő módszerrel adtunk becslést a litorális zónában kialakuló fenék-csúsztatófeszültségekre. Az áramlás turbulens fluktuációjának mértéke alapján három eltérő módszerrel meghatároztam az egyes hullámvészteg



események alatt kialakuló átlagos csúsztatófeszültségeket. A hullámozást jellemző fenékközeli paraméterek alapján egy negyedik módszerrel is becslést adtam a kialakuló feszültségek maximumára. Élőhelyes vizsgálatok esetén vélhetően ezek a maximális feszültségek a mértékadók, mint azt láttuk, a témában dolgozó biológusok is ezzel hozták kapcsolatba a partközeli élő makrogerinctelenek elsodródásának mértékét. Beláttuk, hogy a parthoz közeledve a sebességek és így a belőlük származtatott csúsztatófeszültségek is növekvő tendenciát mutatnak.

A számított maximális csúsztatófeszültségek, valamint egy külföldi tanulmány (*Gabel, 2012*) eredményei alapján egy mintaalkalmazással bemutattuk hogyan hasznosíthatók az általunk meghatározott feszültségek és azok alapján, hogyan becsülhető meg egy adott makrogerinctelen faj populációjának várhatóan elsodort százalékos aránya. Felhívtuk a figyelmet a külföldi eredmények adaptálásával kapcsolatos problémákra, hangsúlyoztuk a hasonló célirányos hazai mérések szükségességét.

A befejezésben az LSPIV egy újszerű alkalmazásának eredményeit mutattam be. A módszerrel sikeresen számítani tudtuk a partvonal közelébe érkező és ott megtörő hullámok esetén kialakuló felszíni áramlási sebességek nagyságát és irányát. A biztató első eredményeket látva érdemesnek látjuk a módszerrel való munka további finomítását, valamint feltétlenül szükségesnek tartjuk az eredmények alapján történő elragadó erők számítási metódusának kialakítását.

9 Következtetések

A hajók keltette hullámozás 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 TDK dolgozatban bemutatott eredmények világossá tették, hogy a hullámok által gerjesztett áramlási sebességnövekmények és a lokális fenékcúsztatófeszültség átmeneti jelentős növekedése számszerűsíthető, sőt a megtörő hullámok dinamikája az LSPIV módszer segítségével szintén detektálható és kvantitatív módon értékelhető. A dolgozatnak értelemszerűen nem volt célja, hogy összekapcsolja a hullámozás fizikai paramétereit a vizsgált területre jellemző élőlények viselkedésével, de a témát gondozó biológusok és ökológusok számára felkínálja a mélyebbre ható összekapcsolt vizsgálatok lehetőségét.

A vizsgálat során – annak úttörő jellegénél fogva – számos kérdés (pl. a lineáris hullámelmélet alkalmazhatósága) és jövőbeli kutatási irány fogalmazódott meg. A folytatásban célszerűnek tartanám kiterjeszteni a mérést 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 (képbeállítás, 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 erő becslésre fogom alkalmazni, ahogyan azt az ADV alapú méréseknél is tettem, de a megtört hullámok eróziós hatásának számszerűsítése nem kézenfekvő feladat, további kutatást igényel. A kutatás folytatásában tervezem 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.



Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki:

Dr. Baranya Sándornak, aki témavezetőmként végig irányította és segítette a munkámat.

Dr. Józsa János, tanszékvezető egyetemi tanárnak, amiért biztosította a mérések létrejöttének körülményeit, valamint hasznos elméleti jellegű tanácsaiért és ötleteiért.

Dr. Krámer Tamásnak, a hullámelméleti szemlélettagításért, valamint a spektrálanalízis elvégzésében nyújtott segítségéért.

Pozsgai István és Tóth Károly technikusoknak, a műszerállványok elkészítéséért, valamint közreműködésükért a mérések során.



10 Irodalomjegyzék

1. BME, VIT: Hidraulika II. egyetemi jegyzet. HEFOP/2004/3.3.1/0001.01
2. Fleit Gábor: Élőhely szempontú folyószabályozás megalapozása korszerű hidromorfológiai adatelemzéssel. Tudományos Diákköri Dolgozat, 2013
3. Gabel, F.: Impacts of ship-induced waves on benthic macroinvertebrates (PhD Dissertation). 2012
4. Hauet, A: MAT_LSPIV User Manual. IIHR – Hydroscience & Engineering, The University of Iowa, Iowa City, USA, 2007
5. Hosseini, S.A., Shamsai, A., Ataie-Ashtiani, B.: Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter. Flow Measurement and Instrumentation 17 (2006) 59–68
6. Kim, S.-C., Friedrichs, Member, C. T., ASCE, J. P.-Y. Maa, L. D. Wright: Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimeter data. Journal of Hydraulic Engineering / June 2000 400-406
7. Krouzecky, N., Fenton, J. D., Huber, B., Klasz, G.: 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
8. Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Le Coz, J.: Gauging extreme floods on YouTube: Application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges, Hydrological Processes (submitted)
9. Liedermann, M., Tritthart, M., Hoyer H., Schludermann, E., Keckeis, H., Habersack, H.: Effects of vessel-induced waves on different bank types and their impact on the 0+ fish fauna. 7th ISE & 8th HIC, Chile, 2009
10. Muste, M., Fujita, I., Hauet, A.: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. Water Resources Research. Vol. 44 (4)
11. Soulsby R.L., Clarke, S.: Bed Shear-stresses Under Combined Waves and Currents on Smooth and Rough Beds. Produced within Defra project FD1905 (EstProc), August 2005