



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Folyami görgetett hordalékmérési módszerek terepi és számítógépes vizsgálata

Tudományos Diákköri Konferencia 2018.

Készítette:

Csiti Bence

Konzulensek:

Dr. Török Gergely Tihamér
tudományos segédmunkatárs

Dr. Baranya Sándor
egyetemi docens

Fleit Gábor
doktorandusz

Dr. Rákóczi László
VITUKI, ny. tudományos tanácsadó



A kutatás az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-2-1
kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával
készült.

Budapest, 2018.

Tartalomjegyzék

| | |
|---|----|
| Tartalmi kivonat | 3 |
| 1 Bevezetés | 4 |
| 2 A görgetett hordalékról | 5 |
| 3 Görgetett hordalék mintavevők..... | 6 |
| 3.1 Fejlődésük..... | 6 |
| 3.2 Károlyi-féle mintavevő..... | 9 |
| 3.3 Tapasztalatok a mintavevővel | 10 |
| 4 Numerikus modellezés..... | 16 |
| 4.1 REEF3D..... | 16 |
| 4.2 Verifikáció | 19 |
| 4.3 A Károlyi-féle hordalékfogó numerikus vizsgálata..... | 21 |
| 5 Indirekt hordalékhozam mérési módszerek | 25 |
| 5.1 ADCP alapú, Euler-féle hordalékhozam becslés..... | 26 |
| 5.2 Az ADCP alapú módszer tesztelése | 28 |
| 5.3 A módszer továbbfejlesztése | 33 |
| 5.4 A módszer alkalmazása terepi mérések során | 40 |
| 6 Összefoglalás | 43 |
| Köszönetnyilvánítás | 44 |
| Irodalomjegyzék..... | 45 |
| Függelék | 47 |

Tartalmi kivonat

Napjainkban fokozódó tudományos érdeklődés övezi a vízfolyások morfológiai változásival, hordalékháztartásukkal, ökológiai és élőhely-hidraulikai vizsgálataival foglalkozó kutatásokat. Jelen dolgozat ezen kutatói irányvonalba illeszkedve kívánja bemutatni a morfológiai változásokban jelentős szerepet játszó görgetett hordalékmozgás jellemzőit és mintavételi lehetőségeit. Terepi mérések során tesztelem a magyarországi vízmérnöki gyakorlatban, dunai környezetben leggyakrabban alkalmazott hagyományos hordalékmérési eljárást. Ezentúl vizsgálom a fejlesztés alatt álló, ultrahangos görgetett hordalékhozam becselő módszer hazai környezetben történő alkalmazását.

A mederalkotók és ezáltal a mederfenéken gördülő szilárd hordalék összetétele, szemcsenagysága jelentősen különbözik egyes eltérő jellegű folyószakaszokon. Ennek következtében a lokális viszonyoknak legjobban megfelelő monitoring terv kidolgozása kulcsfontosságú. Dolgozatomban elsősorban a magyarországi Felső-Duna vegyes szemösszetételű medre szempontjából releváns mintavételi eljárásokat, valamint hordalékhozam becselő módszereket mutatok be.

A tanulmányban bemutatásra kerülnek a közvetlen fizikai mintavétel lehetőségei, külön figyelmet szentelve a hazai fejlesztésű és napjainkban is használt Károlyi-féle mintavevőnek. A terepi mérések és az archív adatok feldolgozása mellett, a mintavevő numerikus modellezéssel történő részletes áramlástanai vizsgálatait is elvégzem. A számítógépes szimulációs módszertan tesztelését és igazolását hasonló mintavevők körül végzett, jól dokumentált laboratóriumi áramlásmérések alapján végzem el. A számítás végrehajtásához a REEFF3D, nyílt forráskódú és szabad felhasználású numerikus megoldót alkalmazom, mellyel a modellezni kívánt mintavevők körüli áramlási struktúrák térbeli számítása kivitelezhető. A bemutatott vizsgálattal céloim egy olyan numerikus modellezésen alapuló módszertan bemutatása, ami nagyban hozzájárulhat hordalék mintavevő eszközök tervezéséhez és teszteléséhez.

Dolgozatomban ismertetem továbbá az indirekt, ultrahangos görgetett hordalékbecselő eljárást is, ami napjaink egy hangsúlyos kutatási témáját képezi. Kísérletet teszek az eljárás vizsgált Duna-szakaszon történő alkalmazására, az eredményeket pedig a rendelkezésemre álló terepi mérések alapján értékelem.

1 Bevezetés

Napjainkban fokozódó tudományos érdeklődés övezi a vízfolyások morfológiai változásival, hordalékháztartásukkal, ökológiai és élőhely-hidraulikai vizsgálataival foglalkozó kutatásokat. Jelen dolgozat ezen kutatói irányvonalba illeszkedve kívánja bemutatni a morfológiai változásokban jelentős szerepet játszó görgetett hordalékmozgás jellemzőit és mennyiségi-minőségi vizsgálatának lehetőségeit. Munkámmal a SEDDON II. – A Duna hordalékvizsgálata elnevezésű (ATHU10) határon átnyúló nemzetközi együttműködésben kívánok részt venni, mely projekt keretein belül egy a Felső-Duna szakaszra tervezett monitoringállomás tervezéséhez szeretnék hozzájárulni. Ennek okán dolgozatomban elsősorban a magyarországi Felső-Duna vegyes szemösszetételű medrének vizsgálatán keresztül mutatom be a jelenleg alkalmazott görgetett hordalék mintavételi eljárásokat, valamint hordalékhozam becselő módszereket.

Terepi mérések során teszteltem a magyarországi vízmérnöki gyakorlatban alkalmazott hagyományos direkt mintavételi eljárások során használt Károlyi-féle kicsinyített hordalékfogót. A mérési kampányok során arra az eredményre jutottam, hogy a kicsinyített mintavevő dunai folyami környezetben nem alkalmazható megfelelően, így az alkalmazása során gyűjtött eredményeket felül kell bírálni. A terepi mérések tapasztalata alapján szükséges a mérési módszertan átdolgozása, melynek két eltérő lehetőségét vizsgálom meg dolgozatomban. Egyrészt a hagyományos direkt mintavételi eljárás fejlesztésének lehetőségét, másrészt egy indirekt hordalékhozam becselő módszertan alkalmazhatóságát.

A direkt mintavételi eljárás kapcsán numerikus modellezés segítségével megvizsgálom a hordalékfogó áramlástani tulajdonságait. Ehhez egy nemzetközi viszonylatban is újszerű, strukturált számítási rácshálóval rendelkező célszoftvert, a REEF3D nyílt forráskódú megoldót alkalmazom. A módszer igazolásához laboratóriumi mérések eredményeit használom fel (Bunte et al., 2017), majd részletes vizsgálatot végzek a Károlyi-féle mintavevőn.

Ezt követően egy korszerű, fejlesztés alatt álló indirekt hordalékhozam becselő eljárást vizsgálok meg. Ennek keretében ADCP mérések adatai alapján gyűjtök információt a mozgó hordalékréteg sebességéről, majd ennek segítségével számítok görgetett hordalékhozam értékeket. A módszer ellenőrzését korábbi Dráván végrehajtott mérések alapján végzem, majd eredményeimet felhasználva továbbfejleszttem az eljárást. Ezt követően a fejlesztett módszertant alkalmazva hordalékhozam becslést hajtok végre a terepi méréseink során vizsgált folyószakaszra.

2 A görgetett hordalékról

A környezetünkben található vízfolyások mozgási energiája a forrásterület és torkolati szakasz gravitációs potenciálkülönbségéből származik. A gravitációs tér folyamatos gyorsulásra kényszeríti a víztestet, azonban mozgása során különböző ellenállások akadályozzák, fékezik. Ezek a hatások többek között a víztestben fellépő belső súrlódási erők és turbulencia, a víztest külső térrel (levegő, meder) való érintkezésénél fellépő súrlódási erők, továbbá a víztestben található szerves és szervetlen részecskéket magával ragadó hordalékmozgató erők (Bogárdi, 1939).

A vízfolyásokban megjelenő szilárd anyagot mozgása alapján három csoportba oszthatjuk. Folyamatos szuszpenzióban lévő lebegtetett hordalékra, a mederfenékkal időszakos vagy folyamatos kapcsolatban lévő görgetett hordalékra, valamint a rendkívül apró kolloid méretű, nyugalmi víztérben is lebegő oldott anyagra (Southard, 2006). Jelen dolgozatban csak a görgetett hordalékmozgás kerül részletes bemutatásra.

Görgetett folyami hordaléknak nevezzük a víztér által szállított azon szilárd anyagokat, melyek tömege kellően nagy ahhoz, hogy a vízfolyás mozgási energiája ne tudja őket folyamatos lebegésben tartani. A vízben megjelenő hordalék minősége és mennyisége mindenkor az adott folyószakaszra jellemző energiaállapot és a környező altalaj minőségének függvénye. Nagy esésű szakaszokon jellemzően nagy szemcseátmérőjű hordalék dominál, míg az alsóbb szakaszokon a finom frakció alkotja a görgetett hordalékot. A fentiekből következik, hogy mivel nem fizikai vagy kémiai tulajdonságai, hanem a szemcsék mozgása határozza meg a hordalékmozgás csoportját, így éles határvonal nem húzható a görgetett és a lebegtetett hordalék közé.

A folyami hordalék származhat a mederalkotó alapkőzet, altalaj erodálásából és elhordásából, valamint a környező talaj eróziójából. A mederanyag felső, a víztesttel közvetlen kapcsolatban lévő aktív rétegének mobilizálódása révén indul meg a hordalékmozgás (Southard, 2006), mely függ a kritikus mozgató erőtől, a vízfolyás hordalékszállító kapacitásától, valamint a magának a mederalkotó szemcséknek a tulajdonságaitól (Bogárdi, 1939). Az egyes szemcsék csúszó, gördülő, ugráló mozgást végeznek mederfenéken (Garcia, 2006), mely mozgás iránya megegyezik a környező víztér irányával. A mederfenék környezetében kialakuló összetett áramlási struktúrák és a meder geometriája következtében azonban a pontos irány kiszámíthatatlan. A hordalékmozgás dinamikájával Bogárdi János részletesen foglalkozik, a morfológiai vizsgálatok terén alapműnek számító könyvében (Bogárdi, 1971).

Látható, hogy a hordalékmozgás, ezen belül a görgetett hordalékmozgás rendkívül összetett folyamat. Számszerűsítésére az évek során több eljárás is kidolgozásra került, ezek jórészt a közvetlen fizikai mintavételen alapulnak.

3 Görgetett hordalék mintavevők

A vízfolyásokban megjelenő görgetett hordalék mennyiségi és minőségi vizsgálatára, a XIX. század végétől kezdődően speciális mintavevő eszközöket kezdtek fejleszteni (USGS, 1940). Ezek az eszközök kezdetben viszonylag egyszerű kialakításúak voltak, majd az idők során egyre kifinomultabb, áramlástanilag kedvezőbb eszközök fejlődtek ki. A múlt század elejét jellemző technikai lehetőségek és mérnöki szemléletmód hatására a közvetlen fizikai mintavételre alapuló eljárások hódítottak teret. Ezen módszerek esetén a mintavevő berendezést a mederfenékre kell leengedni, ott megfelelő módon rögzíteni kell, majd a mintavételi időtartam után biztonságosan ki kell emelni.

Az egyes hordalék mintavevőkkel szemben alapvető elvárás, hogy azok a mederfenéken uralkodó görgetett hordalékviszonyokról reprezentatív képet, az ott uralkodó fizikai körülmények miatt kialakuló hordaléktranszport paramétereiről pedig lehetőség szerint megfelelő információt szolgáltatassanak. Ezzel a feltétellel szorosan egybefügg azzal, hogy a mintavevő alkalmazása során a mederanyag és a hordalék szétválasztása egyértelműen megvalósítható legyen.

A hordalékhozam meghatározása minden esetben azon az egyszerű elven alapul, miszerint a mintavevő adott ideig a mederfenéken történő rögzítése során gyűjtött hordalék tömege segítségével, egyértelműen meghatározható az adott pontra jellemző görgetett hordalékhozam.

3.1 Fejlődésük

A mintavevők fejlődése során több egymástól eltérő elven működő eszköz alakult ki. Az első és egyben legegyszerűbb mintavevők az ún. doboz vagy kosár jellegű műszerek voltak. Ezek kialakítása merev falú, felvízi irányba nyitott doboz vagy kosár jellegű, melybe az áramló víz belemossa a hordalékot. Az ilyen jellegű mintavevők fő problémája, hogy az áramlási térbe helyezve komoly ellenállást jelentenek a víz számára, a felvízi nyílásnál ennek hatására lecsökken az áramlási sebesség, mely azt eredményezi, hogy a szállított hordalék egy része nem jut a mintavevőbe (USGS, 1940). Már a századforduló környékéről vannak feljegyzéseink ilyen jellegű mintavevőkkel történt mérésekről (Davis & Wilson, 1919), melyek kezdetben kevés eredményre vezettek, azonban a múlt század 20-as 30-as éveire kifinomultabbá váltak és széles körben elterjedtek, mint például az Ehrenberger-féle mintavevő (Ehrenberger, 1932) (**1. ábra**). Ezen csoportba tartozik a hazai folyammérnökök által széles körben ismert Bogárdi-féle mintavevő is (Bogárdi, 1939).



1. ábra: Ehrenberger-féle mintavevő (forrás: https://www.researchgate.net/profile/John_Laronne/publication/289358058/figure/fig2/AS:411064903716865@1475016918152/Helley-Smith-type-a-and-Ehrenberger-typeb-bedload-samplers.png)

A kevésbé elterjedt típusok közé tartoznak a tálca vagy ék alakú Losievsky-féle és a Polykaov-féle mintavevők. Ezek lényege, hogy lapos ék alakú formájúak, felső síkjukon nyílás található. Felvízi irányba fordítva enyhe szöget zárnak be a mederfelszínnel, melyen a görgetett hordalékot felhordja az áramlás, majd az a felső síkon kialakított nyíláson keresztül a mintavevőbe jut (USGS, 1940).

A harmadik nagy csoportot az úgynevezett nyomáskülönbségen alapuló mintavevők alkotják. Ezek az eszközök a korábban bemutatott kosár jellegű mintavevők továbbfejlesztett változatai, melyek mindkét oldalt nyitottak, és jellemzően kis lyukátmérővel rendelkező hálót rögzítenek rájuk a hordalékszemcsék csapdázása érdekében. Az ebbe a csoportba tartozó mintavevők közös jellemzője, hogy a mintavevő test oly módon lett kiképezve, hogy az alvízi oldal irányába a keresztmetszet bővül. Ennek hatására nyomáskülönbség lép fel az belépő és a kilépő oldal között, mely szívóhatásként jelentkezik a felvízi oldalon, így a korábbi mintavevőknél tapasztalt sebességcsökkenés nem alakul ki, és nem zavarja a mintavételt. A napjainkban használatos mintavevők is ezen csoportba tartoznak. Néhány elterjedt és ismertebb példa a Helley-Smith-féle (Emmett, 1980) (**2. ábra**) görgetett hordalék mintavevő egyes változatai, valamint a Magyarországon használt Károlyi-féle mintavevő is (Károlyi, 1947).



2. ábra: Helley-Smith-féle mintavevő (forrás: <http://www.hoskin.ca/catalog/images/BL-84.jpg>)

Az egyes mintavevők esetén visszatérő problémaként jelenik meg azok hatékonyságának meghatározása. Kontrollált laborkörülmények között több vizsgálatot is hajtottak végre annak meghatározása érdekében, hogy a ténylegesen áramló hordalék mekkora százalékát képesek felfogni az egyes mintavevők (Einstein, 1937; Ehrenberger, 1933). Einstein tanulmányában bemutatta, hogy magas hordalékhozam esetén a hatékonyság csökkent az átlagos szemcseméret növekedése esetén, ezzel szemben alacsony hordalékhozam esetén az átlagos szemcseméret növekedése esetén a mintavevő hatékonysága javult. Összességében a Nesper-féle mintavevő esetén 45%-os hatékonyságot tapasztalt (Einstein, 1937). Fontos hozzátenni, hogy vizsgálatok során rögzített mintavevőket alkalmazott, ellenkező esetben még alacsonyabb értékek adódtak.

A mintavételi hatékonyságban mutatkozó bizonytalanság forrása több különböző körülmény együttes hatása. A mederfelszín közelében az áramlás összetett turbulens jellege miatt a pillanatnyi sebességvektorok irányába mozdul el a hordalékszemcse, mely következtében előfordulhat, hogy elkerüli a mintavevő nyílását, esetleg olyan mértékű impulzus éri, mely hatására a mederfelszínről elemelkedve áthalad a mintavevő felett. Kialakulhatnak olyan kedvezőtlen viszonyok, mely esetén a mintavevő szája nem merőleges az áramlásra. Ebben az esetben a mintavevőbe jutó hordalék mennyisége jelentősen lecsökken, 15 – 20° környéki eltérés a mintavevő tengelye és az áramlás iránya között gyakorlatilag nullára redukálja a hatékonyságot. További problémát okoz a mederfelszín geometriájában mutatkozó egyenetlenségek. Nagy esésű, durva mederanyagból álló szakaszokon a nagyobb hordalékszemcsék, hordalékkúpok, finomabb szemcsékből épült mederszakaszok esetén az áramlás hatására kialakult dűnék megemelik a mintavevők egyes pontjait, az eszköz alsó síkja így nem illeszkedik a mederfelszínre, melynek következtében a mintavétel hatékonysága csökken. Amennyiben a mederfelszíntől való elemelkedés kis mértékű, a mintavétel hosszának növelésével ez a hatás enyhíthető. A mintavevő az áramlási és hordalékviszonyok

függvényében beágyazódhat a mederbe, az apró szemcsék kitöltik a mintavevő és a meder között kialakult réseket, így javul a mintavételi hatékonyság (SFAWU, 1939).

A fentiek alapján belátható, hogy a fizikai alapú mintavétel bizonyos korlátokkal rendelkezik. Az egyes mintavevők ennek megfelelően kalibrációra szorulnak, mely során a mintavevő által gyűjtött hordalékmennyiség és a ténylegesen a mintavételi pont függvényében jelentkező hordalékhozam közötti kapcsolatot kell feltárni. A kalibrációs mérések jelentős mennyiségű szakirodalommal rendelkeznek, mely rávilágít a probléma jelentőségére (Einstein, 1937; Ehrenberger, 1933; Emmet, 1980). Általános esetben a tényleges és a mért görgetett hordalékhozamra az alábbi egyenlet írható fel (Szombati, 2014):

$$q_b = \alpha * c_\zeta \quad (1)$$

ahol, q_b a tényleges fajlagos hordalékhozam, α kalibrációs állandó, c_ζ pedig a mintavevővel mért fajlagos hordalékhozam.

Tovább nehezíti a mérés kivitelezését, hogy a mintavevők jellemzően nagy tömegűek, azok mozgatása és megfelelő használata tapasztalt és nagyszámú kezelőszemélyzetet igényel. A következőkben a hazai fejlesztésű Károlyi-féle mintavevő részletes ismertetése következik.

3.2 Károlyi-féle mintavevő

A hordalékfogót György István gépészmérnök tervei alapján készítették, majd az első laboratóriumi tesztek a kiváló műegyetemi tanár, Németh Endre vezetésével hajtották végre a múlt század '40-es éveinek kezdetén (Károlyi, 1947).

A mintavevő a nyomáskülönbségen alapuló hordalékfogók csoportjába tartozik. Elsődleges különbség azonban az ezen osztályba tartozó és széles körben alkalmazott Helley-Smith-féle eszközzel szemben, hogy a hordalékfogó teljes egészében merev felépítésű, a hordalékszemcsék csapdázása nem finom szövetű hálóban, hanem magában a fogószekrényben történik. Szélessége állandó, azonban a folyamatos függőleges irányú keresztmetszet-bővülés hatására kialakul a szívóhatást generáló nyomáskülönbség. A mintavevő kettős ívet leíró felső lemezével párhuzamosan egy terelőlemez kapott helyet. Ezen terelőelem feladata, hogy a beáramló víztömeg jelentős részét közvetlenül a hátsó nyíláshoz irányítsa, míg a lemez alatti kamrába az áramlás hordalékot szállító kisebb hányadát vezesse. A terelőlemez hátsó oldalán hézagok találhatók, melyeken keresztül a kamrába került víz távozni tud, így nem alakul ki kedvezőtlen áramlási holtter a rekeszben, emellett a bejutó szilárd hordalék is csapdázódik.

A hordalékfogó első változatai tekintélyes méretekkel rendelkeztek. A fogószekrény önmagában 1m hosszú, 0,45m magas és 0,5m széles volt. Ehhez a mérethez még egy ~1,5 méteres, csuklósan csatlakozó stabilizáló timony kapcsolódott. A mintavevő egésze így ~90kg tömegű és ~2,3m hosszú volt. Méreteinek köszönhetően az eszköz pusztá mozgatása is komoly kihívást jelentett folyami környezetben, nem beszélve annak megfelelő használatáról (Károlyi, 1947).

A mintavevő megfelelő mozgatása és víz alatti irányíthatósága érdekében két csuklósan rögzített kiegészítő keret található rajta. A sátoztető szerűen szétnyitható keretek közül a hátsó szerepe a mintavevő csatlakoztatása az emelőszerkezethez. A mérőhajón elhelyezett csőrő acélsodronyát ehhez a kerethez rögzítettük. A csuklós kialakítás szerepe, hogy emelés és leeresztés közben a hordalékfogó az áramló vízben folyamatosan enyhén hátradöntött állapotban maradjon. Kiemeléskor ez rendkívül fontos a hordalék megőrzése miatt. Az elülső keret funkciója az előtartó kötéel rögzítése. Amint az korábban bemutatásra került, a mintavevő áramlási irányba való állása rendkívül fontos a megfelelő mintavétel érdekében, így a hátulsó timony irányító hatásának segítésére előtartó kötelet kell alkalmazni. A kötelet mérőhajó kihorgonyzásakor át kell vetni a horgony acélgyűrűjén, majd a fedélzeten folyamatosan enyhe feszítésben kell tartani. Leeresztéskor ez biztosítja a mintavevő közel függőleges lebocsátását, majd annak mederfenékre való leérkezése után megfelelő irányban tartja a hordalékfogó száját.

A napjainkban a hazai vízügyi hatóságok által használt görgetett hordalék mintavevő, a Károlyi-féle eszköznek az arányosan lekicsinyített mása. A módosított hordalékfogó méretében ~60%-a az eredetinek, súlya mindössze 40-45 kg. Eredetileg a VITUKI szakemberei készítették a Dráva hordalékviszonyainak megismerése érdekében. Az ott uralkodó körülmények lehetővé tették kisebb mérete ellenére a megfelelő alkalmazását. Könnyebb kezelhetősége miatt azonban elterjed a nagyobb folyók vizsgálatára is, mindemellett a Dunán való alkalmazhatósága vitatott. A dolgozatban bemutatásra kerülő terepi mérések során, a fenti kérdés eldöntése érdekében a módosított mintavevőt alkalmaztunk dunai környezetben (**3-4. ábra**).



3. ábra: Károlyi-féle hordalékfogó (oldalnézet)



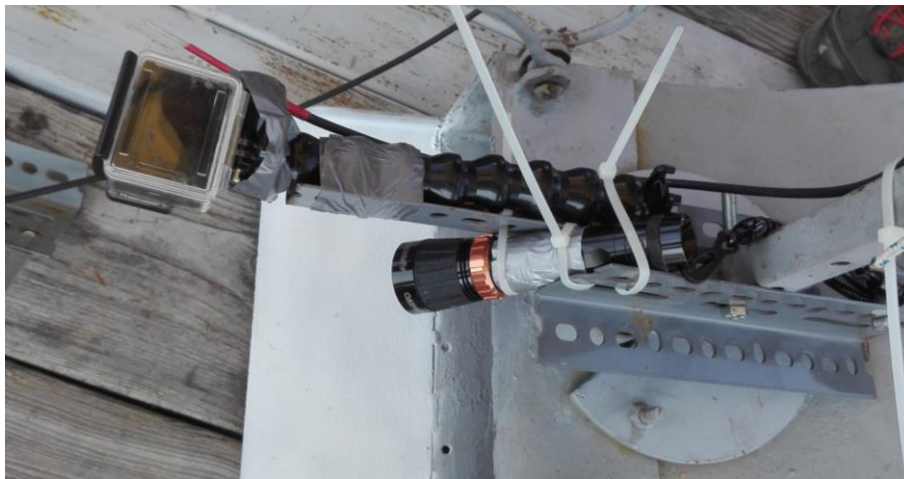
4. ábra: Károlyi-féle hordalékfogó (hátnézet)

3.3 Tapasztalatok a mintavevővel

A vizsgálatokat a Duna felső szakaszán, a Mosoni-Duna torkolata alatt Gönyűnél végeztük. Két mérési kampány során összesen 8 napon keresztül hajtottunk végre görgetett hordalék és mederanyag vizsgálatokat, illetve egyéb kiegészítő méréseket. A mérésekhez használt mintavevő egy az előző fejezetben bemutatott kicsinyített Károlyi-féle hordalékfogó volt, mellyel megegyező eszközzel évtizedek óta hajtanak végre vizsgálatokat a területen illetékes ÉDU-VIZIG szakemberei. Bár évtizedes szakmai tapasztalat áll rendelkezésre a mintavevő

folyószakaszon való alkalmazása terén, elsődleges célunk mégis a hordalékfogó alkalmazhatóságának vizsgálata volt. A lehetőségekhez mérten az eszköz vízalatti viselkedését kívántuk tanulmányozni.

A vizsgálatokat a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéke által a rendelkezésünkre bocsátott úszó mérőtagról hajtottuk végre. A hordalékfogó vízbeeresztése a fedélzeten elhelyezett, elektromos csörlővel rendelkező, nagy teherbírású gém segítségével történt. A mintavevő szája fölé GoPro kamerát és búvárlámpát erősítettünk, így láthatóvá vált a hordalékfogó környezetében található meder (**5. ábra**). A mintavételek alatt folyamatos ADCP sebességméréseket végeztünk.



5. ábra: A mintavevőre erősített GoPro kamera és búvárlámpa

Az első problémát a mintavevő rögzítése jelentette. A különböző mozgó, merevítő elemek egymáshoz való rögzítése azok funkciójának megőrzése mellett még szakértő segítséggel sem volt egyértelmű, így többféle kötéلكiosztást is megvizsgáltunk. A rögzítés során törekedni kell a hátsó stabilizáló timony szabad mozgásának megtartására, emellett a hordalékfogó hátsó nyílásán lévő ajtó zárását is meg kell oldani kiemelés közben. Ennek megoldására kipróbáltunk olyan módszert mely esetén a két rész közös kötélén található, kiemeléskor a timony felhajlik és becsukja az ajtót, illetve külön kötéllal emberi erővel történő zárást is. Az első megoldás megfelelőbbnek bizonyult, azonban rendkívül nehéz beállítani a megfelelő kötéllengést úgy, hogy a szabad mozgás és a megfelelő zárás is teljesüljön (**6. ábra**). A második eljárás nehézsége, hogy az áramló vízben nem érzi a kezelő, hogy mikor húzza meg túlságosan a tartókötelet, így a mintavevő előre bukhat, tartalma elveszik.



6. ábra: A kötéلكiosztás a mintavevőn

A második sarkalatos pont a mintavevő megfelelő irányban tartása a víz alatt. Alacsony tömege és nem kimondottan áramvonalas kialakítása miatt a hordalékfogó rendkívül érzékeny az áramlásra. Egyszerű leengedés esetén a víz elsodorja, lapos szögben süllyed, így a kijelölt mintavételi ponttól relatív távol éri el a mederfeneket. Gyakran előfordult, hogy a mintavevőt oly mértékben elragadta az áramlás, hogy közel lebegő helyzetben maradt. A mederfenék környezetében uralkodó összetett áramlások sokszor akkora erőt fejtenek ki a mintavevő felületére, hogy a testhez képest nagy timony sem képes stabilan tartani a hordalékfogót. A problémára megoldást jelenthet, ha felvízi irányból orrkötelet kötünk a mintavevőre. A megfelelő mederközeli vízszintes húzás kialakításához a kötelet keresztül kell fűzni a mérőtagot rögzítő horgony gyűrűjén, majd a fedélzetről folyamatosan feszesen tartva engedni, húzni. Ezzel megoldható az irányba állítás, és az elsodrás is kordában tartható. Megfelelő kivitelezéséhez több ember összehangolt munkája szükséges, illetve figyelni kell a horgony esetleges felszakadására is (**7. ábra**).



7. ábra: A mintavevő vízbeeresztése

A mintavételek kritikus eleme, hogy a hordalékfogó milyen helyzetben állapodik meg a mederfenéken. Amennyiben az eszköz nem fekszik fel rendesen, a hordalék nem jut be hordalékfogó belsejébe. A kamerafelvételek elemzése során azt tapasztaltuk, hogy ez a jelenség szinte minden alaklommal fennállt. A mintavevő leért a mederfenékre, azonban a nem megfelelő illeszkedés miatt a mozgó hordalék elhaladt a mintavevő alatt. Az áramlás gyakran magával ragadta az eszközt, helyzete instabil volt. Ezek következtében a csapdázott hordalék a mérések túlnyomó többségében rendkívül csekély volt, a felvételeken látható medermozgás ellenére. (A videofelvételekre mutató link a függelékben található, **F.V.I. felvétel**). A probléma meglétét már a mintavevő első alkalmazásakor is felismerték és vizsgálták (Károlyi, 1947). A jóval nagyobb tömegű eredeti hordalékfogó esetén is nyugtalan, nem megfelelő viselkedésről számoltak be. További problémát jelentett a timonynak a fogószekrényhez való rögzítésének módja. Ugyan a kapcsolat csuklósan volt kialakítva, azonban annak teljes hátrabilenését, a mintavevő két oldalára szerelt fül megakadályozta. Ebben a végállapotban a timony enyhe szöget zárt be a vízszintes síkkal, mely hatására az áramlás minduntalan megbillentette az eszközt, így elemelve a fogószekrény nyílását a fenéktől. A második mérési kampányra ezt orvosoltuk, a timony vízszintes helyzetig hátrabilenhetett (**8. ábra**). Ennek hatására némi javulás mutatkozott, azonban javasolt inkább a fülek teljes eltávolítása.



8. ábra: A módosított timony állás

A mintavétel befejezése után ügyelni kell a hordalékfogó megfelelő kiemelésére. A túlságosan elsodródott mintavevő visszahúzásakor előfordulhat, hogy a mederfenéken való végig csúszása mederanyagot juttat a hordalékfogóba, így torzítva a végeredményt. Ennek kiküszöbölésére alkalmazható az előtartó orrkötél, mely nem engedi meg a mintavevő túlzott elsodródását. Kiemeléskor oldva a feszítést, a kiemelés megfelelően elvégezhető.

Terepi tapasztalatink alapján az a konklúzió vonható le, hogy a kis méretű drávai környezetre tervezett mintavevő Dunán való alkalmazása nem szolgáltat megbízható eredményeket. A folyó vizsgált szakaszán jellemző hidraulikai körülmények között rendkívül instabilan viselkedik, hordalékfogó képessége elmarad az elvárható mértéktől. Érdemi mennyiségű mintát a napokon keresztül végzett mintavételek során sem sikerült kiemelnünk annak ellenére, hogy a vízalatti felvételek alapján jól láthatóan mozgásban volt a meder.

Az eredmények alapján megkérdőjelezhetővé válik a folyószakaszra vonatkozó évtizedes adatsorok pontossága. A területen a Károlyi-féle kis mintavevővel gyűjtött, hosszú idejű adatsorok elemzését egy korábbi tanulmányban részletesen elvégezték, és arra következtetésre jutottak, hogy az adatsorok alapján a Felső-magyarországi Duna szakaszon jelentős görgetett hordalékmozgás nem jelentkezik (Török & Baranya, 2017). A teljes görgetett hordalékhozam 1,0-1,5 kg/s alattiak még jelentősebb 2000 – 3000 m³/s -os vízhozam mellett is. Következtetései arra vezetnek, hogy az adott folyószakaszon árvízi állapotot leszámítva nincs jelentős medermozgás. Ezzel szemben az általunk végzett videofelvételek alapján lényegesen kisebb vízhozamok esetén (1000-1200 m³/s) is számottevő hordalékmozgás mutatkozott, azonban ezt a mintavevővel megfelelően mérni nem sikerült. Ezt a feltevést látszik alátámasztani Rákóczi László 1971-es tanulmánya is (Rákóczi, 1971), melyben ezen Duna szakaszra az adatsorokhoz képest legalább egy nagyságrenddel magasabb értékeket tapasztalt. (A Duna felvízi szakaszán épített vízlépcsők, és a Bósnél üzembe helyezett erőmű jelentősen befolyásolta a két vizsgálat között a folyó hordalékviszonyait, azonban azon feltételezés

mentén, hogy a folyó eróziós potenciálja megmaradt, mely hatására a szakaszon jelentős medermélyülés következett be (Rákóczi, 1993), ez a mértékű különbség nem indokolt.)

A fentiek fényében felmerül az adatsorok felülbírálatának igénye, illetve mintavételi módszertan átdolgozásának szükségessége. Dolgozatomban ez utóbbira tesztek kísérletet, mely elkészítését a Seddon II. nevű projekt céljainak megfelelően kívántam végrehajtani. A célkitűzések közt egy az ezen szakaszra felállított hordalékmonitoring pont létesítése is szerepel, aminek megfelelő kivitelezéséhez kívánok munkámmal hozzájárulni. A jelenleg alkalmazott módszertan felülvizsgálatának két eltérő módját vizsgálom meg. Egyrészt numerikus modellezés segítségével részletesen elemzem az alkalmazott hordalékfogó áramlástan tulajdonságait, valamint a mintavevőnek a környezetében kialakuló áramlásra való hatását. Céloom egy olyan eljárás bemutatása és tesztelés mely segítségével numerikus számításokat elvégezve megbízhatóan vizsgálhatók egyes hordalékfogó geometriák, így elősegíthető azok módosítása, esetleges új eszközök tervezése. Ily módon a direkt hordalékmérő eljárások egyszerűbben fejleszthetővé válnak. A másik lehetőség a direkt mintavétel kiegészítése vagy kiváltása indirekt eljárások alkalmazásával. Ezek nagy előnye, hogy egyszerűbben kivitelezhetők, nem igényelnek akkora kezelőszemélyzetet, mint a mintavételek és olyan körülmények közt is végrehajthatók, melyek esetén direkt mintavételre nincs lehetőség. Első lépésben a numerikus fejlesztési módszertant és lehetőségeket mutatom be, majd a dolgozat második felében az indirekt eljárásokkal foglalkozom.

4 Numerikus modellezés

A mintavevők belsejében és az őket közvetlenül körülvevő víztérben kialakuló áramlási struktúrák és az áramlás különböző paramétereinek részletes vizsgálata érdekében, numerikus modell segítségével végeztem elemzéseket. Céлом egy olyan eszköz alkalmazása és igazolása volt mely segítségével nehézkes laboratóriumi vizsgálatok nélkül, nagyszámú és megbízható adat gyűjthető a hordalékfogók környezetében áramló víztér viselkedéséről. Dolgozatomban a REEF3D nyílt forráskódú és szabad felhasználású numerikus megoldót alkalmaztam, mely a Norvég Tudományegyetemen (NTNU) került kidolgozásra, elsősorban szabadfelszínű partközeli hullámzásvizsgálatra (Bihs et al., 2016).

4.1 REEF3D

A folyadékok dinamikáját leíró modellek alapját az impulzus- és tömegmegmaradás jelenti, melyek leírása összenyomhatatlan homogén folyadék esetén a 3D Navier-Stokes egyenletekre vezet. A tömegmegmaradást kielégítő folytonossági egyenlet a következő:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

Az impulzusmegmaradást leíró differenciálegyenletet a számítási igény csökkentése érdekében egyszerűsíteni szükséges. Ez a folyamat a Reynolds átlagolás, mely során a pillanatnyi sebességvektorokat szét kell bontani egy időben átlagolt és fluktuációs tagra (Reynolds, 1985), melyet az egyenletbe vezetett örvényviszkózitás segítségével írhatunk le (Fleit, 2016). A modellben az örvényviszkózitás értékét a $\kappa\text{-}\omega$ turbulenciamodell alapján a Boussinesq-közelítés segítségével kapjuk (Boussinesq, 1877). Ez az egyszerűsítés vezet a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenletre (RANS):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i \quad (3)$$

ahol, U az időben átlagolt sebesség, t az idő, ρ a folyadék sűrűsége, P a nyomás, g a gravitációs gyorsulás, ν a kinematikai viszkózitás, míg ν_t az ún. örvényviszkózitás (Bihs et al., 2016).

A számítást megfelelő felbontású rácshálón elvégezve részletes képet ad az áramlás egyes paramétereiről (pl: *sebesség, nyomás, turbulencia*). A fenti differenciálegyenletek megoldására a REEF3D modell a véges differencia módszert alkalmazza.

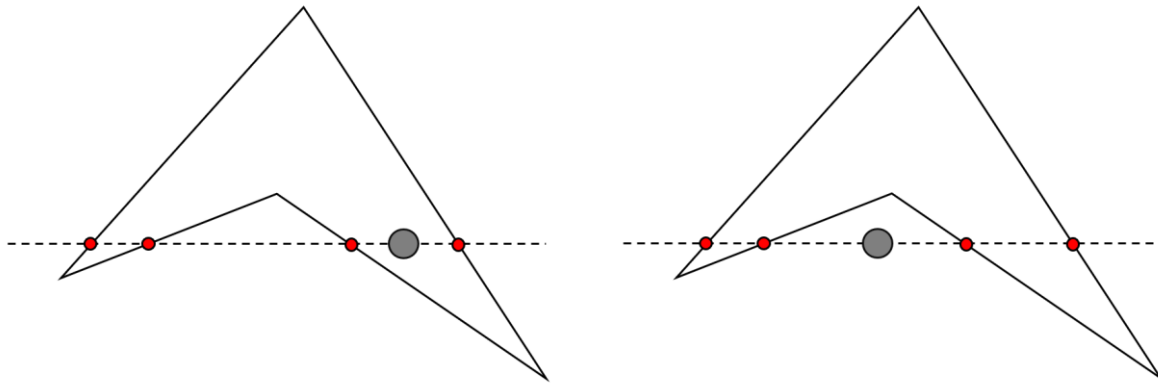
A feladat elvégzéséhez használt számítási rácsháló különlegessége, hogy a gyakorlatban széles körben alkalmazott strukturálatlan hálókkal ellentétben, strukturált ortogonális számítási térben dolgozik (*kartézián rácsháló*). Az ilyen jellegű modellkörnyezetben rendkívül fontos a szabadfelszín kezelése. A program ennek leírására az ún. *level set method* (LSM) módszert alkalmazza. Lényege, hogy az egyes cellákhoz minden időpillanatban egy skalár értéket rendel, mely megmutatja, hogy az adott cella a víztérben avagy a levegőben

található (Osher & Fedkiw, 2001). A strukturált háló előnye, hogy lehetővé teszi magas fokú differenciál sémák egyszerű implementálását, mivel a háló szerkezetéből adódóan nem szükséges bonyolult koordináta transzformációk elvégzése, így a számítási igény csökkenthető. Az ilyen jellegű struktúra hátránya azonban, hogy a modell térbe helyezett objektumok geometriájának kezelése nehezebbé válik. A térbeli testek leírására STL (STereo Litrhrography) formátumban van lehetőség. Az ilyen jellegű fájlokban az objektumok felülete különálló háromszögek segítségével határozható meg, melyek kialakításánál fontos, hogy azok pontosan illeszkedjenek, ne legyen köztük hézag (Bihs et al, 2017). A legtöbb CAD szoftver segítségével előállítható ilyen térbeli leképezés. Vizsgálataim során az Autodesk AutoCAD szoftver diák verzióját használtam az egyes geometriák STL formátumban történő létrehozására.

A fentiekből következik, hogy a számítási rácsháló pontjai nincsenek igazítva a beépítendő objektum felületéhez, így a szilárd és folyadékfázis elkülönítését rácsháló szerkesztéssel nem lehet elvégezni. A modellben a szilárd testek definiálása is az LSM módszer segítségével hajtható végre. Az egyes rácsponthoz az alábbi összefüggés szerint egy skalár értéket rendelünk, mely meghatározza az adott cella fázisát:

$$\phi(\vec{x}, t) = \begin{cases} > 0 & \text{if } \vec{x} \in \text{Szilárd} \\ = 0 & \text{if } \vec{x} \in \Gamma \\ < 0 & \text{if } \vec{x} \in \text{Folyadék} \end{cases} \quad (4)$$

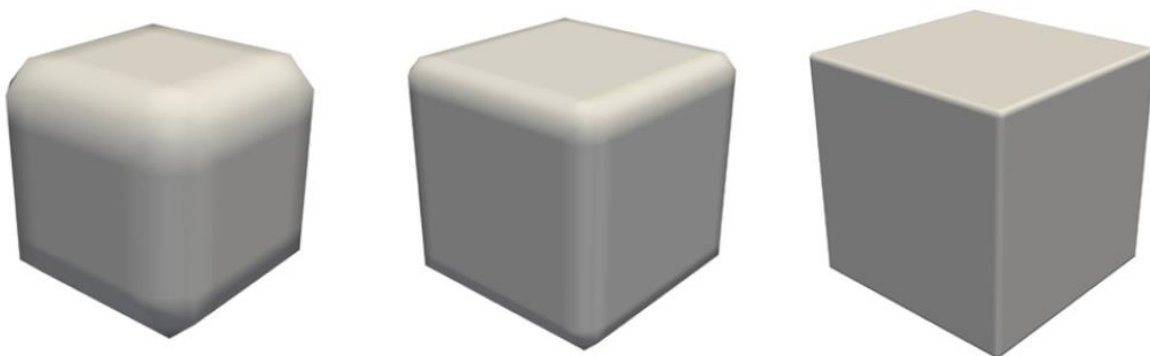
Látható, hogy a paraméter értéke időtől függő változó. Vizsgálataim során azonban az eredmény időinvariáns, ugyanis az egyes mintavevők modellbéli pozíciója rögzített, így a cellák értéke nem változik a futtatás során. Az $\phi=0$ eset jelöli az objektum határfelületét. Annak eldöntése, hogy az adott cella a szilárd testen belül, avagy a folyadéktérben található az ún. *point-in-polygon* teszt segítségével történik. Amennyiben a kiválasztott cella a testen belül található, bármely a cellán keresztül tetszőlegesen húzott egyenes metszeni fogja az objektumot határoló háromszögeket (**9. ábra**). Ha a cella mindkét oldalán páratlan számú metszéspont található a választott egyenesen, akkor a cella a testen belül, ha páros számú, akkor a folyadéktérben található (O'Rourke, 1999).



9. ábra: A point-in-polygon eljárás működési elve

A programon belül a számítás gyorsítása céljából a kiválasztott egyenesek mindig az egyes tengelyekkel párhuzamosak és a másik két tengely által kifeszített síkon jelölik ki a háromszögekkel elfoglalt cellákat. Ezt követően egy algoritmus segítségével kiszámítható a környező folyadékcellák legkisebb távolsága a szilárd felülettől (Bihs et al, 2017). Az egyes határfelületeknél szellemcellák segítségével biztosítható az áramlás megszüntetése, *ghost cell immersed boundary method - GCIBM* (Berthelsen és Faltinsen, 2008).

Amint azt az előzőekben láthattuk a strukturált ortogonális rácshálók esetén az áramlást leíró Navier-Stokes egyenletek megoldása egyszerűsíthető, azonban a szilárd testek modell térbe való beépítése bonyolultabbá válik. További nehézséget okoz, hogy mivel az egyes objektumok közvetlenül nem definiálhatók a rácshálón, ezért olyan finom felbontású számítási hálót kell alkalmazni, mely esetén nem torzul a megengedhetőnél nagyobb mértékben a test körvonala (10. ábra). A határozott peremek és élek leképezése érdekében rendkívül finom felbontásra lehet szükség, mely jelentősen megnöveli a számítási igényt. Az alábbiakban erre látható egy példa.



10. ábra: Objektum leképezés a rácsháló felbontásának függvényében (Bihs et al., 2017)

4.2 Verifikáció

A bemutatott numerikus eljárást, annak a Károlyi-féle mintavevő vizsgálatára való alkalmazása előtt, laboratóriumi mérések eredményei alapján igazolni kell. A rendelkezésre álló mérési infrastruktúra hiányában általam kivitelezett vizsgálatra nem volt mód, azonban egy, a Kolorádói Állami Egyetemen végzett mérőcsatornás kísérlet részletes eredményeit felhasználva (Bunte et al, 2017), az igazoláshoz szükséges elemzéseket végre tudtam hajtani.

A hivatkozott szakmai jelentésben különböző, nyomáskülönbség elvén alapuló hordalékfogók hidraulikai hatékonyságát vizsgálták mérőcsatornában végzett vizsgálatokkal. A méréssorozat során a hordalékfogókat előre meghatározott paraméterekkel rendelkező áramló víztérbe helyezték, majd nagy pontosságú ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter Vectrino*) sebességmérő műszer segítségével méréseket hajtottak végre a mintavevők közvetlen környezetében.

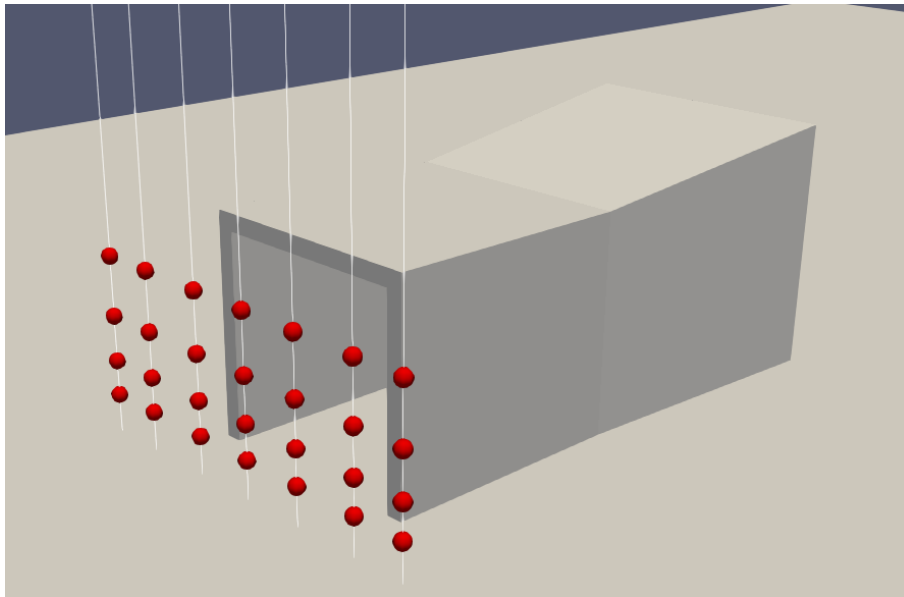
Az igazolás során a laboratóriumi vizsgálatoknak megfelelő áramlási környezetet kellett kialakítani (*vízhozam, vízmélység*), majd ebbe az áramlási térbe került elhelyezésre a vizsgált hordalékfogó 3D-s modellje. A geometria 3D-s leképezése során a műszaki rajzokon található valós méreteket használtam.

A jelentésben három eltérő geometriát vizsgáltak, azonban a nagy számítási időigény miatt az igazolást csak a legkisebb, BL84 jelű hordalékfogóra hajtottam végre. Az eszköz a Helley-Smith-féle mintavevő módosított változata, főbb paraméterei a következők:

- Bemeneti nyílás: 76,2 x 76,2 [mm], (3x3 [in])
- Falvastagsága: 6,35 [mm], (1/4 [in])
- Keresztmetszet bővülés: 1,40 [-]

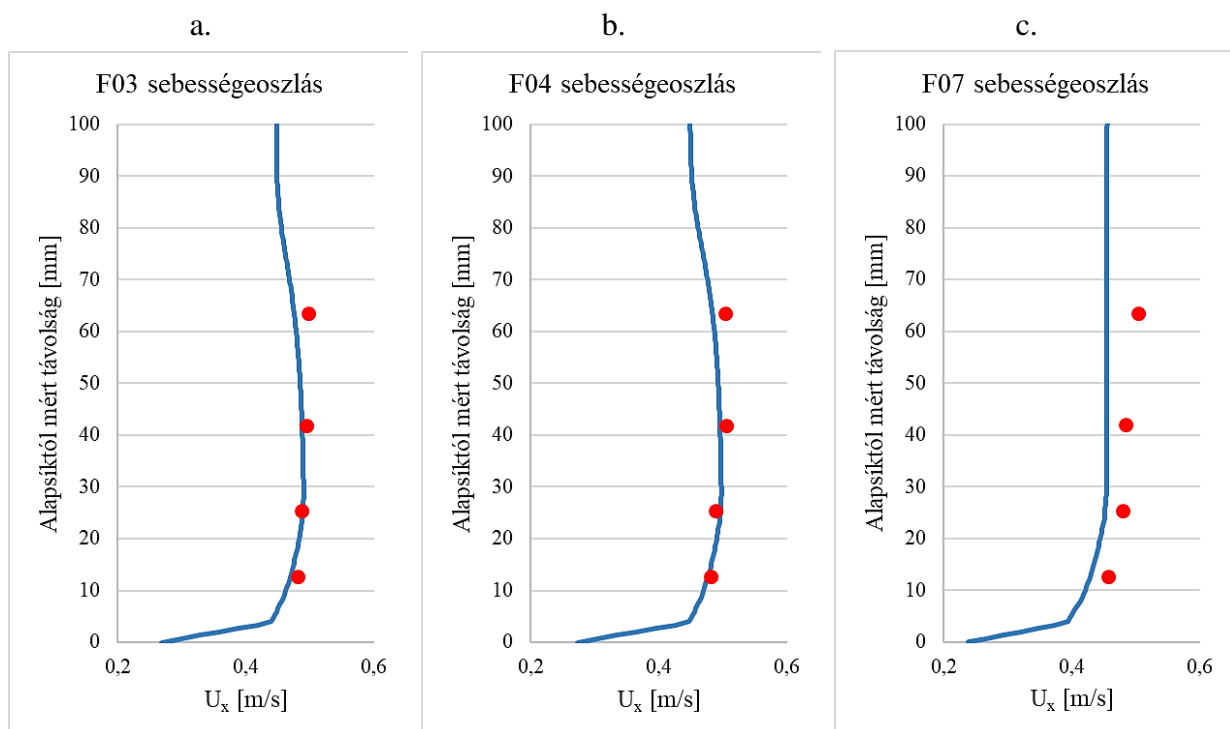
A kísérlet során a mintavevőt besüllyesztették az aljazba, így az áramlás alsó síkja megegyezett a mintavevő alsó lapjának felső síkjával annak érdekében, hogy az alsó lemez vastagsága ne zavarja az áramlást. A hordalékfogó numerikus modellbe történő beépítése is ezen elvek mentén történt. A számítás gyorsítása céljából csak a mintavevő hordalékgyűjtő fejrésze került beépítésre. A laboratóriumi eredmények ilyen elrendezés mellett is rendelkezésre állnak.

A mérések közben a sebességeket előre definiált, összesen 7x4 db pontban vizsgálták. A pontkiosztás az alábbi **11. ábrán** látható, a mérési sík a mintavevő szájától ~25,4 [mm]-re (1 [in]) helyezkedett el. A pontok kijelölésének elve a jelentésben részletesen megtalálható, pontos helyzetük a függelék **F.1. táblázatában** látható. Az alábbi **11. ábrán** a modellbe beépített mintavevő, és a vizsgált pontok kerültek bemutatásra.



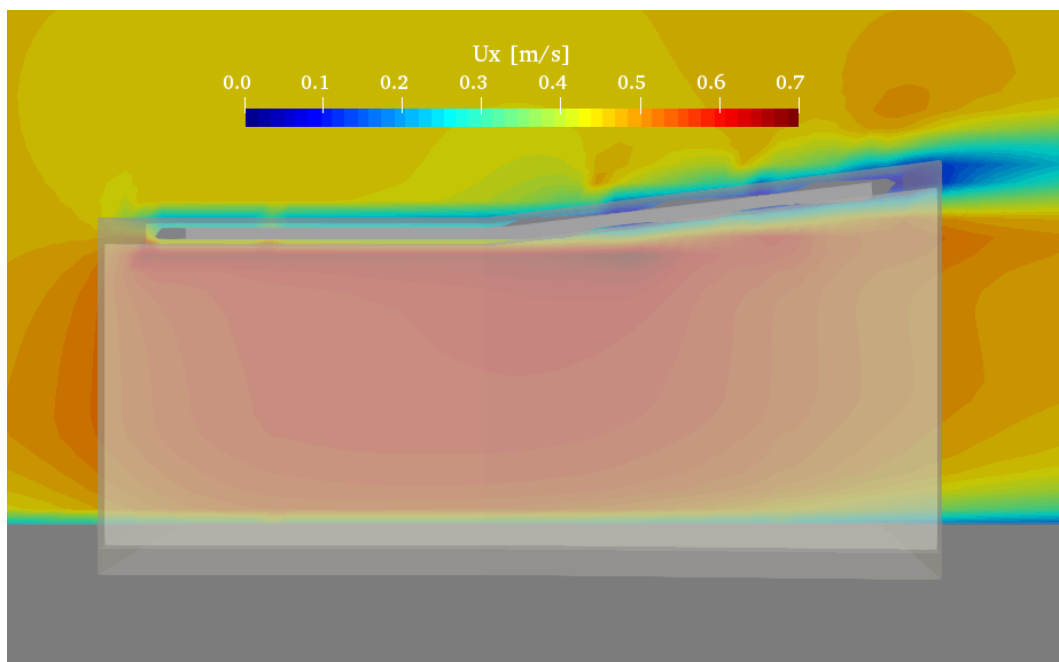
11. ábra: A modellben vizsgált pontok a mérési pontkiosztás szerint

Az eredmények kiértékelése során a jelölt pontokban számszerűen összehasonlítottam a mért és a modellezett sebességeket, valamint kirajoltam a függélymenti sebességprofilt is (12. ábra). Fontos megemlíteni, hogy ezek a sebességek a mintavevő hossztengegyével párhuzamos, fő áramlási irány mentén mért sebességkomponensek (U_x). Az eredményeket a függelékben található **F.2. táblázatban** ismertetem részletesen, továbbá ott kerülnek bemutatásra a további mérési függélyek ábrái is (F.1. ábra).



12. ábra: Mért (piros) és modellezett (kék) sebességek az F03 (a), F04 (b) és F07 (c) jelű függélyekben

Az eredmények alapján látható, hogy a modell jól közelíti a valós esetben kialakuló sebességeket. A modelleredmények tükrözik a mederfenék közelében drasztikusan lecsökkenő sebességeket is, mely alapján kijelenthető, hogy a numerikus modell segítségével valósághűen sikerült reprodukálni a függélymenti sebességeloszlást. Ily módon igazolást nyert a módszer alkalmazhatósága, megfelelő alternatívát nyújt a laboratóriumi kísérletekre. Az eljárás nagy előnye továbbá, hogy a hordalékfogó belsejében, valamint felületéhez rendkívül közel is részletes képet kaphatunk a kialakuló sebességekről. Ez hagyományos ADV műszerrel, laboratóriumban nem kivitelezhető. Az **13. ábrán** a BL84-es mintavevő függőleges középsíkjában kialakuló sebességmező látható.



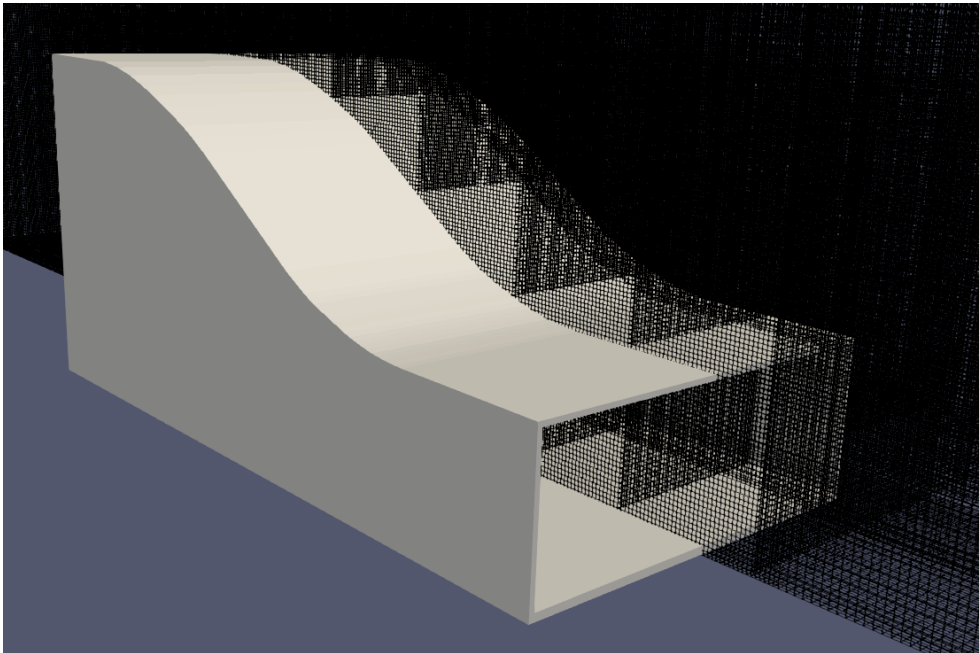
13. ábra: BL84-es mintavevőben kialakuló sebességmező

A **13. ábrán** elhalványítva megjelenik maga geometria is az érthetőség segítésére. Megfigyelhető, hogy az eredmények tükrözik a nyomáskülönbségen alapuló mintavevők alapvető tulajdonságát, mely szerint a hordalékfogó belsejében magasabb sebességek alakulnak ki, mint a környező vízterben, így segítve a hordalék bejutását a mintavevőbe. Látható, hogy az eljárás megbízható, lehetőséget biztosít a lényegesen bonyolultabb geometriájú Károlyi-féle mintavevő belsejében kialakuló áramlási viszonyok részletes elemzésére.

4.3 A Károlyi-féle hordalékfogó numerikus vizsgálata

A Károlyi-féle mintavevő modellkörnyezetbe való implementálása a korábban ismertetett módon történt. A bonyolult geometria miatt azonban egyszerűsítésre volt szükség, így a számítási rácsháló csak a mintavevő egyik oldalán került definiálásra. A hordalékfogó szimmetriáját szem előtt tartva belátható, hogy az áramlás vizsgálatában ez nem okoz jelentős problémát. Annak érdekében, hogy a számítási cellák száma ne legyen túl nagy, az alap

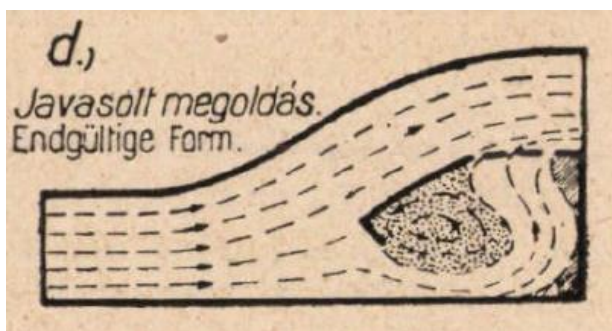
rácsháló felbontása kevésbé finomra lett beállítva, és a mintavevő környezetében került lokális sűrítésre. Az egyszerűsítések után is több mint 8 millió cellával rendelkezett a számítási rácsháló, ennek egy részlete látható a **14. ábrán**.



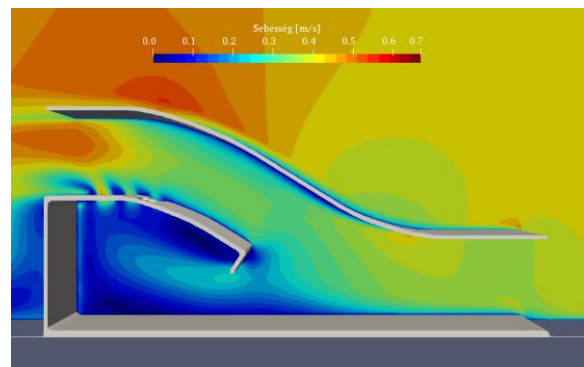
14. ábra: A Károlyi-féle mintavevő számítási rácshálaja

A mintavevő vizsgálatok az előző szimulációnál alkalmazott peremfeltételekkel számolt a modell. Ez a mintavevő méreteihez képest kis vízmélységet jelent, azonban az áramlási struktúrák vizsgálatát lehetővé teszi.

A mintavevőben kialakuló áramlásokról Károlyi Zoltán (1947) cikkében részletesen ír, azonban vizsgálatai során egy félbevágott mintavevő 90°-kal elforgatott darabjában kialakuló áramvonalakat vizsgálta, a víz megfestésével. A módszer nem tette lehetővé, hogy számszerű eredményekre jusson, azonban az áramlás közelítő tulajdonságait meg tudta vizsgálni. A modelleredményektől elvárható, hogy jellegében hasonló áramképet rajzoljanak ki. A két eredmény összehasonlítása az **15 és 16. ábrán** látható.



15. ábra: A Károlyi-féle mintavevőben kialakuló áramkép (Károlyi, 1947)



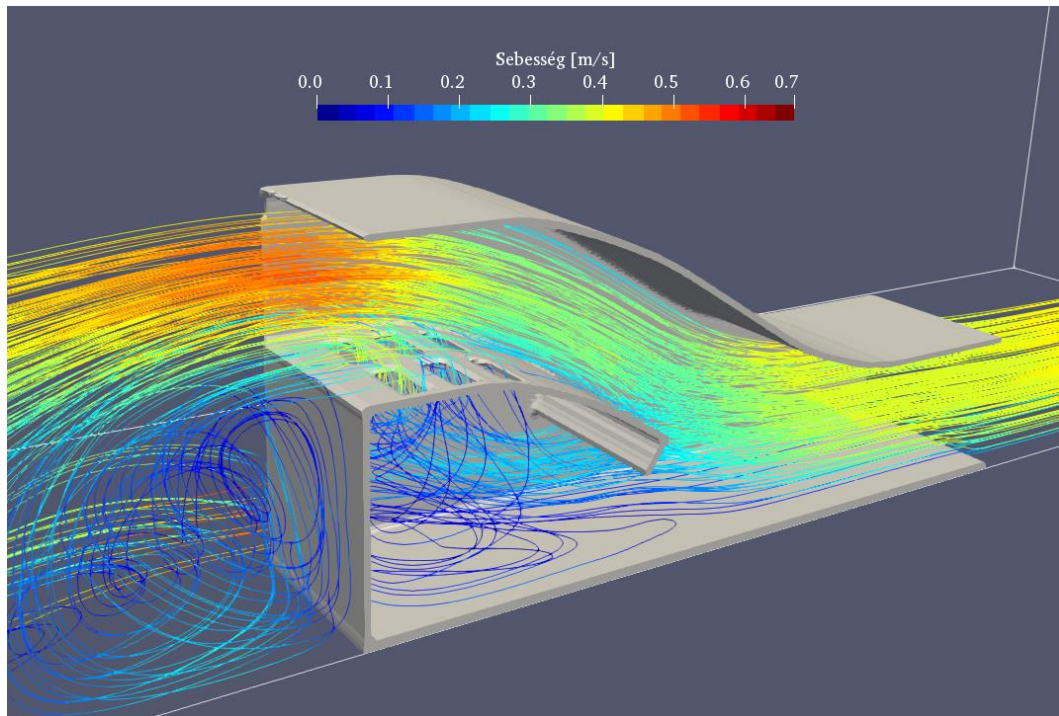
16. ábra: A Károlyi-féle mintavevőben kialakuló modellezett sebességmező

Az ábrák alapján kijelenthető, hogy az áramképek jelentősen nem térnek el egymástól. A hordalékkamra belsejében Károlyi mérése alapján az áramlás jobban a fenékhez szorul, mint a numerikus modell eredményénél, azonban ez a minimális eltérés adódhat abból, hogy az üvegcsatornában a mintavevő elforgatott helyzetben került beépítésre.

A 16. ábrát megvizsgálva szembetűnik, hogy a hordalékfogóban a sebességek kisebbek, mint annak közvetlen környezetében. Ez a jelenség annak ellenére fennáll, hogy az eszköz a nyomáskülönbségen alapuló hordalékfogók csoportjába tartozik. Az ilyen jellegű mintavevőkre jellemző szívóhatás nem jelentkezik, így nem segíti elő a hordalék bejutását. A dolgozat elsődleges célja a vizsgálati módszertan bemutatása, de a fenti eredmények alapján javasolt a geometria olyan jellegű változtatása, mely esetén ez a kedvező hatás érvényesül. A mintavevő terelőlemeze fölötti áramlási tér folyamatos szelvénybővítésének hatása megfelelő lehet.

A numerikus modell segítségével rendkívül finom felbontásban vizsgálhatjuk meg a műszeren belül és annak környezetében kialakuló áramlási teret. Meglévő vagy új mintavevő geometria vizsgálata, illetve kialakítása esetén nagy pontossággal számíthatók a méretezéshez és ellenőrzéshez szükséges paraméterek eloszlása, úgy mint nyomás, sebesség, turbulencia, stb. Ezek ismerete rendkívül fontos, ha megbízható hordalékfogót kívánunk tervezni, mindamelllett szeretnénk az áramló vízteret a lehető legkisebb mértékben befolyásolni.

Nagy előnye az eljárásnak, hogy nem pusztán paramétermezőket tudunk generálni, hanem az eszköz belsejében kialakuló áramlási irányokat is meg tudjuk határozni. A kiértékelés során lehetőség van véletlenszerűen eleresztett jelölők alkalmazására, melyek kirajzolják a mintavevőben megjelenő áramvonalakat amellet, hogy az adott pontban felvett sebességükről is információt szolgáltatnak. Erre mutat példát a **17. ábra**.



17. ábra: A Károlyi-féle mintavevőben kirajzoltatott áramvonalak és sebességnagyságok

Az áramvonalakat megfigyelve jól láthatóan elkülönül a mintavevőben kialakított áramló tér és a hordalékkamra. Míg előbbi esetén az áramvonalak rendezettek, jó közelítéssel párhuzamosak, addig a kamrában láthatók örvénylő kaotikus jellegű mutatók. Emellett megfigyelhető a mintavevő mögött kialakuló szintén örvénylő holtter is.

A fentiek ismeretében kijelenthető, hogy a REEF3D modellkörnyezet megfelelő lehetőséget nyújt a víztérbe helyezett bonyolult geometriájú hordalékkfogók környezetében kialakuló áramlások részletes vizsgálatára. Rámutatott a Károlyi-féle eszköz hibájára, miszerint a belépő áramlás sebessége lecsökken, mely kedvezőtlen hatással lehet a hordalékkfogó hatékonyságára. Segítségével új, áramlástani szempontból megfelelőbb műszer készíthető, azonban ennek vizsgálata túlmutat jelen dolgozat keretein. Összességében a modell rendkívül robusztus, megbízható alternatíváját jelenti a hordalékkfogók nehézkes és költséges laboratóriumi vizsgálatainak. A következőkben az indirekt hordalékkhozam becslő eljárások részletes ismertetése következik, melyek kiegészíthetők, avagy felválthatják az élőerő igényes, nehezen kivitelezhető fizikai mintavételeket.

5 Indirekt hordalékhozam mérési módszerek

Mint az látható, a direkt mintavétellel való hordalékhozam becslés jelentős bizonytalanságokat rejt magában. Komoly hátránya, hogy a vizsgálat során a mederfenék környezetében az áramlást jelentősen meg kell zavarni, így a zavartalan viszonyok elemzése nem megoldható. Emellett a mintavétel nehézkes, munkaerő igényes és bizonyos kritikus körülmények között kivitelezhetetlen (pl. jelentős mederátrendeződést kiváltó árhullámok levonulásakor). Ezen hátrányok kiküszöbölése érdekében kialakultak ún. indirekt eljárások is. Közös jellemzőjük, hogy segítségükkel oly módon szerezhetünk információt a hordalék viselkedéséről, hogy közben nem befolyásoljuk annak viselkedését. Alapvetően két eltérő alapelven nyugvó eljárás használható ilyen vizsgálatokra. Az egyes mederformák időbeli változásának vizsgálata (Simons et al, 1965; Willis és Kennedy, 1975) és a virtuális sebesség módszere (Haschenburger & Church, 1998). Az előbbivel jelen dolgozatban nem foglalkozom részletesen, minthogy annak alkalmazása nagy hozamú, finom szemösszetételű mederrel rendelkező folyószakaszok esetén lehetséges, ebből következően a vizsgált Duna-szakasz hordalékviszonyainak leírására alkalmatlan. A virtuális sebesség módszere segítségével azonban durva szemösszetételű görgetett hordalékkal rendelkező vízfolyások is vizsgálhatók. Az eljárás lényege, hogy az egyes hordalékszemcsék átlagos sebességét megbecsülve, egyszerűen felírható összefüggésre vezethető vissza hordalékhozam becslés,

$$q_b = (1 - \lambda_p)V_b d_s \rho_s. \quad (5)$$

Az egyenletben q_b a fajlagos görgetett hordalékhozam, V_b a hordalékszemcsék virtuális sebessége, d_s az aktív réteg vastagsága, ρ_s a hordalékszemcsék sűrűsége, λ_p pedig az aktív rétegben jelentkező porozitás (Holmes, 2010).

Komoly kihívást jelent azonban az összefüggésben megjelenő paraméterek megfelelő becslése. A mozgó hordalékréteg d_s vastagsága jelentősen befolyásolja a hordalékhozam nagyságát, azonban szelvény mentén pontról pontra változik, függ az adott függvényben jelentkező fajlagos vízhozam nagyságától (Hollingshead, 1971; Slaymaker, 1972). Meghatározására több elméleti módszer létezik, ezek közül az ismertebbek a van Rijn-féle eljárás (van Rijn, 1984), illetve az Einstein-féle megközelítés (Einstein, 1950). Az eltérő eljárások összehasonlítására több tanulmány is készült, mind külföldi (Holmes, 2010), mind hazai környezetben (Szombati, 2014). Szombati a Dráván végzett mérések feldolgozása alapján arra a következtetésre jutott, hogy a van Rijn-féle megközelítést alkalmazva jelentősen túlbecsüli a mozgóréteg vastagságát, így a hordalékhozamot is. Ezen megállapítás nyomán dolgozatomban az Einstein által javasolt eljárást alkalmaztam. Eszerint az aktív réteg vastagsága konstans, a görgetett hordalék szemmagyságától függő paraméter,

$$d_s = 2D_{50}. \quad (6)$$

ahol D_{50} a görgetett hordalék átlagos szemcse átmérője.

A mozgó rétegben kialakuló porozitás λ_p mérésére megfelelő helyszíni eljárás nem terjedt el. Ennek becslésére szakirodalmi adatok alapján van lehetőség (pl.: Swiss standard, 1999). Fontos megjegyezni, hogy a mozgó réteg porozitásának meghatározása nem egyértelmű. A szakirodalmi adatok laboratóriumi körülmények között vizsgált, nyugalomban lévő szemcserétegre vonatkoznak. A mederfenéken gördülő, csúszó ugráló dinamikus mozgást végző szemcsék hézagterfoga ennél jelentősen nagyobb lehet.

A módszer alapját adó V_b virtuális sebesség meghatározására két eltérő szemléletű eljárás terjedt el. Egyrészt a Lagrange-i megközelítés, mely során megjelölt részecskék térbeli követésével számíthatunk ki átlagos sebességet, illetve az Euler-i szemlélet mely alkalmazásakor egy kijelölt keresztzelvényben vizsgáljuk az áthaladó szemcsék sebességét. A múlt század közepétől kezdődően a Lagrange-i módszer alkalmazására történtek jelentős kísérletek (Hubbel és Sayre, 1964). Fontos kiemelni, hogy ezen a területen hazánkban is élenjáró kutatások zajlottak a múlt század során. Az eljárás meghonosítója Dr. Rákóczi László a VITUKI keretei között számos vizsgálatot végzett mind radioaktív nyomkövetést alkalmazva, mind fluoreszcens megjelölést használva (Rákóczi, 1965; Rákóczi, 1974). Kísérletei során előre megjelölt hordalékszemcséket juttatott a vízfolyásba, majd bizonyos idő elteltével az alvízi szakaszon begyűjtötte őket. Ily módon kiszámíthatóvá vált az egyes szemcsék átlagos mozgási sebessége.

Dolgozatomban ezzel szemben az Euler-i megközelítést vizsgáltam részletesen. Napjainkra a technikai fejlődés révén lehetővé vált ennek a szemléletnek a közvetlen terepi mérések során történő alkalmazása. Az itt bemutatásra kerülő módszer során ultrahangos ADCP műszer használatával becsültem meg a mozgó hordalékréteg sebességét.

5.1 ADCP alapú, Euler-féle hordalékhozam becslés

Az ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) egy széleskörben elterjedt hidroakusztikus vízsebességmérő műszer, működése a Doppler eltolódáson alapul. Az eszköz nagy frekvenciájú, ismert hullámhosszú ultrahang impulzusokat bocsát a víztérbe mely a vízben lévő különböző szilárd szemcsékről visszaverődik. A visszaverődés során, a mozgó szemcsék mérőfejhez viszonyított relatív sebességétől függően, a hang hullámhossza torzul. Ezt az eltolódást méri az ADCP, melynek mértékéből visszaszámolható a mozgó szemcse sebessége (Csiti, 2016). A kibocsátott impulzusok gyakorisága jellemzően 2 – 3 Hz, aminek hatására rendkívül nagy felbontású térbeli és időbeli sebességeloszlás nyerhető a víztérről.

Mérés közben a műszer folyamatosan letapogatja a meder felszínét, illetve az onnan visszaérkező jelben mérhető torzulás alapján a hajó relatív, mederfenékhez képest történő elmozdulását is rögzíti (*Bottom Tracking - BT*). Minthogy a jelben mérhető torzulás a mederfenék és a hajó egymáshoz viszonyított relatív sebességének függvénye, így ennek mértéke információt tartalmaz az esetlegesen mozgó meder sebességéről is. Annak érdekében, hogy ez az információ különállóan is értelmezhető legyen, a hajó mozgását egy független koordinátarendszerben is rögzíteni kell, erre a célra nagy pontosságú RTK-GPS megfelelő

lehetőséget nyújt. Mindkét esetben az elmozdulás két komponensként kerül rögzítésre, melyek ismeretében az adott mérési ponthoz tartozó relatív hajó-meder sebesség számítható. A két sebesség segítségével az alábbi összefüggést felhasználva számítható az adott pontban jellemző medermozgás sebessége (Rennie et al., 2007):

$$v = v_{ref} - v_{BT} \quad (7)$$

ahol v a mozgóréteg sebessége, v_{ref} a referencia sebesség (a továbbiakban v_{GPS}), v_{BT} pedig az ADCP műszer által rögzített elmozdulásból származó sebesség. Az elmozdulás minden esetben összegezve kerül tárolásra, így az egyes időlépésekben megjelenő sebességek számítására az alábbi egyenletet állítottam fel:

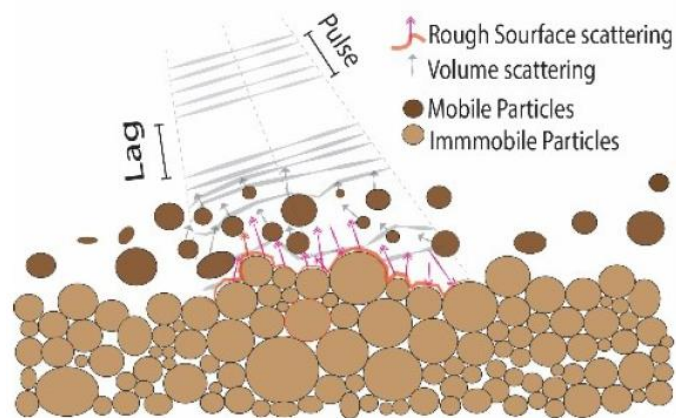
$$v_{BT}(i) = \frac{\sqrt{(\Delta r_{BT_E}(i+1) - \Delta r_{BT_E}(i))^2 + (\Delta r_{BT_N}(i+1) - \Delta r_{BT_N}(i))^2}}{\Delta t} \quad (8)$$

$$v_{GPS}(i) = \frac{\sqrt{(\Delta r_{GPS_E}(i+1) - \Delta r_{GPS_E}(i))^2 + (\Delta r_{GPS_N}(i+1) - \Delta r_{GPS_N}(i))^2}}{\Delta t} \quad (9)$$

$$v_s(i) = v_{GPS}(i) - v_{BT}(i) \quad (10)$$

ahol, $v_s(i)$ az adott ponthoz tartozó számított mozgóréteg sebesség, $\Delta r_j(i)$ az adott (i) . ponthoz tartozó elmozdulás nagysága az egyes komponensek esetén, Δt pedig az ADCP mérési gyakorisága. Akkurátusan akkor járnánk el, ha az így kapott sebességeket az (i) . és $(i+1)$. pont felezőpontjára értelmeznénk, azonban az elmozdulások olyan kicsik ($< 5 - 10$ cm), hogy ez jelentősen nem befolyásolja az eredményt, azonban a feldolgozást aránytalanul megnehezíti.

Az ily módon meghatározott v_s sebességnek, a mozgó görgetett hordalék sebességével való közvetlen megfeleltetését azonban fenntartásokkal kell kezelni. A hanghullámok egy része nem a mozgó görgetett hordalékról, hanem a mozdulatlan alsóbb mederrétegekről verődik vissza, mely a hang hullámhosszától és a mederfelszín porozitásától függően okoz eltérést az eredményben (Conevski et al, 2018) (**18. ábra**). A mederfenék közelében a rendkívül összetett áramlási viszonyok, illetve a meder és a víztér határán jellemzően megnövekedett koncentrációban jelenlévő lebegtetett hordalék mozgása is jelentősen befolyásolhatja az eredményeket (Rennie et al, 2002). Ezek ismeretében belátható, hogy a kapott sebességértékek jelentős bizonytalanságot hordoznak magukban, így azok szűrése mindenképpen szükséges. Mindazonáltal ezen sebességek ismeretében a virtuális sebesség módszere segítségével becsülhetővé válik a mederfenék és annak közvetlen környezetében mozgó hordalék mennyisége.



18. ábra: A visszavert ADCP jeleket befolyásoló mederfenék közeli hibrid réteg (Conevski et al., 2018)

A következő alfejezetben egy már feldolgozott ADCP adatsor (Szombati, 2014) újbóli vizsgálatát végzem el, a számításba beépítve az adatok szűrését végző összefüggéseket, majd pedig a tapasztalataimat átültetem a Duna felső szakaszán végzett terepi méréseink eredményeire.

5.2 Az ADCP alapú módszer tesztelése

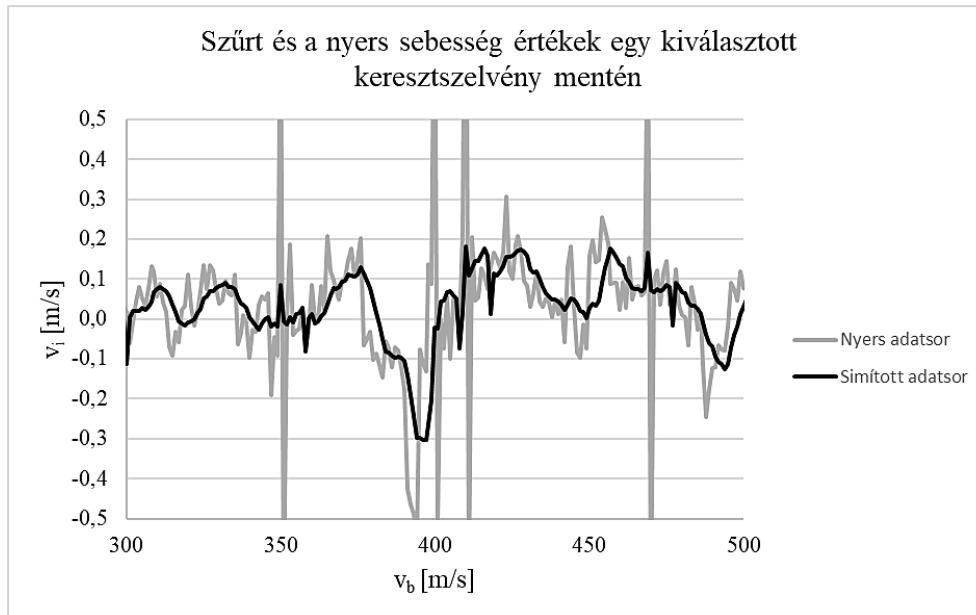
A fent bemutatott eljárás alkalmazhatóságát egy 2012-ben végzett mérési kampánysorozat eredményeinek feldolgozása segítségével vizsgálom. A Dráván öt helyszínen végzett vizsgálatokról keresztmetszvénymenti ADCP adatok álltak rendelkezésemre, ezenkívül a szelvényekben egyenként 5 db függélyben direkt hordalékmérés is történt a Károlyi-féle kis mintavevővel.

Első lépésben a meglévő ADCP fájlokból gyűjtöttem ki a számomra releváns adatokat. Ehhez a WinRiver 2.0 célszoftvert alkalmaztam, melyben egyénileg létrehozott ún. template fájl segítségével az egyes mérések eredményeit szöveges állományként tudtam elmenteni. A kiválasztott paraméterek rendre a következők voltak:

- Elmozdulás kelet-nyugati komponense BT esetén (*East displacement BT*)
- Elmozdulás észak-déli komponense BT esetén (*North displacement BT*)
- Elmozdulás kelet-nyugati komponense GPS esetén (*East displacement GGA*)
- Elmozdulás észak-déli komponense GPS esetén (*East displacement GGA*)
- WGS szélességi koordináta (*Latitude GGA*)
- WGS hosszúsági koordináta (*Longitude GGA*)

Az ily módon elkészített .txt fájlok feldolgozására a MatLAB programban készítettem rövid algoritmusokat (a függelékben szabadon elérhetőek). A program beolvassa a vizsgált ADCP méréshez tartozó állományt, majd az egyes paraméterekből változókat képez, melyhez mindössze a beolvasni kívánt állomány nevét, és az ADCP mérés során alkalmazott időlépés nagyságát kell megadni. Az így képzett paramétervektorok segítségével a **8-10. egyenletekben** látható műveletek elvégzése után minden egyes mérési ponthoz előállítja a

mozgóréteg sebességét tartalmazó v_s értékeket. Ezek a nyers sebességértékek jellemzően rendkívül zajosak, nagy szórást mutatnak, így az algoritmusba beépítettem a mozgóátlagos simítás lehetőségét. A **19. ábrán** egy kiválasztott keresztaszvénben mért v_s sebességeloszlás látható nyers, illetve 8 ablakos simított esetben.



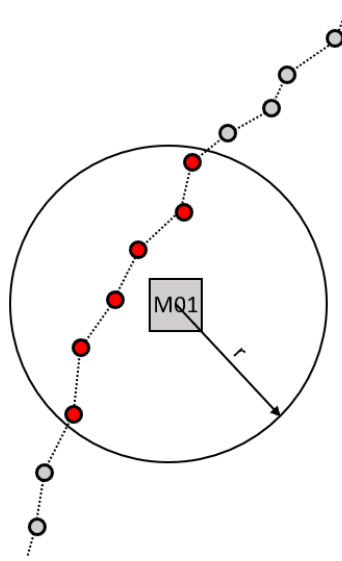
19. ábra: Szűrt és mozgóátlaggal simított sebesség eloszlás egy kiválasztott keresztaszvén mentén

A művelet sor elvégzése után a számított eredményeket a korábban kigyűjtött paraméterekkel együtt új szöveges állományban tárolja el.

A számított sebességértékek feldolgozására egy másik rövid programot írtam, melyet kétféle változatban készítettem el. A számítás mindegyik esetén hasonló elven működik, különbség a bemenő paraméterekben van. Az algoritmus alapvető lényege, hogy az adatahalmazból leválogassa a fizikai mintavétel (vagy a vizsgálni kívánt mérési pont) szűk környezetében jelentkező mozgóréteg sebességeket, azonban a vizsgált függély kijelölése történhet GPS koordináták, illetve relatív parttól mért távolság ismeretében is. Az ebben az alfejezetben feldolgozott mérési eredmények esetén az utóbbi eset áll fenn.

A feldolgozás az előző programmal legyártott szöveges állományok beolvasásával kezdődik, azonban különbség, hogy ebben az esetben az összes, a keresztaszvénre vonatkozó mérés importálásra kerül, és egy közös skatulyákra osztott mátrix-szerkezetben kerül eltárolásra. Bemenő paraméterként meg kell adni a vizsgálni kívánt függély azonosítását lehetővé tevő parttól mért relatív távolság vagy koordináta értékeket, továbbá annak az intervallumnak a sugarát, amekkora vízszintes távolságon belül kívánjuk leválogatni a ponthoz tartozó sebességértékeket (**20. ábra**). Az ezen körön belül mért értékeket a vizsgált függélyre jellemző értéknek tekinthetjük. Ennek jelentősége a mozgóhajós esetben egyértelmű, kellő számú adatot válogathatunk ki a szelvénymenti adatsorból, állóhajós mérés esetén pedig kiszűrhetjük azokat az értékeket melyek akkor kerültek rögzítésre amikor a mérőhajó

túlságosan eltávolodott a vizsgált ponttól. Ennek a távolságnak a megválasztása tetszőleges, vizsgálataim során 5m-re állítottam be.



20. ábra: Az adott mérési ponthoz tartozó ADCP sebességek leválogatása (sémaraajz)

A számítás során problémát jelenthet, hogy az ADCP-s szelvényvizsgálatok esetén a teljes keresztmetszvény mentén jellemzően nincs lehetőség a mérés elvégzésére. A sekély part menti szakaszok megközelítése nem lehetséges a mérőhajóval. Azonban minthogy a jegyzőkönyvben gyakran csak a parttól mért távolsága került rögzítésre a mintavételnek, annak valós távolságát az ADCP-s mérés kezdőpontjától meg kell határozni. Ez egy elég jelentős hibaforrás, így minden esetben javasolt a mintavételi pont GPS koordinátáinak rögzítése. A hiba kezelése érdekében lehetőség van beállítani egy korrekciós tényezőt, mely segítségével ez az eltolódás kezelhető.

Az algoritmus ezt követően egyenként megvizsgálja a beolvasott adatsorokat, és azokat az értékeket, melyek nem tartoznak az adott függvényhez tartozó vizsgálati tartományba, zérus értékre állítja. Ezután kigyűjti a nem nulla elemek indexeit, így az eredeti mátrixokban egyértelműen azonosíthatók a vizsgált ponthoz tartozó értékek. Az így leválogatott sebességekre egy előre beállított szűrőt alkalmaztam (Conevski et al, 2018) nyomán, mely az alábbi feltétel szerint szűri az adatokat:

$$\begin{cases} v_{fs}(i) = NaN, \text{ ha } v_s(i) < 0 \\ v_{fs}(i) = NaN, \text{ ha } v_s(i) > \bar{v}_s + 3 \frac{1}{N_{nyers}-1} \sum_i (v_s(i) - \bar{v}_s)^2 \end{cases} \quad (11)$$

Látható, hogy a szűrő leválasztja a negatív sebességeket, valamint az aránytalanul magas értékeket. A pozitív számként megmaradt sebességeket külön vektorba gyűjtöttem, majd ezek átlagértékét használtam a számolás során.

A hordalékhozam becsléséhez amint az a **11. egyenletben** látható, további bemenő paramétereket kellett meghatároznom. A mozgórétteg vastagságát az Einstein-féle összefüggés $d_s = 2D_{50}$ alapján, az átlagos szemcseméretet a jegyzőkönyvekben leírtaknak megfelelően

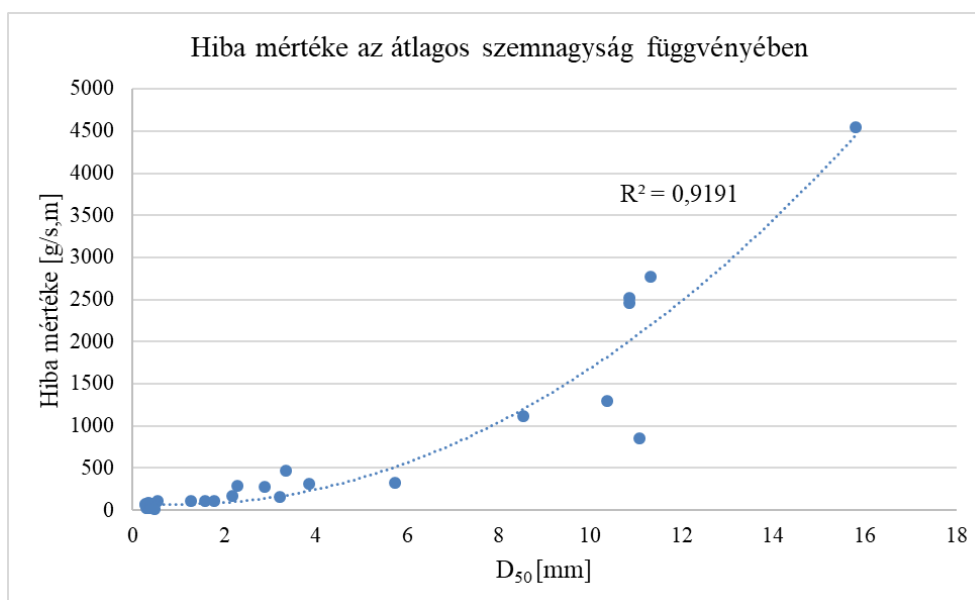
vettem fel. A porozitás (λ_p) értékét szakirodalmi adatok alapján 0,36 [-] (Holmes, 2010), a szemcsék sűrűségét (ρ_s) pedig 2,65 [g/cm³] értékre állítottam be. Az összefüggés segítségével kiszámoltam a mintavételi pontokban a fajlagos hordalékhozam nagyságát (q_{i_ADCP}), majd összevettem a hordalékfogóval szerzett eredményekkel ($q_{i_mintavevő}$). Az eredményeket az alábbi táblázatban foglalatom össze (**1. táblázat**).

1. táblázat: A hordalékfogóval mért és az ADCP adatok alapján számolt fajlagos hordalékhozamok értékei

| Helyszín | Függély | 2012.06.14 | | | 2012.08.26 | | |
|---------------|---------|--------------------|---------------|-----------------|--------------------|---------------|-----------------|
| | | $q_{i_mintavevő}$ | q_{i_ADCP} | D ₅₀ | $q_{i_mintavevő}$ | q_{i_ADCP} | D ₅₀ |
| | | [g/s,m] | [g/s,m] | [mm] | [g/s,m] | [g/s,m] | [mm] |
| Drávaszabolcs | 1. | 40,6 | 60,2 | 0,47 | 51,4 | 165,0 | 0,55 |
| | 2. | 18,5 | 46,4 | 0,38 | 8,3 | 77,9 | 0,48 |
| | 3. | 11,6 | 35,6 | 0,35 | 7,0 | 47,3 | 0,33 |
| | 4. | 6,0 | 44,2 | 0,32 | 3,2 | 91,8 | 0,34 |
| | 5. | 1,3 | 64,2 | 0,29 | 2,4 | 90,0 | 0,35 |
| Barcs | 1. | 11,1 | 291,4 | 2,89 | 124,2 | 285,4 | 3,23 |
| | 2. | 61,1 | 377,0 | 3,86 | 11,7 | 120,8 | 1,58 |
| | 3. | 21,3 | 348,1 | 5,74 | 19,4 | 133,5 | 1,27 |
| | 4. | 14,7 | 189,6 | 2,18 | 6,5 | 291,5 | 2,28 |
| | 5. | 155,0 | 264,5 | 1,77 | 9,3 | 484,1 | 3,35 |
| Belsice | 1. | 2,9 | 51,3 | 0,35 | 6,5 | 76,5 | 0,28 |
| | 2. | 5,6 | 57,7 | 0,34 | 4,2 | 34,8 | 0,30 |
| | 3. | 11,4 | 59,9 | 0,33 | - | - | - |
| | 4. | 16,5 | 39,9 | 0,32 | 4,2 | 42,7 | 0,34 |
| | 5. | 15,2 | 89,0 | 0,29 | 5,6 | 77,2 | 0,38 |
| Botovo | 1. | - | - | - | - | - | - |
| | 2. | 0,7 | 4548,6 | 15,79 | - | - | - |
| | 3. | 9,1 | 2527,1 | 10,86 | - | - | - |
| | 4. | 60,2 | 2523,8 | 10,85 | - | - | - |
| | 5. | 14,8 | 2786,2 | 11,32 | 142,0 | 1441,9 | 10,4 |
| Bélavár | 1. | 1,2 | 6389,3 | 8,08 | - | - | - |
| | 2. | 43,4 | 1166,1 | 8,53 | - | - | - |
| | 3. | 163,9 | 1020,4 | 11,08 | - | - | - |

| Helyszín | Függély | 2012.06.14 | | | 2012.08.26 | | |
|----------|---------|--------------------------|---------------------|-----------------|--------------------------|---------------------|-----------------|
| | | q _{i_mintavevő} | q _{i_ADCP} | D ₅₀ | q _{i_mintavevő} | q _{i_ADCP} | D ₅₀ |
| | | [g/s,m] | [g/s,m] | [mm] | [g/s,m] | [g/s,m] | [mm] |
| | 4. | - | - | - | - | - | - |
| | 5. | - | - | - | - | - | - |

Látható, hogy a fajlagos hordalékhozam értékekben helyenként nagyságrendi eltérés mutatkozik. Az átlagos szemcseátmérő növekedésével az eltérés nagysága is nő (**21. ábra**), mely arra enged következtetni, hogy az alapvető összefüggés nem megbízható ilyen jellegű és ennyire változatos hordalékviszonyok között. A mozgóréteg vastagságát megadó Einstein-féle összefüggés alkalmazása, és a konstans porozitásérték bevezetése nem tűnik megfelelőnek amint nagyobb szemcseátmérőjű hordalékot vizsgálunk. Az összefüggés felülvizsgálatát a következő alfejezetben hajtom végre.



21. ábra: A fajlagos hordalékhozam értékekben mutatkozó hiba mértéke D_{50} függvényében

Bár jelentős hibával terheltek a nagy szemcseátmérőjű hordalékkal rendelkező szelvényekben a fajlagos becsléseim, kiszámítottam a szelvénymenti hordalékhozamot ezen eredmények alapján. A számításhoz egyszerű trapékszabályt alkalmaztam. A következő táblázatban összevetettem a számított eredményeket, a mért értékeket, valamint (Szombati, 2014) ezen folyószakaszra vonatkozó eredményeit (**2. táblázat**).

2. táblázat: A szelvénymenti hordalékhozam mértéke

| Helyszín | 2012.06.14 | | | 2012.08.26 | | |
|---------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| | Q _i _mintavevő [kg/s] | Q _i _ADCP [kg/s] | Q _i _Szombati [kg/s] | Q _i _mintavevő [kg/s] | Q _i _ADCP [kg/s] | Q _i _Szombati [kg/s] |
| Drávaszabolcs | 3,0 | 7,8 | - | 2,8 | 15,6 | - |
| Barcs | 9,3 | 49,3 | 50 | 6,7 | 50,8 | 62 |
| Belsice | 2,0 | 12,2 | - | 1,0 | 14,4 | - |
| Botovo | 1,9 | 337,1 | 760 | 0,1 | 46,5 | 350 |
| Bélavár | 5,6 | 306,4 | 240 | 0,01 | - | 130 |

Ezek alapján az alkalmazott eljárás segítségével durvább szemcseátmérőjű szakaszokon tapasztalható javulás a korábbi módszerhez képest, azonban finomabb szemcseátmérővel rendelkező szelvényekben ez nem jelentős. Annak érdekében, hogy az eljárás megbízhatóbb eredményekre vezessen, az összefüggésekben megjelenő paraméterek becslését finomítottam.

5.3 A módszer továbbfejlesztése

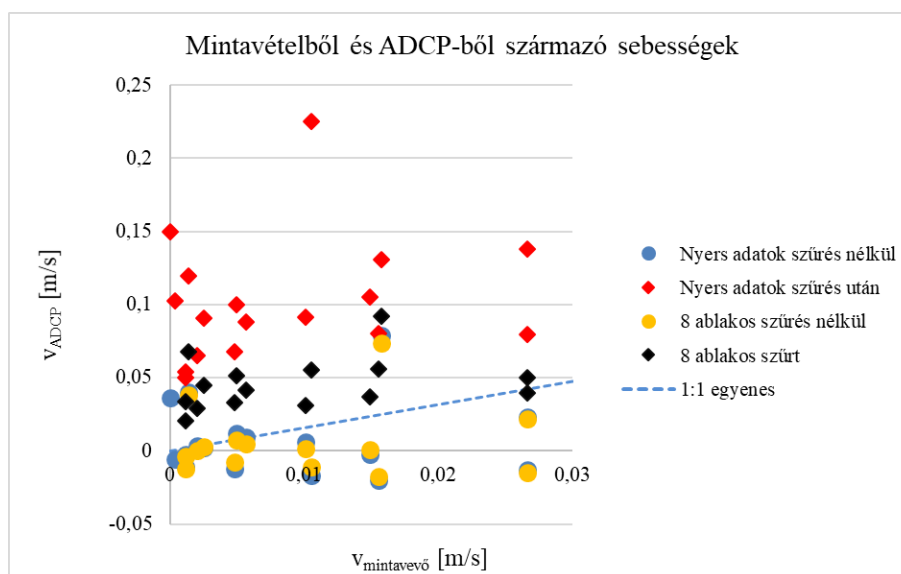
Az eljárás alapját adó fizikai egyenlet (5. egyenlet) két különálló tagra bontható. Egyrészt a V_b sebességkomponensre, valamint a mozgó hordalékra tehető leíró tagra $(1-\lambda_p)d_s\rho_s$. Ezen két összetevő külön-külön való megvizsgálása segítségével próbálok olyan belső összefüggésre jutni, mely javíthat az eljárás pontosságán.

A sebességkomponens vizsgálatánál elsődleges probléma, hogy mit definiálunk a mozgóréteg sebességének. Az egyenletben értelmezett V_b tag a teljes görgetett hordalék mennyiség átlagos sebességét jelenti, azonban az egyes hordalék csoportok szétválasztása nem egyértelmű. Minthogy a csoportosítás alapját adó szemcsemozgás, a közvetlen a szemcse környezetében található víztér energiájától függ, így a definíció értelmében a szemcsehatár minden egyes függvényben eltérő lehet. A mederfenék környezetében ugráló, gördülő szemcsék együtt mozognak hosszabb-rövidebb ideig lebegésben lévő hordalék szemcsékkel, pillanatnyi vízsebességtől függően egyik fázisból a másikba kerülhetnek át (*F.V.I.* felvétel). (A hordalék szemcsék mozgásának dinamikáját részletesen ismerteti (Bagnold, 1956; Bogárdi, 1971) munkája.). A hordalékfogóval az apró lebegő hordalékot nem vagyunk képesek felfogni, ugyanakkor az szerves részét képezi a mederfenéken mozgó folyton változó hibrid közegnek. Így a direkt mintavételből származó minták esetén visszszámolt hordaléksebesség pusztán a nagyobb szemcsék átlagos mozgási sebességéről ad információt.

Az ADCP azonban a rendkívül finom szemcsék sebességét is méri. A műszer működési alapelvei közé tartozik, hogy a finom lebegtetett hordalék víztérben való sebességét egyenlőnek tekinthetjük a környező víz sebességével, ezen feltevés alapján alkalmazható áramlásmérésre. Azonban ez az elv nagyobb szemcsék esetén nem érvényes. Láthatjuk, hogy

ennek következtében a hibrid mederfenék közeli réteg tényleges sebességének meghatározása nem egyértelmű feladat, és a két megközelítés óhatatlanul eltérő eredményre fog vezetni. A következőkben ezen két eltérő módon kifejezett sebesség értékeit vetem össze annak érdekében, hogy kapcsolatot találjak közöttük.

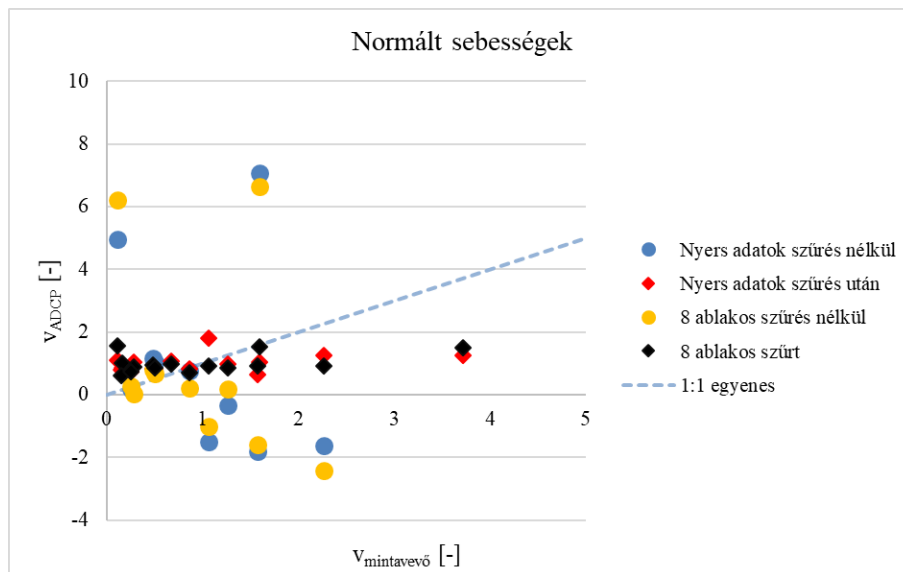
Az alábbi **22. és 23. ábrákon** ugyanazon méréshez tartozó (2012.06.14.) ADCP sebességértékeket ábrázoltam a fizikai mintavételből visszszámolt sebességekkel. Minden függély esetén bemutatom a teljesen nyers adatokból származó, valamint azok 8 ablakos mozgóátlaggal előzetesen simított; a fenti **11. egyenlet** alapján szűrt és eredeti értékeit (függélyekre vonatkozó átlagértékek).



22. ábra: A mintavételből visszszámolt sebességek és az ADCP által mért sebességek összehasonlítása

Az ábrán látható, hogy a szűrés hatására az átlagos sebességértékek jelentősen megnőnek. Ez az átlagolás előtt leválogatott negatív értékek miatt alakul így. A vártak megfelelően az ADCP-vel mért sebességek magasabbra adódnak, mint a visszszámolt értékek, ugyanis nagy valószínűséggel ezek tartalmazzák a mederfenék közelében mozgó lebegésben lévő hordalékszemcsék magasabb sebességértékeit is. Ez a megfigyelés egybevág (Conevski et al, 2018) eredményeivel. Ugyan a tanulmányban nem térnek ki ilyen jellegű összefüggés vizsgálatára, azonban a fizikai mintavétel és az ADCP-s hordalékhozam számítás eredményei összehasonlításánál azt tapasztalták, hogy az indirekt módszer jellemzően felülbecsüli a mintavételből számított értéket. Ez azonos mozgóréteg paraméterek esetén a fenti megállapításhoz vezet.

A sebességértékek nagyságának összevetése mellett megvizsgáltam azok átlaggal való normált értékei között mutatkozó kapcsolatot. Ennek ismeretében a mintavételből visszszámolt sebességek eloszlását hasonlíthatom össze az ADCP által mért sebességek eloszlásával.

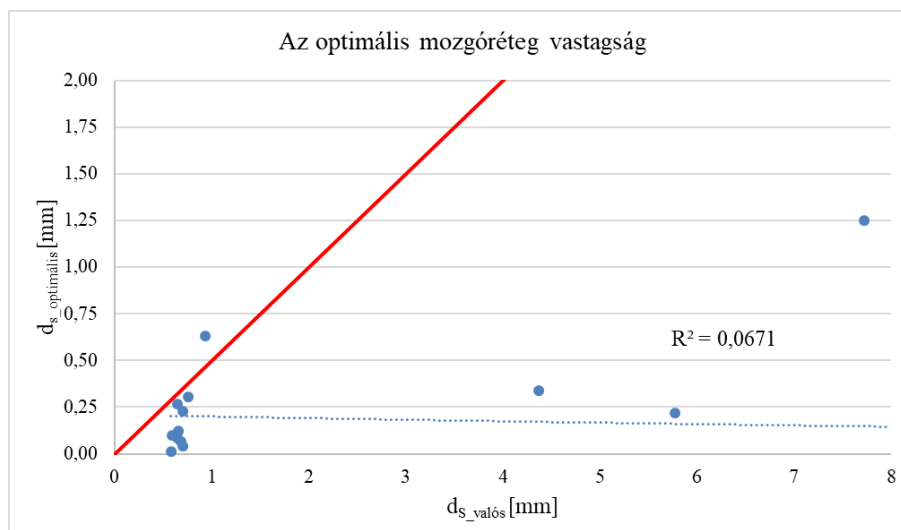


23. ábra: A mintavételből visszszámolt sebességek és az ADCP által mért sebességek átlaggal normált értékeinek összehasonlítása

Az ábra alapján megállapítható, hogy az átlagértéktől való relatív eltérése a sebességeknek jó egyezést mutat a szűrt adatok esetén. Ez azt jelenti, hogy az ADCP adatok vizsgálatával jellemben sikerült visszkapni a mintavevő segítségével számolt sebességmező eloszlását. Szűrés nélkül azonban az eredmények nem mutatnak megfelelő kapcsolatot, így az eljárás igazoltnak tekinthető.

A sebességtényező ugyan hozzájárul a hordalékhozam felülbecsléséhez, azonban az eredmények alapján ez a tag nem okoz olyan mértékű torzulást, mint amit tapasztaltunk. Ebből arra következtethetünk, hogy a módosításokat a mozgó hordalékraetget leíró tag esetén kell elvégeznünk. A korábban bemutatott **21. ábrán** látható, hogy az egyre nagyobb D_{50} értékek exponenciális növekedését okozták a hibának, az összefüggés mértéke figyelemreméltó, $R^2=0.9191$. A viszonylag nagy pontatlanság azonban nem származhat közvetlenül az átlagos szemcseméret nagyságából, ugyanis az laboratóriumi körülmények között kellő pontossággal meghatározható. A hiba forrása a felhasznált Einstein-féle mozgóréteg vastagság meghatározásában, vagy pedig a λ_b porozitás becslésében lehet.

Első lépésben a hordalékfogóval gyűjtött minták esetén visszszámoltam azt a rétegvastagságot ($d_{s, \text{optmális}}$), mely esetén rögzített $\lambda_b=0,36$ -os porozitás mellett a mért mintával megegyező hordalékhozamot kapok. Ezeket a valós D_{50} értékekből az Einstein-féle értelmezés alapján számított rétegvastagsággal párosítva ábrázoltam az alábbi ábrán.

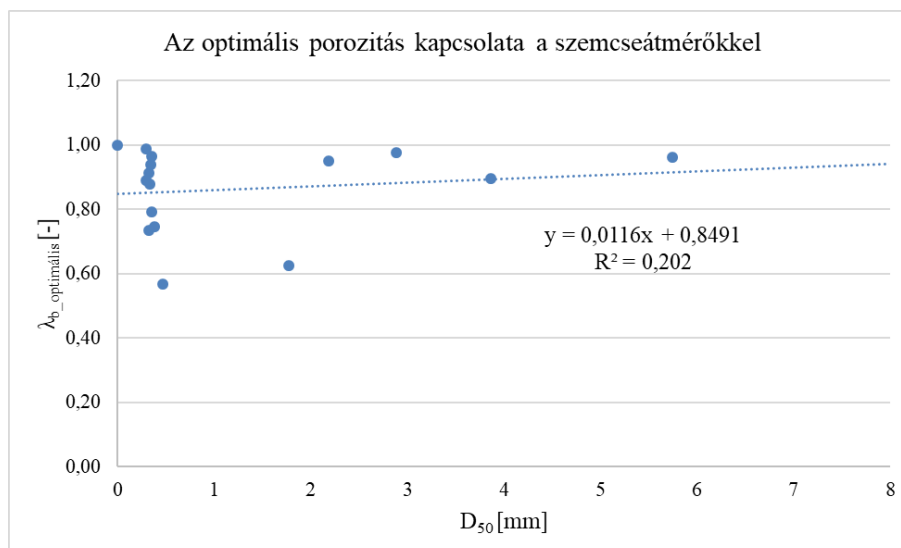


24. ábra: A valós (Einstein-féle) és az optimális mozgóréteg vastagság kapcsolata

Piros vonallal jelöltem a lehető legkisebb értelmezhető rétegvastagságot, azaz $1xD_{50}$ értéket. Látható, hogy szinte kivétel nélkül ezen határ alatt jelenik meg az optimális rétegvastagság, mely fizikailag lehetetlen. Ennek következtében a porozitást kell oly módon megválasztani, hogy annak segítségével a mérthez közeli hordalékhozamot kapjunk.

A mozgó hordalék porozitásának becslése nem könnyű feladat. A már kiemelt, nyugalomban lévő minták esetén laboratóriumban ez különösebb nehézségek nélkül elvégezhető, a különféle talajalkotók jellemző porozitásértékeinek széles szakirodalma van (pl: Swiss Standard, 1999). Azonban a dinamikus mozgásban lévő, mederközeli hibrid réteg effektív porozitásának megmérése nincs módunk. Mint láhattuk ebben a határrétegben különböző mozgást végző hordalékszemcsék kavalkádja mozog együtt, és további bizonytalanságot hordoz magában az ADCP hanghullámok nem jól definiálható visszaverődési felülete is. Mederfenék közvetlen videofelvételekkel történő elemzése során azt tapasztaltam, hogy ez a dinamikus réteg kavicsos mederanyag esetén jellemzően nem egybefüggő réteggént halad lefelé a vízfolyásban, hanem meg-meginduló hullámokban, az egyes részecskék különálló véletlenszerű mozgása során halad előre. A szemcsék között jelentős hézagok jelennek meg.

A következő lépésben az optimális rétegvastagság meghatározásánál ismertetett elvek mentén, meghatároztam egy optimális porozitás értéket ($\lambda_{b_optimális}$). Ennek kapcsolatát az átlagos szemcseátmérővel az alábbi ábra mutatja be.



25. ábra: Az optimális porozitás kapcsolata a D_{50} értékekkel

Látható, hogy ezen értékek között igazán szoros kapcsolat nem mutatkozik. Azonban mégis azt a feltevést erősíti, hogy a konstans porozitás alkalmazása nem vezet megfelelő eredményre. Nagyobb szemcseméret esetén az érték rendre nő. A kalibráció során tehát a rugalmasabban változtatható effektív porozitásértéket kell megfelelően beállítani.

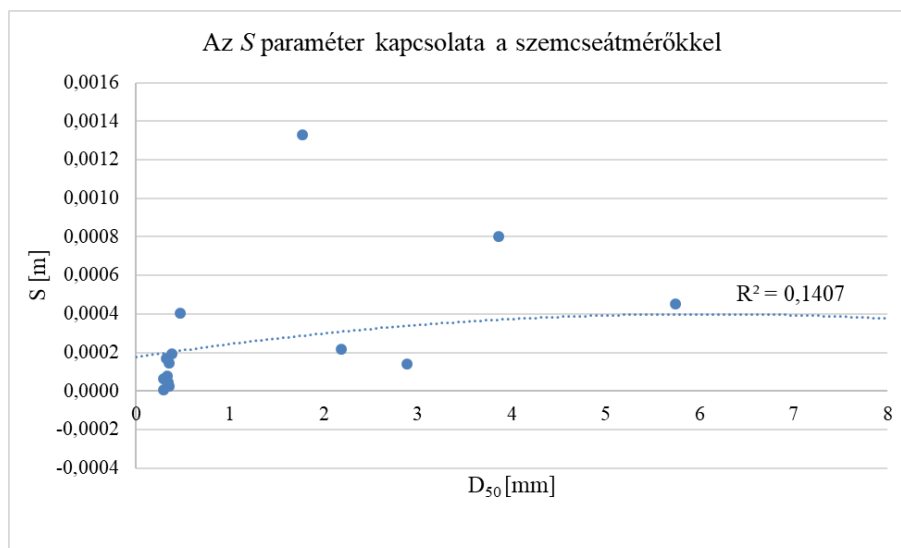
A fentiekből látszik, hogy külön-külön sem az optimális porozitás, sem az optimális mozgóréteg vastagság érték nem áll szoros kapcsolatban a görgetett hordalék átlagos szemcseméretével. Minthogy mindkét paraméter érték vizsgálatához a másikat becsülnöm kellett, így a következő lépésben kézenfekvő ezen tényezők együttes vizsgálata. Ennek érdekében az eredeti egyenletet a következő formába rendeztem át,

$$q_b = V_b \rho_s S \quad (12)$$

$$S = (1 - \lambda'_p) d'_s \quad (13)$$

ahol S jelöli a beállítandó mozgóréteget leíró tagot, λ'_b az effektív porozitás, d'_s pedig az effektív mozgóréteg vastagság.

A kalibrálásánál továbbra is az Einstein-féle rétegvastagságot leíró egyenletet veszem alapul. Minthogy az egész módszertan az ADCP értékekből számított sebességeken nyugszik, így azt a kalibráció során rögzített bemeneti paraméterként veszem. Minden mintavévővel mért q_b hordalékhozamhoz, az ADCP segítségével a függélyre számolt átlagsebességet rendeltem hozzá, majd ebből számoltam vissza S értékét. A paraméternek az átlagos szemmagysághoz való kapcsolatát az alábbi ábra mutatja be.

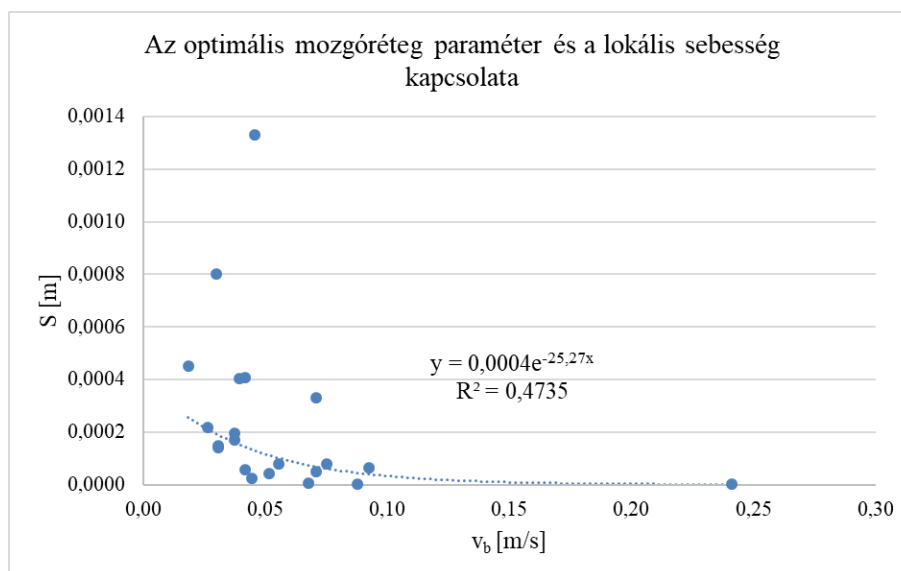


26. ábra: Az S paraméter kapcsolata a D_{50} értékekkel

Az értékek között egyáltalán nem mutatkozik kapcsolat, így kijelenthető, hogy pusztán a hordalékréteg vizsgálatával nem lehet javítani az eljárásom. Minthogy azonban a hozam meghatározása a sebességkomponens értékétől is függ, ezért külön megvizsgáltam ezen paraméterek kapcsolatát a hordalékréteget leíró taggal. A fenti **12. egyenletet** S -re átrendezve azt kapjuk, hogy adott fajlagos hordalékhozam esetén a sebesség növekedésével S folyamatosan csökken.

$$S = \frac{q_b}{V_b \rho_s} \quad (14)$$

A mért értékek alapján az alábbi összefüggést találtam (**27. ábra**):



27. ábra: Az S paraméter és az ADCP által mért sebesség kapcsolata

A kapcsolat ugyan nem mutatkozik kimondottan erősnek, azonban a rengeteg bizonytalanságot figyelembe véve relatíve jónak tekinthető. Az illeszkedést megvizsgálva belátható, hogy a két paraméter egymásra hatása nem elhanyagolható, különálló kalibrálásuk

nem célravezető. Az illesztett regressziós görbe alapján a következő kapcsolat írható fel a tagok között, melynek segítségével az ADCP által mért lokális sebesség alapján egyszerűen számítható S értéke.

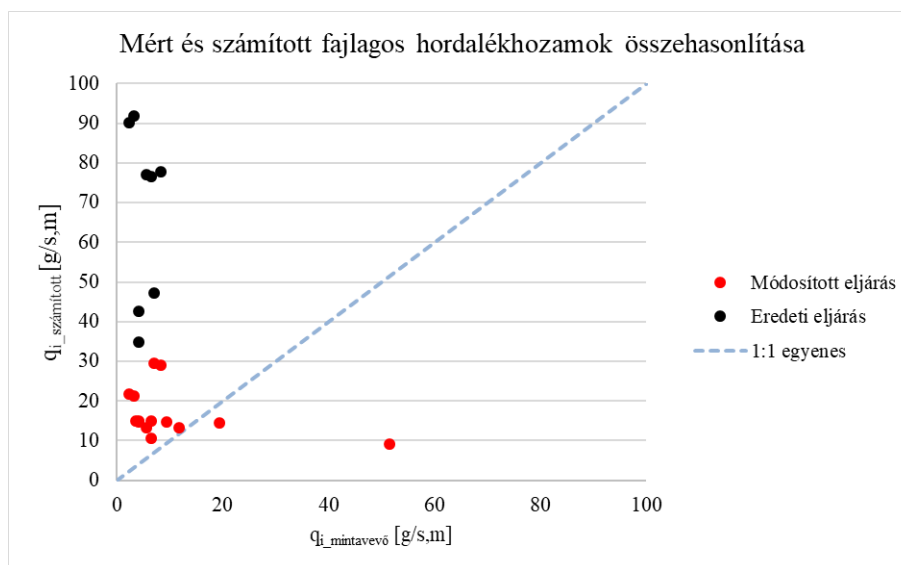
$$S = 0,0004e^{-25,27v_b} \quad (15)$$

A mozgórteget leíró paraméter meghatározása után a következő lépés az optimális λ'_b és d'_s értékek beállítása, az adott függvény esetén. A két tényező között amint azt korábban bemutattam, nincs szoros kapcsolat (25. ábra), azonban a trend jellegét meg tudtam becsülni. Ez az Einstein-féle összefüggés alapján az alábbi összefüggésre vezetett, mely alapján a két érték beállítható.

$$\lambda'_b = 0,0065d'_s + 0,8366 \quad (16)$$

Becslésemhez egy iterációs lépéssorozat bevezetését javaslom, melyben először a minta D_{50} értékét felhasználva kiszámolom λ'_b -t, majd ezt felhasználva visszaszámolom d'_s értékét. Ezután újratekintem az effektív porozitás számítását így tovább, míg az egymást követő értékek kellően közel nem kerülnek egymáshoz, vagy $d'_s < D_{50}$ értéket vesz fel. Ebben az esetben $d'_s = D_{50}$.

A felállított összefüggés ellenőrzését független adatokon végeztem. A 2012.08.28-as mérési kampány eredményei nem szerepeltek a kalibrációs görbék felállítására használt adatok közt, így ezek vizsgálata megfelelő a validálásra. A folyó vízhozama a méréskor $\sim 400 \text{ m}^3/\text{s}$ volt. Az igazoló számításokat elvégeztem az egyes szelvényekben, és összehasonlítottam a mért értékekkel az új és a régi eljárás esetén kapott eredményeket.



28. ábra: A fejlesztés hatására elért javulás a becsült fajlagos hordalékhozam értékekben

Az ábrán a piros pontok jelölik az általam kidolgozott eljárás alapján becsült fajlagos hordalékhozam értékeket, míg a fekete jelölők a módosítás nélküli régebbi, rögzített porozitás és mozgórteget paraméterrel számító eljárás eredményeit mutatják. Kijelenthető, hogy az újonnan bevezetett számítási eljárás segítségével lényegesen javítható a fajlagos

hordalékhozamok becslése. Az alábbi táblázatban (**3. táblázat**) összefoglaltam a fajlagos értékekből számolt szelvénymenti hozam nagyságokat, a mintavételből származó, valamint Szombati 2014-es munkájában bemutatott értékekkel együtt.

3. táblázat: A fejlesztett módszer által kapott eredmények összehasonlítása a korábban bemutatott értékekkel

| 2012.08.26 | | | | |
|---------------|--------------------|---------------------|---------------|-------------------|
| Helyszín | $Q_{i_mintavevő}$ | $Q_{i_MÓDOSÍTOTT}$ | Q_{i_ADCP} | $Q_{i_Szombati}$ |
| | [kg/s] | [kg/s] | [kg/s] | [kg/s] |
| Drávaszabolcs | 2,8 | 3,5 | 15,6 | - |
| Barcs | 6,7 | 2,5 | 50,8 | 62 |
| Belsice | 1 | 3,2 | 14,4 | - |
| Botovo | 0,1 | 0,5 | 46,5 | 350 |

Az első oszlopban a tényleges fizikai mintavétel eredményei, a másodikban az új közelítő eljárás, a harmadikban a rögzített paraméterekkel számolt eredmények, míg az utolsó oszlopban a folyószakaszra vonatkozó korábbi tanulmányban (Szombati, 2014) számított értékek láthatók.

Látható, hogy a vizsgált néhány minta esetén az eljárás jelentős javulást eredményezett. Természetesen a kalibrációs görbék felülvizsgálata mindenképpen szükséges, az összefüggés hely- és szakaszspecifikusságát is ellenőrizni kell. Mindazonáltal kijelenthető, hogy a javított módszertan megfelelőnek tűnik ADCP mérések alapján történő hordalékhozam becslésre.

5.4 A módszer alkalmazása terepi mérések során

A módszer dunai környezetben való alkalmazására a Gönyűnél végzett terepi mérések alatt gyűjtött ADCP adatokat használtam fel. A mérési kampány során kijelölt függélyekben állóhajós méréseket végeztünk, mely segítségével az egyes mérési pontokhoz lényegesen nagyobb adathalmaz állt rendelkezésemre, mint a korábban bemutatott 2012-es drávai mérés esetén. A számítást a korábban ismertetett eljárással analóg módon végeztem, azzal a különbséggel, hogy a megfelelő sebességvektorok leválogatása lényegesen egyszerűbbé vált. A mérés kezdőpontjához definiáltam egy meghatározott sugárral rendelkező tartományt, és az ezen belül található sebességvektorokat használtam fel a virtuális morgórétteg sebesség meghatározásához.

A következőkben a 2018.06.22-i mérésnapra vonatkozó eredményeket mutatom be. A Duna vízállása aznap 93 cm, vízhozama $\sim 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ volt Gönyűnél. A vizsgált függélyek az alábbi ábrán láthatók (**29. ábra**).



29. ábra: A vizsgált függélyek elhelyezkedése a gönyői mérés során (2018.06.22.)

A sárga jelölők mutatják az egyes függélyek helyét, a piros szaggatott vonal pedig közelítőleg leköveti a sodorvonalat. A vizsgált szakasz kanyarulatban található, az áramlás a jobb parthoz szorul, melynek a kikötő torkolatánál található vezetómű tart ellent. A hordalékmozgást leíró összefüggések értelmében ezen vonal mentén várunk jelentős görgetett hordalékmozgást, illetve nagyobb virtuális sebességeket. Az eredményeket az alábbi táblázatban foglaltam össze (4. táblázat).

4. táblázat: Az ADCP által mért virtuális sebességek, és az általuk becsült fajlagos hordalékhozam értékek

| Függély száma | v_b | q_b |
|------------------|-------|---------|
| | [m/s] | [g/s/m] |
| 001 | 0,014 | 10,20 |
| 002 | 0,076 | 11,43 |
| 004 | 0,016 | 11,02 |
| 005 | 0,025 | 13,67 |
| 006 | 0,003 | 2,94 |
| 007 | 0,017 | 11,21 |
| 009 | 0,030 | 14,35 |
| 010 | 0,002 | 1,85 |

Jól látszik, hogy a mozgóréteg sebessége jól közelíti a várt eloszlást. A part menti függélyekben (010; 006) nagyon alacsony értékeket kaptam, míg a sodorvonalban magasabbakat (002; 005 és 007). A fajlagos hozamértékek esetén is kirajzolódik az elméleti eloszlás, kivételt képez a 002-es függély. Bár ott mértük a legmagasabb virtuális sebességet, a hozamérték nem tükrözi ezt. Ez annak köszönhető, hogy a kalibrációs eljárás során ebben a

sebességtartományban nem voltak értékek, így a meghatározott összefüggés ezen tartományban nem megfelelő. Mindazonáltal az eredmények reálisnak mondhatók, különösen a Dr. Rákóczi László által, a vizsgált folyószakaszra mért értékeivel összevetve (Rákóczi, 1971). Tanulmányában 1050 m³/s-os hozam esetén 1 g/s,m; 1450 m³/s-os hozam esetén pedig 9 g/s,m görgetett hordalékhozamot mért. Ez figyelembe véve a bizonytalanságok mértékét rendkívül jó egyezést mutat az általam felállított összefüggéssel becsült hozamokkal. A fajlagos értékekből a trapéz módszer segítségével szelvénymenti hordalékhozamot becsültem. Ezek ~4,5 – 5,5 kg/s eredményt mutattak, melyek magasabb hordalékhozamot jelentenek a folyószakaszra korábban bemutatott értékeknél (<0,5 – 1,5 kg/s) (Török & Baranya, 2017). A hivatkozott tanulmányban a Károlyi-féle kis mintavevővel gyűjtött alapadatokat használták. Ez ismét arra enged következtetni, hogy a hordalékfogó alkalmazása nem megfelelő a vizsgált területen.

Összességében tehát elmondható, hogy az eljárás megfelelően használható görgetett hordalék vizsgálatára. Kivitelezéséhez a függélyenkénti allóhajós ADCP mérések elvégzése javasolt, azonban nagyobb pontatlanságok mellett a szelvénymenti mozgóhajós eljárással is becsülhető a hordalékhozam. Az eredmények alapján belátható, hogy az eljárás pontosításra szorul. A kalibrációs görbe kiterjesztése javasolt, melyet célravezető a vizsgált folyószakaszon gyűjtött adatokkal felállítani.

6 Összefoglalás

Terepi mérések tapasztalata alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a jelenleg a Felső-Dunán alkalmazott görgetett hordalék mérési eljárás megfelelősége vitatható. A Károlyi-féle kis mintavevő a felső-dunai folyószakaszon nem működik megfelelően, az általa gyűjtött adatok felülvizsgálata javasolt. Ennek kapcsán dolgozatomban két eltérő alternatívát mutattam be, melyek lehetőséget nyújtanak az alkalmazott módszertan továbbfejlesztésére, illetve kiváltására.

A jelenleg alkalmazott hordalékfogó részletes vizsgálatára a REEF3D nyílt forráskódú numerikus megoldó használatát javasoltam. A modellkörnyezet igazolását egy egyszerű geometriájú mintavevő esetén számított eredmények korábbi laboratóriumi vizsgálatokkal való összevetésével végeztem. Ezek rendkívül jó egyezést mutattak, így a modell használatát megalapozottnak találtam. A Károlyi-féle mintavevő numerikus vizsgálatával részletes képet kaptam a hordalékfogó belesjében kialakuló áramlási viszonyokról, melyek segítségével javaslatot tehettem egy kedvezőbb geometria kialakítására. A numerikus eljárás megfelelő alternatívája lehet a laboratóriumi vizsgálatoknak.

Dolgozatom második felében az indirekt hordalékmérési eljárás adaptálhatóságát vizsgáltam meg. Korábbi terepi mérések ADCP adatai alapján a virtuális sebességek módszerével fajlagos és szelvénymenti hordalékhozam értékeket számítottam. Ezeket összevettem a közvetlen mintavételből származó eredményekkel, mely során jelentős eltérést tapasztaltam. Ez arra a következtetésre vezetett, hogy a módszer közvetlenül nem alkalmas a hordalékhozam becslésére, annak továbbfejlesztése szükséges. Az eltérések okának az ADCP működési elvéből származó torzulásokat találtam, melyek kiküszöbölésére különböző összefüggéseket kerestem a mozgó hordalékra leíró paraméterek között. Jellemzően nem mutatkozott szoros összefüggés az egyes paraméterek között, azonban a hordalékmozgást leíró tagok (virtuális sebesség és mozgóréteg paraméter) között már mutatkozott kapcsolat. Ezek segítségével felállítottam egy eljárást mely lehetővé tette az ADCP adatok alapján történő közvetlen hordalékhozam becslést. A múltbeli adatok egy részén alkalmaztam az új eljárást, és jelentős javulást tapasztaltam az eredeti módszerhez képest. A fejlesztett eljárás segítségével a saját terepi méréseink alatt gyűjtött adatokat is feldolgoztam, így az eredetileg kijelölt vizsgálati helyszínre is meghatározhattam fajlagos hordalékhozam értékeket. Az eredmények jó egyezést mutattak a Rákóczi László által a folyószakaszra meghatározott korábbi értékekkel (Rákóczi, 1971). Az értékek alapján azonban kijelenthető, hogy a módszer további fejlesztésre szorul, a kalibrációs tartomány szélesítése mindenképpen kívánatos, és nagyobb számú adat felhasználásával a kalibrációs görbék felülvizsgálata is szükséges.

Mindazonáltal a dolgozatban bemutatott eredmények alapján kijelenthető, hogy a céljaként kitűzött elvárásoknak sikerült megfelelnie, új alternatívát nyújtott a jelenleg alkalmazott hordalékmérési módszertan kiváltására.

Köszönetnyilvánítás

A dolgozat létrejöttéhez nyújtott nélkülözhetetlen segítségért szeretném köszönetemet kifejezni Dr. Török Gergely Tihamérnak, aki szakmai útmutatásával segített az bemutatott munka elkészítésében. Emellett külön köszönettel tartozom Dr. Baranya Sándornak, aki megteremtette a megfelelő szakmai környezetet vizsgálataim elvégzéséhez, illetve Fleit Gábornak, aki a numerikus modellezés során nyújtott temérdek segítséget.

Külön köszönetemet szeretném kifejezni Dr. Rákóczi Lászlónak, aki pótolhatatlan személyes tapasztalatainak megosztásával, illetve széleskörű szakmai munkásságának rendelkezésemre bocsátásával olyan tudást adott át, mely nélkülözhetetlen volt számomra.

A kutatás az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-2-1 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.



EMBERI ERŐFORRÁSOK
MINISZTERIUMA

Irodalomjegyzék

- Bagnold, R.A. (1956). *The flow of cohesionless grains in fluids*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 249:235-297.
- Berthelsen, P. A. és Faltinsen, O. M. (2008). *A local directional ghost cell approach for incompressible viscous flow simulations*, Journal of Computational Physics, 227, 4354-4397.
- Bihs, H., Kamath, A., Chella, M. A., Aggarwal, A. és Arntsen Ø. A. (2016). *A new level set numerical wave tank with improved density interpolation for complex wave hydrodynamics*. Comp. and Fluids 140 (2016) 191-208.
- Bihs, H., Kamath, A., Chella, M. A. and Pákozdi, Cs. (2017). *Complex geometry handling for a cartesian grid based CFD solver*, MekIT'17, 9. National Conference on Computational Mechanics.
- Bogárdi, J. (1939). *Hordalékmérési kísérletek a Felső-Dunán*, Vízügyi Közlemények, 21. évf, pp. 115-131
- Bogárdi, J. (1971). *Vízfolyások hordalékszállítás*, Akadémia Kiadó, Budapest
- Boussinesq, J. (1877). *Essai sur la théorie des eaux courantes*, Mémoires présentés par divers savants à l'Académie de Sciences, 23(1):1-680.
- Bunte, K., Klema, M., Hogan, T. és Thornton, C. (2017). *Testing the Hydraulic Efficiency of Pressure Difference Samplers While Varying Mesh Size and Type*, Technocal Committee of Federal Interagency Sedimentation Project Report, Colorado State University, Engineering Research Center, Fort Collins, CO80523
- Conevski, S., Winterscheid, A., Rütther, N., Guerrero, M. és Rennie, C. (2018). *Evaluation of an acoustic Doppler technique for bed-load transport measurements in sand-bed Rivers*, River Flow, E3S Web of Conferences. 40. 02053. 10.1051/e3sconf/20184002053.
- Csiti, B. (2016). *Investigation of direct and indirect suspended sediment measuring methods*, BME-ÉMK TDK dolgozat.
- Davis, A. P., Wilson, H. M. (1919). *Irrigation Engineering*, p.375., John Wiley and Sons
- Ehrenberger, R. (1933). *Measurement of bed-load by aid of traps model studies concerning these traps*, Die Wasserwirtschaft, pp. 1-18
- Einstein, H.A. (1937). *The calibration of the bed-load trap used in the Rhine*, Schweizerische Bauzeitung, Bd 110, No. 14, pp. 29-32, 1937. Fordítás: U.S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi
- Emmett, W.W. (1980). *A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith bedload sampler*, Geological Survey professional paper: 1139.
- Fleit, G. (2016), *Validation of a 3D Morphodynamic Model for Complex Flows*, BME-ÉMK MSc diplomamunka.
- Garcia, M. H. (2006). *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*, World Environmental and Water Resource Congress 2006.
- Haschenburger, J.K. és Church, M. (1998). *Bed material transport estimated from virtual velocity of sediment*, Earth Surface Processes Landforms, Volume 23, pp. 791-808.
- Hollingshead, A.B. (1971). *Sediment transport measurement in gravel river*, Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, Volume 97, pp. 1817-1834.
- Holmes, R.R. Jr. (2010). *Measurement of Bedload Transport in Sand-Bed Rivers: A Look at two Indirect Sampling Methods*, U.S. Geological Survey, Rolla, Missouri, United States.
- Hubbel, D.W., és Sayre, W.W. (1964). *Sand transport studies with radioactive tracers*, Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, Volume 90, Number HY3, pp 39-68.

- Kamath, A., Bihs, H. and Arntsen Ø. A. (2017). *Application of a 6DOF algorithm for the investigation of impulse waves generated due to sub-aerial landslides*. MARINE 2017, VII International Conference on Computational Methods of Marine Engineering.
- Károlyi, Z. (1947). *Kísérletek a hordalékfogóval*, Vízügyi Közlemények, 29. évf., pp. 100-107.
- O'Rourke, J. (1999). *Computational Geometry in C*. Cambridge University Press.
- Osher, S. és Fedkiw, R.P. (2001). *Level set methods: An overview and some recent results*, Journal of Computational Physics, 168:463-502.
- Rákóczi L. (1965). *Radioaktív izotópok a hidraulikai és vízgazdálkodási kutatásban*, VITUKI Vízügyi és Műszaki Tájékoztató Iroda, Budapest.
- Rákóczi L. (1971). *Tapasztalatok az empirikus és fél-empirikus görgetett hordalékhozam összefüggésekkel kapcsolatban*, Hidrológiai Közlöny, 51. évf., 8-9. szám, pp. 402-411.
- Rákóczi L. (1972). *Nukleáris mérési módszerek a hidrológiában*, Nemzetközi hidrológia továbbképző tanfolyam – kézikönyv, VITUKI, Budapest.
- Rákóczi L. (1993). *A Duna hordalékjárása (Sediment load conditions of River Danube)*, V. K., 75, pp. 128-146.
- Rennie, C.D., Millar, R.G. és Church, M.A. (2002) *Measurement of bed-load velocity using an acoustic Doppler current profile*, Journal of Hydraulic Engineering, Volume 128(5), pp. 473-483.
- Rennie, C.D., Rainville, F. és Kashyap, S. (2007). *Improved Estimation of ADCP Apparent Bed-Load Velocity Using a Real-Time Kalman Filter*, Journal of Hydraulic Engineering, Volume 133, Issue 12.
- Reynolds, O. (1985). *On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 186:123-164.
- Simons, D.B., Richardson, E.V. és Nordin, C.F. (1965). *Bedload equation for ripples and dunes*. U.S. Geological Survey Professional Paper 462-H.
- Slaymaker, H.O. (1972). *Patterns of present sub-aerial erosion and landforms in mid-Wales*. Transactions of the Institute of British Geographers, Volume 55, pp. 47-68.
- Southard, J. (Fall 2006). 12.090 *Introduction to Fluid Motions, Sediment Transport, and Current-Generated Sedimentary Structures*. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, <https://ocw.mit.edu>. License: Creative Commons BY-NC-SA.
- Swiss Federal Authority for Water Utilization (1939). *Field research on bed formations, bed-load, and suspended load movement*, Bern.
- Swiss Standard SN 670 010b (1999), *Characteristic Coefficients of soils*, Association of Swiss Road and Traffic Engineers, Zurich
- Szombati, D. Cs. (2014). *Kavicsos és vegyes szemösszetételű folyók görgetett hordalékhozamának becslése Doppler elvű eljárással*, BME-ÉMK TDK dolgozat.
- Török, G.T. és Baranya, S. (2017). *Morphological Investigation of a Critical Reach of the Upper Hungarian Danube*, Periodica polytechnica Civil Engineering, 61 (4), pp. 752-761.
- USGS Report (1940). *Equipment used for sampling bed-load and bed material*, Report No. 2. Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams, St. Paul Engineer District Sub-Office, Hydraulics Laboratory, University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Van Rijn, L.C. (1984). *Sediment transport, Part I: bedload transport*, Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, Volume 110, Number 10, pp. 1431-1456.
- Willis, J.C. és Kennedy, J.F. (1975). *Sediment discharge of alluvial streams calculated from bedform statistics*. Iowa Institute of Hydraulic Research Report No. 202, University of Iowa, Iowa City, Iowa.

Függelék

F.1. táblázat: A numerikus modell igazolásakor használt mérési pontok elhelyezkedése

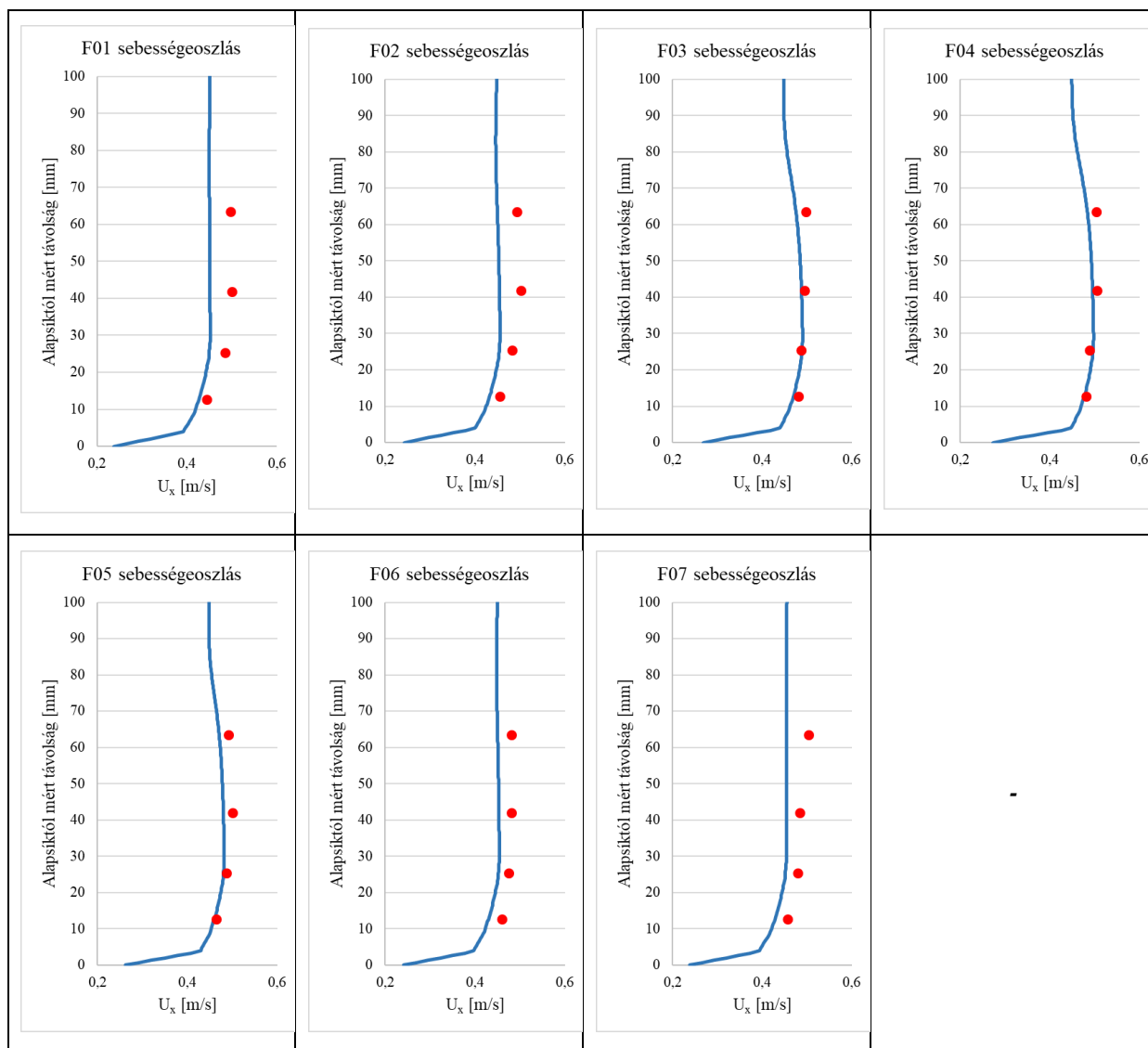
| Alapsíktól mért magasság [mm] | A mintavevő középtengelyétől mért távolság [mm] | | | | | | |
|-------------------------------|---|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| | F01 | F02 | F03 | F04 | F05 | F06 | F07 |
| 12,70 | 72,39 | 51,44 | 24,77 | 0,00 | 24,77 | 51,44 | 72,39 |
| 25,40 | | | | | | | |
| 41,91 | | | | | | | |
| 63,50 | | | | | | | |

F.2. táblázat: A numerikus modell eredményei a mérési pontokban

| | F01 | F02 | F03 | F04 | F05 | F06 | F07 | Függély | | |
|-------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|
| | 72,39 | 51,44 | 24,77 | 0 | 24,77 | 51,44 | 72,39 | Pozíció [mm] 0 = K. tengely | | |
| Alapsíktól mért magasság [mm] | Áramlási sebesség (mért) v_x [m/s] | | | | | | | Vízszintes átlag | | |
| | | | | | | | | Összes | Belső | Külső |
| 12,7 | 0,444 | 0,455 | 0,481 | 0,480 | 0,465 | 0,459 | 0,457 | 0,463 | 0,475 | 0,454 |
| 25,4 | 0,485 | 0,482 | 0,487 | 0,489 | 0,487 | 0,475 | 0,479 | 0,483 | 0,488 | 0,480 |
| 41,91 | 0,499 | 0,502 | 0,495 | 0,505 | 0,500 | 0,481 | 0,484 | 0,495 | 0,500 | 0,491 |
| 63,5 | 0,496 | 0,493 | 0,498 | 0,504 | 0,491 | 0,480 | 0,503 | 0,495 | 0,498 | 0,493 |
| Alapsíktól mért magasság [mm] | Áramlási sebesség (számított) v_x [m/s] | | | | | | | Vízszintes átlag | | |
| | | | | | | | | Összes | Belső | Külső |
| 12,7 | 0,396 | 0,404 | 0,444 | 0,451 | 0,434 | 0,401 | 0,398 | 0,418 | 0,443 | 0,400 |
| 25,4 | 0,437 | 0,443 | 0,479 | 0,486 | 0,470 | 0,441 | 0,440 | 0,457 | 0,479 | 0,440 |
| 41,91 | 0,451 | 0,455 | 0,489 | 0,497 | 0,481 | 0,454 | 0,454 | 0,469 | 0,489 | 0,454 |
| 63,5 | 0,450 | 0,452 | 0,482 | 0,490 | 0,475 | 0,451 | 0,454 | 0,465 | 0,482 | 0,452 |

F.V.1. felvétel: A mozgó mederről készült felvételekre mutató link

<https://drive.google.com/open?id=1QFkcMxvaU4ktjxtujkAwh58iIaXthpGz>



F.1. ábra: A numerikus modell eredményei a mérési függvényekben

A Winriverből kimentett .txt fájlok sebesség vektormezővé alakítása:

```

clear; clc

n = '000'           % Ide kell bírni az aktuális winriveres txt sorszámát

fileID = load(['gps-es_' num2str(n) '_ASC.txt']);
dt = 0.98; %[s]
N = length(fileID(:,1));
BT_East_displacement = fileID(:,1);
BT_North_displacement = fileID(:,2);
GPS_East_displacement = fileID(:,3);
GPS_North_displacement = fileID(:,4);
Latitude = fileID(:,5);
Longitude = fileID(:,6);

for i=1:N-1
    BT_v(i) = sqrt((BT_East_displacement(i+1)-
BT_East_displacement(i))^2+(BT_North_displacement(i+1)-BT_North_displacement(i))^2)/dt;
    GPS_v(i) = sqrt((GPS_East_displacement(i+1)-
GPS_East_displacement(i))^2+(GPS_North_displacement(i+1)-GPS_North_displacement(i))^2)/dt;
end

B = 1/8*ones(8,1);           % Mozgóátlag beállítása
BT_filt = filter(B,1,BT_v);
GPS_filt = filter(B,1,GPS_v);

V_sed = GPS_v-BT_v;
V_sed_filt = GPS_filt-BT_filt; %!!!
sigma_sed = std(V_sed_filt);

M = [V_sed' Latitude(1:end-1) Longitude(1:end-1) BT_North_displacement(1:end-1)
BT_East_displacement(1:end-1) GPS_North_displacement(1:end-1) GPS_East_displacement(1:end-1)]
mean(V_sed_filt(1:end))

figure(1)
plot(V_sed(1:end), 'r')
hold on
plot(V_sed_filt(1:end), 'k')

%figure(2)
%plot(BT_East_displacement,BT_North_displacement, 'r')
%hold on
%plot(GPS_East_displacement,GPS_North_displacement, 'k')
%legend('Bottom tracking', 'GPS')

save(['Eredmenyek' num2str(n) '.txt'], 'M', '-ascii', '-double', '-tabs')

```

A vektormezőből a megfelelő elemek leválogatása és szűrése:

```

clear; clc
numfiles = 4;

%Meresi pont korrekció
Korrekcio = 0           % ÁTÍRANDÓ! Opcionális
Eredeti_meresi_pont = [28 64 91 123 152]; % ÁTÍRANDÓ!
Meres_pont = Eredeti_meresi_pont-Korrekcio
V = 1           % Mérés pont kiválasztása  ÁTÍRANDÓ!!
S = 5           % Mérés sugár
mydata = cell(1, numfiles+1);
for k = 1:numfiles+1
    myfilename = sprintf('Eredmenyek00%d.txt', k-1);
    mydata{k} = importdata(myfilename);
end

%% Koordinátás számítás modul
for j = 1:5
    N(j) = length(mydata{j}(:,1));
    Modusz_Latitude(j) = mode(mydata{j}(:,2));
    Modusz_Long(j) = mode(mydata{j}(:,3));
end

```

```

for i=1:N(j)                % A hibás GPS adatokat semlegesíti
    if mydata{j}(i,2)<0
        mydata{j}(i,2) = Modusz_Latitude(j);
    end
    if mydata{j}(i,3)<0
        mydata{j}(i,3) = Modusz_Long(j);
    end
end

max_L(j) = max(mydata{j}(:,2));
min_L(j) = min(mydata{j}(:,2));
result_max(j) = find(mydata{j}(:,2)==max_L(j),1);
result_min(j) = find(mydata{j}(:,2)==min_L(j),1);
Felső_eszak(j) = mydata{j}(result_max(j),2);
Also_eszak(j) = mydata{j}(result_min(j),2);
Felső_kelet(j) = mydata{j}(result_max(j),3);
Also_kelet(j) = mydata{j}(result_min(j),3);
Tavolsag(j) = sqrt(((Felső_eszak(j)-Also_eszak(j))*100000)^2...
+((Felső_kelet(j)-Also_kelet(j))*100000)^2); % Ellenőrzésre
end

Balpart = [mean(Felső_eszak) mean(Felső_kelet)]; %Ny-K folyásirány miatt
Jobbpart = [mean(Also_eszak) mean(Also_kelet)];

for j=1:5                % Kinullázza a nem megfelelő távolságban lévő értékeket
    for k = 1:N(j)
        tav(k,j) = sqrt(((Balpart(1)-mydata{j}(k,2))*100000)^2+(((Balpart(2)-
mydata{j}(k,3))*100000)^2));
        if abs(tav(k,j) - Meres_pont(V)) > S
            tav(k,j) = 0;
        end
    end
end

%% Elmozdulást használó modul
for j = 1:5
    N(j) = length(mydata{j}(:,1));
    max_disp_North(j) = max(abs(mydata{j}(:,6)));
    result_max_disp_N(j) = find(abs(mydata{j}(:,6))==max_disp_North(j),1);
    Disp_N(j) = mydata{j}(result_max_disp_N(j),6);
    Disp_E(j) = mydata{j}(result_max_disp_N(j),7);
    Tavolsag_DISP(j) = sqrt(Disp_N(j)^2+Disp_E(j)^2);
end

for j=1:5                % Kinullázza a nem megfelelő távolságban lévő értékeket
    for k = 1:N(j)
        tav(k,j) = sqrt(mydata{j}(k,6)^2+mydata{j}(k,7)^2);

        if abs(tav(k,j) - Meres_pont(V)) > S
            tav(k,j) = 0;
        end
    end
end

%% Számítási modul
[row,col] = find(tav);                % Megkeresi a nem nulla értékek indexszét
INDEX = [row col];                    % Indexek
for i = 1:length(INDEX);
    p = INDEX(i,2);
    u = INDEX(i,1);
    sebesseg(i) = mydata{p}(u,1);      % Kigyűjti a megfelelő tartományon mebüli sebességeket
    seb(i) = mydata{p}(u,1);          % Valódi, nem lesz törlés
    if sebesseg(i)<0
        sebesseg(i)=0;                % Szűrő első fele
    end
end
end

Atlagos_meder_sebesseg = mean(seb);
Atlagos_korr_meder_sebesseg = mean(sebesseg);
A = sum((seb-Atlagos_meder_sebesseg).^2); % Szűrőparaméter
A_korr = sum((sebesseg-Atlagos_korr_meder_sebesseg).^2);
T = 3*(1/(length(seb)-1))*A;          % Szűrőparaméter
T_korr = 3*(1/(length(sebesseg)-1))*A_korr;

```

```
for u = 1:length(sebesseg)      % Szűrő második fele
    if sebesseg(u) > A+T        % Magas értékek levágása
        sebesseg(u)=0;
    end
end
Sorba = sort(sebesseg, 'descend');
for l = 1:length(sebesseg)
    if Sorba(l) > 0            % Az átlagolásához csak a pozitív
        vegso_sebesseg(l) = Sorba(l); % értékek kigyűjtése
    else
        break
    end
end

ATLAGOS_SEBESSEG = mean(vegso_sebesseg)
```