



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia 2015

Lebegtetett hordaléktranszport terepi és számítógépes
vizsgálata

Készítette: Kutai Rebeka Debóra

Konzulensek: Dr. Baranya Sándor

Török Gergely Tihamér

Tartalom

1. Bevezetés.....	3
2. Mérési időszak.....	4
2.1. Vízállás idősor.....	4
2.2. Vízhozam idősor.....	4
3. Mérések és eredményeik.....	5
3.1. Expedíciós mérés és helyszíne.....	5
3.2. Laboratóriumi feldolgozás.....	6
3.2.1. Teljes lebegtetett hordalékmennyiség (TSM) meghatározásának lépései.....	7
3.2.2. Szilárdanyag tartalom (SSC) meghatározásának lépései.....	7
3.3. Expedíciós mérés eredményei.....	7
3.3.1. Sebesség eloszlása a keresztaszvényméntén.....	8
3.3.2. SSC eloszlása a keresztaszvényméntén.....	9
3.3.3. Fajlagos hordalékhozam eloszlás a keresztaszvényméntén.....	9
3.3.4. Vízhozam és hordalékhozam közötti kapcsolat.....	10
3.3.5. Part menti SSC és teljes szelvényen átáramló hordalékhozam közötti összefüggés.....	11
4. Hordaléktranszport elméleti leírása.....	12
4.1. Advekción.....	12
4.2. Diffúzió.....	12
4.3. Turbulens diffúzió.....	13
5. Alkalmazott numerikus modell: SSIIM.....	13
5.1. Áramlási modell.....	13
5.2. Hordaléktranszport modell.....	15
6. SSIIM modell eredménye.....	16
7. Összefoglalás.....	20
8. Következtetések.....	21
9. Köszönetnyilvánítás.....	22
10. Hivatkozások.....	23

1. Bevezetés

A dolgozat célja a közelmúltban a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéken kidolgozott lebegtetett hordalékmonitoring eljárás továbbfejlesztése és pontosítása. A mérésre kiválasztott Dunai szelvényre vonatkozó hordalékhozam és a part mentén mért lebegtetett hordaléktöménység közötti kapcsolat megerősítése további expedíciós mérések végrehajtását igényli. A TDK kutatás során ezért terepi hordalékméréseket hajtunk végre és a hozzájuk kapcsolódó laboratóriumi elemzések kerültek elvégzésre. Utóbbiakat az elmúlt évben kialakított saját laboratóriumi környezetben kerültek megvalósításra. A saját laboratórium kialakítása nagyban megkönnyítette a munkámat, hiszen a költséghatékony mintaelemzés lehetővé tette az elemzett minták számának jelentős növelését. A saját labor kidolgozása jelentős előrelépést jelent a jelen kutatáson túl, a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéken végzett lebegtetett hordalék vizsgálatokban is.

A méréseket továbbra is a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem előtt található úszóművön (Zöld Sziget), valamint az általa meghatározott keresztshelvényben lettek elvégezve a Dunán. Az előző kutatásokhoz hasonlóan, a keresztshelvény menti hordalékhozam meghatározásához mozgó-, és állóhajós ADCP méréseket hajtunk végre. Ezen expedíciós mérések során a Duna öt általunk meghatározott függélyének öt-öt pontjából vett vízmintákon veszünk vízmintát melyek elemzésével, valamint az ADCP mérések eredményeivel meg tudjuk tudtam határozni a teljes hordaléktöménység eloszlást a vizsgált keresztshelvény mentén.

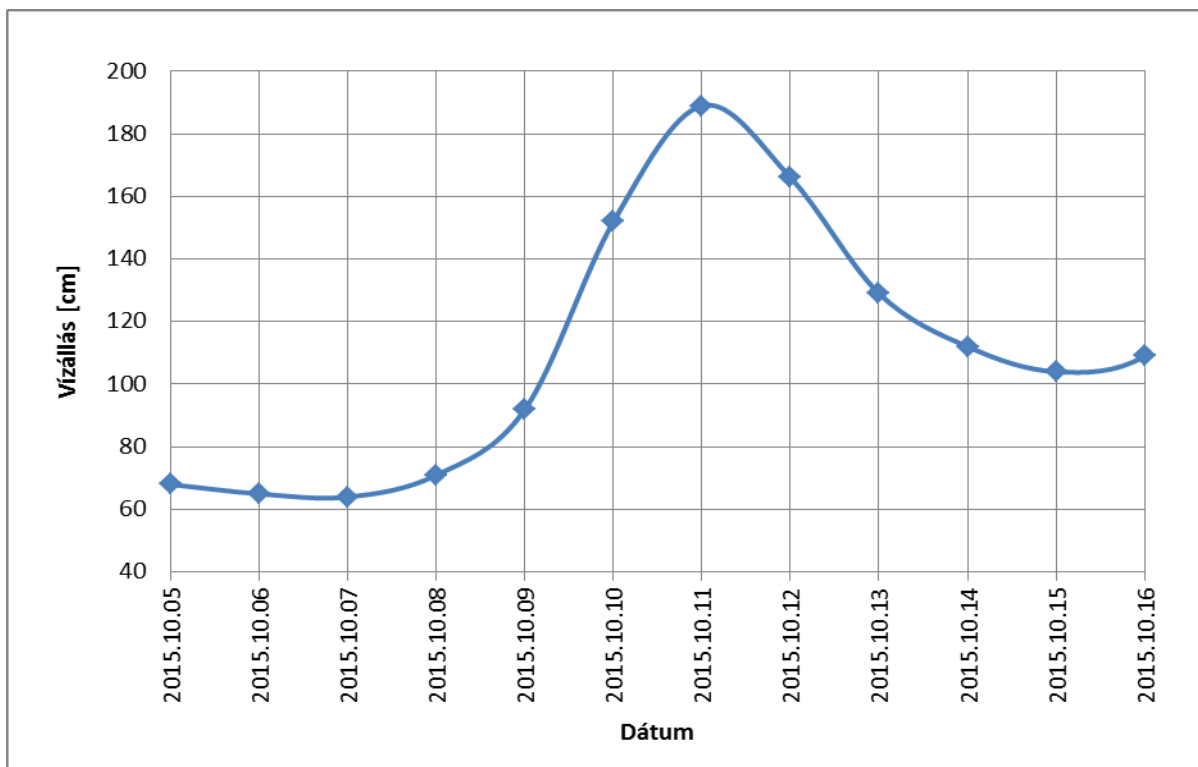
A korábbi vizsgálataim rámutattak a lebegtetett hordalék vizsgált shelvény menti jellemző egyenlőtlen eloszlására is, ami következetesen magasabb töménységet jelzett a Duna bal partja közelében. Dolgozatomban egy 3D numerikus áramlás- és hordaléktranszport modell segítségével vizsgálom ennek a jelenségnek a lehetséges magyarázatát. Ezzel célom egy olyan vizsgálat bemutatása volt, ami rámutat, a pusztán mérés alapú vizsgálatok numerikus modellezéssel való kiegészítésének szükségességére. Dolgozatomban rámutatok a hordalék monitoring eljárás numerikus modellel való kiterjesztésének létjogosultságára, illetve a modell igazolásához szükséges vizsgálatokra.

2. Mérési időszak

A kutatáshoz kapcsolódó méréseket 2015. október 5. és 16. között kerültek elvégzésre: 2 expedíciós mérés valamint a laborelemzés.

2.1. Vízállás idősor

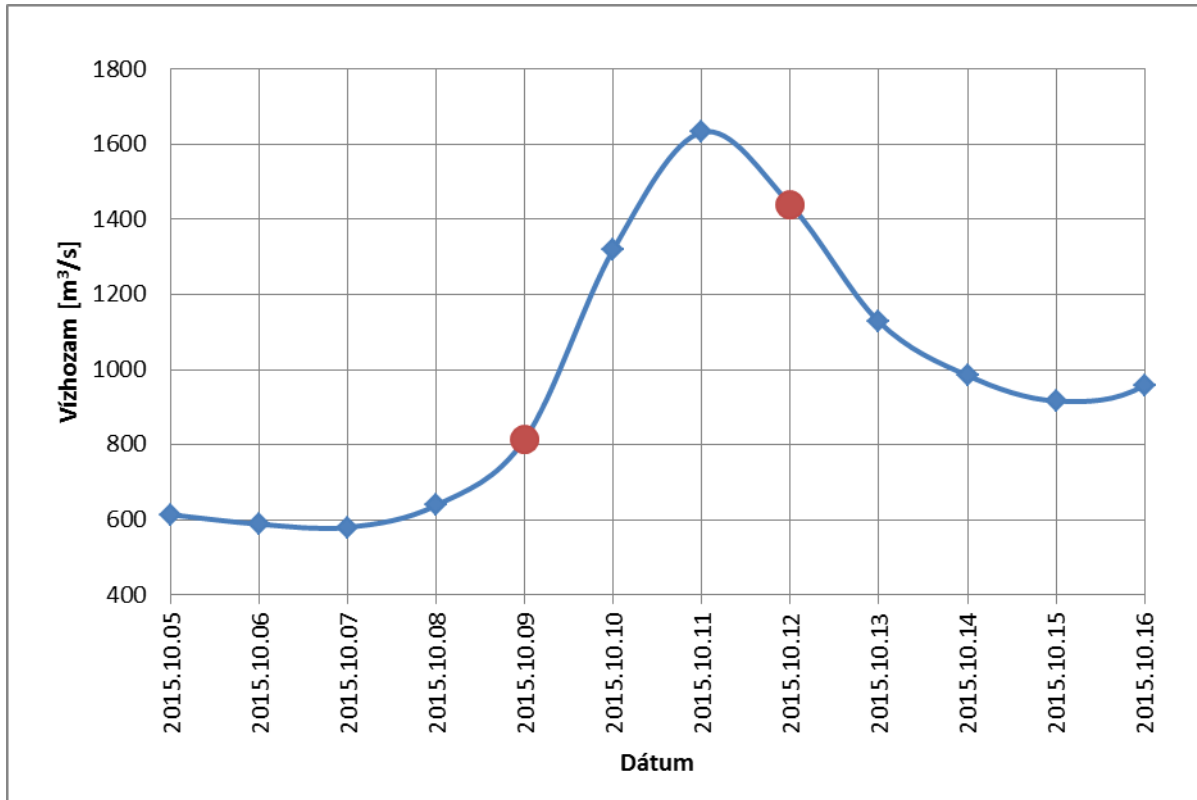
A vízállási adatokat a budapesti vízmérce alapján vettem fel, ahol a Duna 1646,5 fkm-énél található a '0' pontjának jelenlegi magassága 94,98 mBf. A teljes mérési időszak alatt egy kisebb árhullám érkezett. 2015. október 11-én 189 cm-es állással tetőzött Budapesten ezt is mutatja az **1. ábra**.



1. ábra: vízállás idősor

2.2. Vízhozam idősor

A mérési időszakra az egyes napokhoz tartozó vízhozam értékeket a rendelkezésemre álló vízállás idősorból készítettem el a korábbi kutatásban (Kutai, 2014) felállított Q-H görbe alapján. Az alábbi regressziós egyenes egyenletével kaptam meg a vízhozam értékeket: $Q=8,4204 \cdot H+40,988$. A **2. ábrán** szintén megfigyelhető az egy kisebb árhullám levonulása, amely $1650 \text{ m}^3/\text{s}$ -mal tetőzött Budapesten. A két piros pont az expedíciós mérések időpontjait jelölik.



2. ábra: vízhozam idősor

3. Mérések és eredményeik

3.1. Expedíciós mérés és helyszíne

A mostani kutatás során két alkalommal hajtottunk végre expedíciós mérést az árhullám áradó ágában 2015. október 9-én, valamint tetőzés után egy nappal 2015. október 12-én.

Mérés helyszíne idén szintén a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem előtt található keresztaszvénny, amely magában foglalja az ún. Zöld Sziget úszóművet (**3. ábra**). Itt 5 függélyben hajtottunk végre ADCP méréseket. Az 5 függély 5-5 pontjában vízmintákat is vettünk a mérés során, melyeket később a saját laboratóriumunkban elemeztem. A mozgóhajós ADCP méréssel adott szelvénymenti sebességeloszlásokat és visszavert jelerősség eloszlást kaptam.

A korábbi mérési eljárástól eltérve most gyorsmintavevőt alkalmaztunk a vízminták vételéhez. A műszer működési elvét korábbi TDK dolgozatomban ismerttettem (Kutai, 2014).



3. ábra: mérési helyszín (Kutai, 2014)

3.2. Laboratóriumi feldolgozás

Az expedíciós mérés során vett vízminták laboratóriumi elemzése az előző évben kialakított saját laboratóriumi környezetben (4. ábra) történt. Ez elősegíti, hogy minél több mintát tudjak elemezni alacsony költség mellett.



4. ábra: saját laboratóriumi környezet

3.2.1. Teljes lebegtetett hordalékmennyiség (TSM) meghatározásának lépései

- A szárítószekrényben 105°C-on 4 órán keresztül tömegállandóságig szárítom az üres tégelyeket.
- Analitikai mérleg segítségével lemérem a kiszárított tégelyek tömegét.
- Minden vízmintából kimérek 40ml-t az egyes tégelyekbe.
- A tégelyeket újra a szárítószekrénybe helyezem 105°C-ra 24 órán keresztül.
- Analitikai mérleggel lemérem a tégely és a benne található teljes lebegtetett hordalék tömegét.
- Végül megkapom a két mért érték különbségéből a 40ml-ben található teljes lebegtetett hordalék mennyiségét, amelyből meghatározom a minta mg/l-es TSM értéket.

3.2.2. Szilárdanyag tartalom (SSC) meghatározásának lépései

- A szárítószekrényben 105°C-on 2 órán keresztül tömegállandóságig szárítom szűrőpapírokat.
- Analitikai mérleg segítségével lemérem a kiszárított papírok tömegét.
- Minden vízmintából 50ml-t átszűrök a fecskendőszűrő segítségével.
- A papírokat újra a szárítószekrénybe helyezem 105°C-ra 4 órán keresztül.
- Analitikai mérleggel lemérem a szűrőpapír és a rajt található szilárdanyag tartalom tömegét.
- Végül megkapom a két mért érték különbségéből az 50ml-ben található szilárdanyag tartalmát, amelyből meghatározom a minta mg/l-es SSC értéket.

3.3. Expedíciós mérés eredményei

ADCP mérésnél a visszavert hangjel-erősség értékéből valamint a laborelemzésből kalibráció során lebegtetett hordaléktöménység adatokat tudtam meghatározni. A kalibrációt az állóhajós mérések függéyeinek öt pontjában vett vízminta lebegőanyag tartalmát és a hozzá tartozó, ADCP visszavert jelerősség pontpárokat használtam fel. A mozgóhajós, szelvény menti mérésekből származó visszavert jelerősség eloszlásból szelvény menti hordaléktöménység eloszlás a kalibrációs összefüggés segítségével számítható.

A mozgóhajós mérés során sebességeloszlás adatokat kaptam meg a teljes keresztaszelvény mentén. A szelvény menti hordaléktöménység és vízsebesség összetartozó értékeinek szorzata az adott cella fajlagos hordalékhozamát adja. A fajlagos értékek szelvény menti integrálásával a teljes lebegtetett hordalékhozamot lehet megállapítani.

Az adatok feldolgozását Baranya és Józsa által publikált cikkben ismertetett eljárás alapján végeztem el (Baranya és Józsa, 2010).

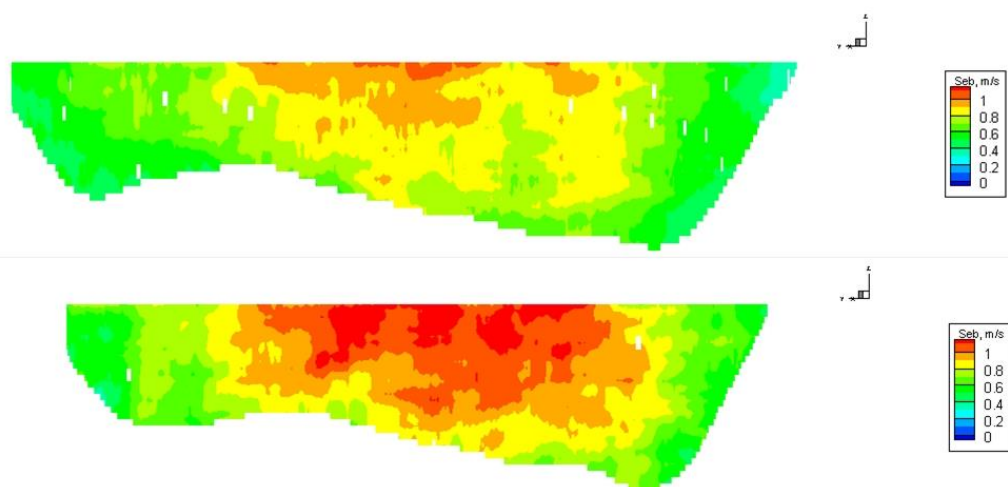
Az alábbi táblázatban a két expedíciós mérés vízhozam értékei láthatóak:

1. táblázat: expedíciós mérések vízhozam értékei

dátum	vízhozam [m ³ /s]
2015.10.09.	1200
2015.10.12.	1560

3.3.1. Sebesség eloszlása a keresztaszelvény mentén

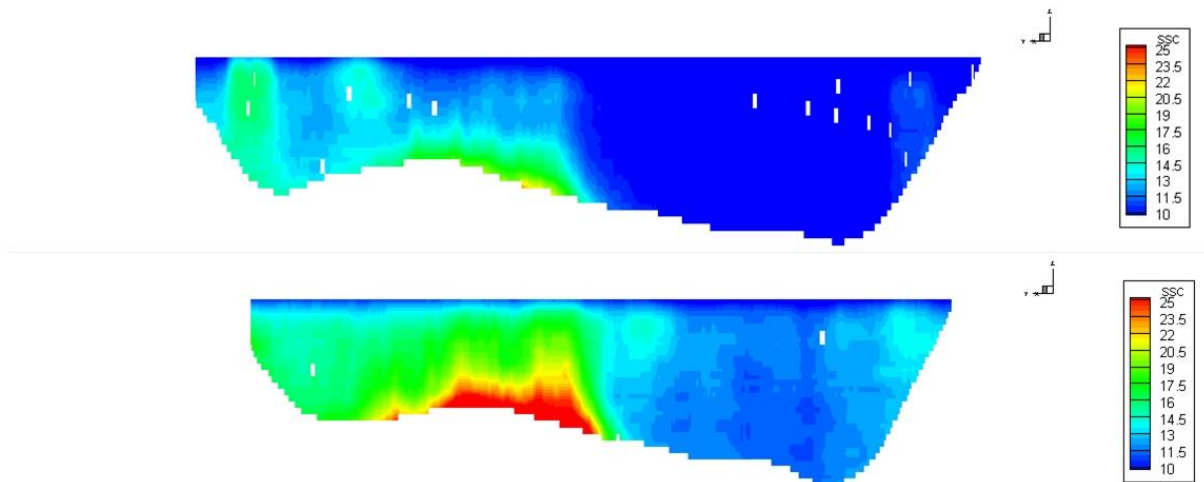
A mozgóhajós ADCP mérés adatainak feldolgozása után a sebességértékeket kapjuk meg az egyes cellákra, amelyek szelvény menti teljes eloszlását az **5. ábrán** láthatjuk. Itt is megfigyelhető, mint az előző kutatás (Kutai, 2014) során, hogy a sodorvonal mentén legmagasabbak a sebesség értékek. Továbbá észrevehető, hogy a Duna két partjánál mért sebesség értékek különbsége minimális. A sebesség eloszlás segítségével határoztam meg később a fajlagos hordalékhozam eloszlását a keresztaszelvény mentén.



5. ábra: sebesség eloszlása a keresztaszelvény mentén

3.3.2. SSC eloszlása a keresztmetszvény mentén

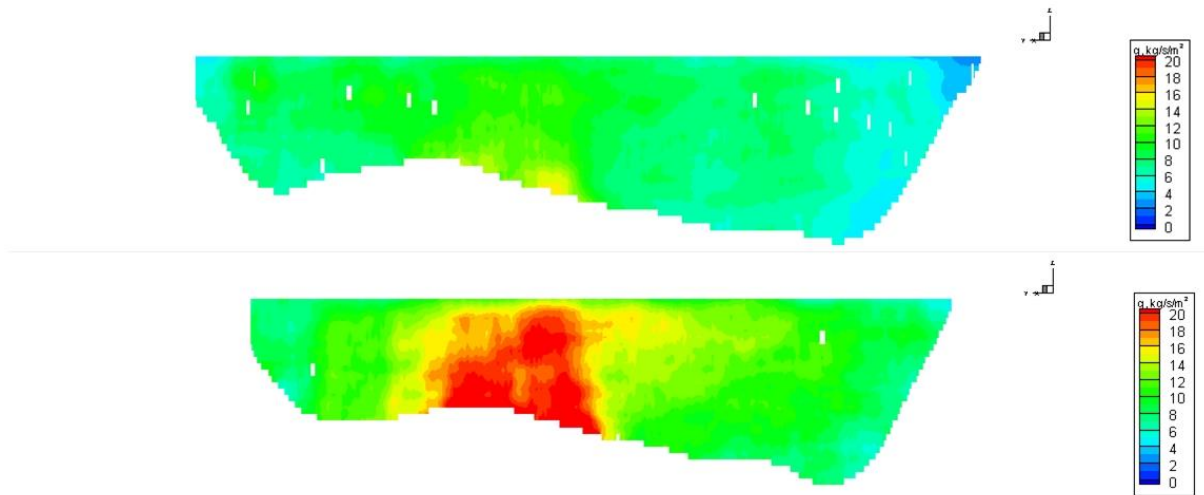
Az SSC eloszlását kalibráció során tudtam meghatározni a laborelemzésekből kapott SSC értékek valamint az állóhajós ADCP mérésből nyert visszavert jelerősség adatok alapján. Így minden cellához egy SSC értéket tudtam rendelni a teljes keresztmetszvényben. Ez eredményezte az SSC eloszlását a teljes vizsgált keresztmetszvény mentén, amely a **6. ábrán** látható. Látható, mint az előző kutatás (Kutai, 2014) során, hogy az SSC értéke a Duna bal partja közelében magasabb.



6. ábra: SSC eloszlása a keresztmetszvény mentén

3.3.3. Fajlagos hordalékhozam eloszlás a keresztmetszvény mentén

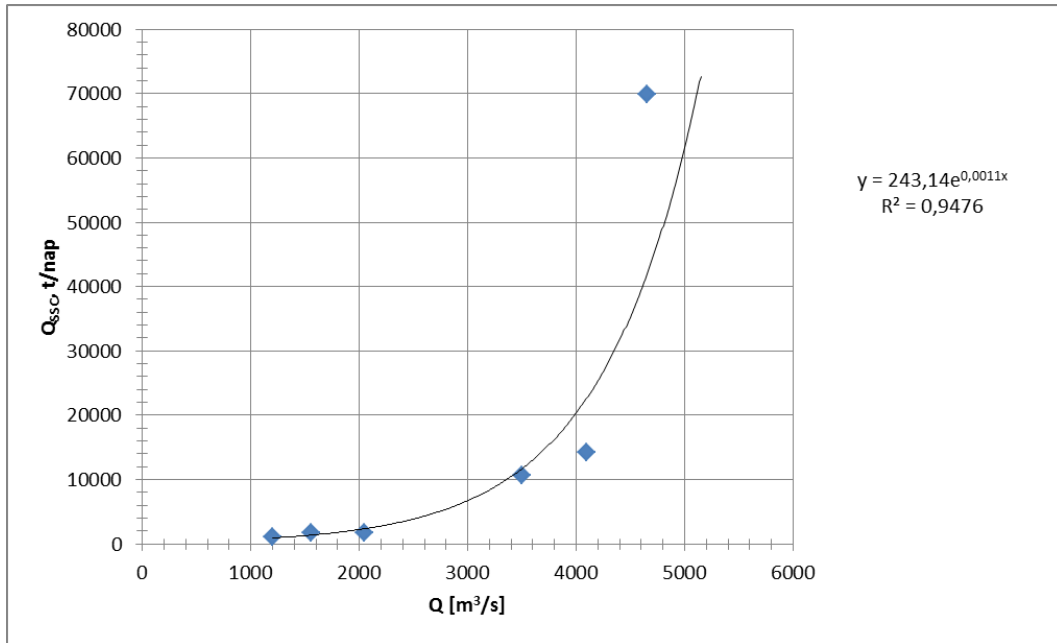
Fajlagos hordalékhozam eloszlást az előzőekben meghatározott sebesség valamint SSC eloszlás összeszorzásából kaphatunk meg melyet a **7. ábrán** láthatunk. Itt megfigyelhető a Duna bal partjánál a magasabb fajlagos hordalékhozam értékek. Az egyes cellák értékeit összegezve kapjuk eredményül a teljes keresztmetszvényen átáramló hordalékhozamot, amit később a vízhozammal és a parti menti SSC értékkel párosítva ábrázoltam 2 grafikonon (**8. és 9. ábra**).



7. ábra: fajlagos hordalékhozam eloszlása a keresztmetszvény mentén

3.3.4. Vízhhozam és hordalékhozam közötti kapcsolat

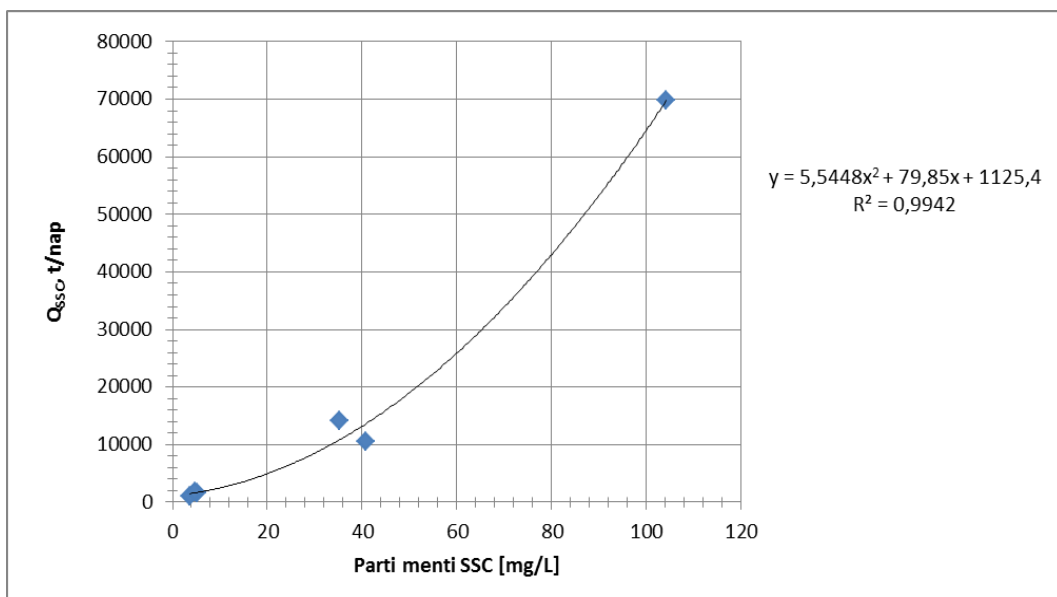
A **8. ábrán** az előzőek alapján meghatározott hordalékhozam látható a aktuális vízhozam értékek függvényében. Ezzel a két méréssel további két értékpárt tudtam felvenni a korábbi kutatás (Kutai, 2014) során ábrázolt grafikonon. Így már kis vízi állapotban is vannak mérési eredményeink. A pontokra illesztett függvény segítségével látható, hogy a hordalékhozam vízhozamtól exponenciális jelleggel függ. A megbízhatóbb kapcsolat felállításához nagyvízi állapotokban kellene további expedíciós méréseket végrehajtani. Megfigyelhető, hogy 2000 m³/s vízhozam érték alatt aránylag azonosak a hordalékhozam értékek, amely egy alapterhelésre utalhat.



8. ábra: vízhozam és hordalékhozam kapcsolata

3.3.5. Part menti SSC és teljes szelvényen átáramló hordalékhozam közötti összefüggés

A fajlagos hordalékhozam eloszlás alapján megállapított teljes keresztmetszvényen átáramló hordalékhozam mennyiségét vizsgáltam a part menti SSC függvényében (9. ábra). A korábbi kutatás (Kutai, 2014) során felállított másodfokú kapcsolatot újabb két értékpárral tudtam megbízhatóbbá tenni.



9. ábra: part menti SSC és a hordalékhozam kapcsolata

4. Hordaléktranszport elméleti leírása

Az **1. egyenlet** szerint a koncentráció megváltozása, azaz az elkeveredés két eltérő folyamat eredménye: advekció és diffúzió.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(v_x c)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y c)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z c)}{\partial z} - D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

t – idő [s]

c – koncentráció

x,y,z – hossz, kereszt és függőleges irányú koordináták [m]

v_x, v_y, v_z áramlási sebességek [m/s]

D_i – diffúziós tényező

4.1. Advekció

Az advekciót jellemzi, hogy az anyagot tartalmazó térrész bizonyos külső behatásra „v” sebességgel elmozdul, és viszi magával az anyagot a komponenseivel, és a hozzá kötött extenzív mennyiséget (hő, mozgásmennyiség). Az áramlási sebességtől függően az eltérő koncentráció értékkel jellemzett részecskék egymáshoz viszonyítva különböző mértékben mozdulnak el.

4.2. Diffúzió

A diffúziót nem külső hatás hozza létre, hanem a fázis inhomogén volta. A diffúzió két alapvető tulajdonsága van: az egyik, hogy véletlenszerű a természete, a másik pedig, hogy addig indukál transzportfolyamatot a magasabb koncentrációjú helyről az alacsonyabb koncentrációjú hely felé, amíg el nem érjük az egyensúlyi állapotnak megfelelő koncentráció-megoszlást. Fick I. törvénye (**2. - 4. egyenlet**) kimondja, hogy az anyagáram sűrűsége a koncentrációváltozással azonos, ahol az arányossági tényező a diffúziós együttható.

$$J_x = -D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$J_y = -D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (3)$$

$$J_z = -D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (4)$$

J_i – anyagáram sűrűség

D_i – diffúziós együttható (hely- és irányfüggő)

c – koncentráció

4.3. Turbulens diffúzió

Ha a folyadékban, gázokban turbulens áramlás lép fel a részecskék a sebesség kaotikus pulzációja nyomán és a koncentráció ingadozása révén átkeverednek. Matematikailag diffúziós folyamatként kezelendő.

5. Alkalmazott numerikus modell: SSIIM

TDK kutatásom során az SSIIM (Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option) nevű numerikus modellt használtam. Nils Reidar Olsen, a Norwegian University of Science and Technology professzora fejlesztette ki a programot. A modell segítségével lehetőségünk van 3D turbulens áramlás, valamint lebegtetett és görgetett hordaléktranszport szimulációjára. Az alkalmazott numerikus modell két részből tevődik össze (Olsen, 2014):

5.1. Áramlási modell

A hidrodinamikai jellemzőket a Navier-Stokes egyenletek Reynolds-átlagolt alakjának közelítő megoldásával (RANS) számítja. A víz mozgásának egy végtelen kicsi térfogatára az impulzus-megmaradás törvényét írják le az egyenletek.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad (5)$$

P – nyomás

δ_{ij} – Kronecker delta ($\delta_{ij}=1$ ha $i=j$, egyébként $\delta_{ij}=0$)

U – időátlagolt sebesség

t – idő

x – Descartes-féle térkoordináta

ρ – víz sűrűsége

u – pillanatnyi sebesség

A Reynolds- egyenletek három egymásra merőlegesen felírt impulzusegyenlet jelent, amelyek négy ismeretlent tartalmaznak: sebesség háromirányú komponense, nyomás. Az egyértelmű megoldhatóságához szükség van egy negyedik egyenletre (**6. egyenlet**), melyet a térfogat-megmaradás törvényéből kapunk.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

A modell a turbulens elkeveredés, Reynolds-feszültség számítására a Boussinesq-közelítést használja (**7. egyenlet**).

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \rho \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (7)$$

k – turbulens kinetikus energia

ν_T – turbulens örvény viszkozitási együttható

Ezek után a Navier-Stokes egyenletek az alábbiak:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[- \left(P + \frac{2}{3} k \right) \delta_{ij} + \rho \nu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \nu_T \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (8)$$

Az egyenlet bal oldala a lokális és advektív gyorsulást írja le, a jobb oldalon pedig a nyomás és a kinetikus energia térbeli megváltozását leíró részek, valamint a impulzusediffúziót és feszültséget becsülő tagok. A Navier-Stokes egyenletekben a normál- és nyírófeszültségek a turbulens áramlásban kialakuló örvények mozgási energiáját és annak disszipációját jelentik. Az áramlás hordalékmozgató jellegét legfőképpen az energiatartalom és vesztesége határozza meg ezért modellezés szempontjából fontos a megbízható becslésük. A Reynoldsféle nyírófeszültséget az előzőekben ismertetett Boussinesq-közelítéssel határozza meg a modell.

A modell az örvényviszkozitás meghatározására a k-ε modellt alkalmazza.

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

C_μ - konstans ($C_\mu=0,09$)

A k és ε értékei az alábbi transzportegyenlet alapján számíthatóak ki:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (10)$$

P_k – turbulens kinetikai energia termelődése

ε – turbulens kinetikai energiái disszipációs rátája

A P_k és ε értékét az alábbi összefüggésekből számíthatóak:

$$P_k = v_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (12)$$

$C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε – konstans ($C_{\varepsilon 1}=1,44$; $C_{\varepsilon 2}=1,92$; $\sigma_k=1,0$; $\sigma_\varepsilon=1,3$)

Az egyenletekből látható, hogy a k-ε modellben az örvényviszkozitás az irányok mentén nem változik, tehát izotróp turbulenciát feltételez, ezért a modell alkalmazásának az izotrópia érvényessége szabhat határt.

A modell numerikus stabilitási problémákba ütközhet az áramló folyadékot határoló falak mentén a sebesség hirtelen és nagymértékű megváltozása miatt. Így a falak környezetében nem az eddig ismertett alapegyenleteket, hanem a faltörvény összefüggésével számol a modell.

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30y}{k_s} \right) \quad (13)$$

U – mederrel lokálisan párhuzamos sebesség

u_* - fenék-csúsztatófeszültség

κ – Kármán-féle állandó ($\kappa=0,4$)

y – a mederfelszíntől mért merőleges távolság

k_s – Nikuradze-féle érdességmagasság (mederanyag szemösszetételére jellemző)

5.2. Hordaléktranszport modell

A vízfolyásokban a hordaléktranszport két részből tevődik össze: vízoszlop mentén teljes átkeveredett lebegtetett- és a meder közelében végbemenő görgetett hordalékmozgás. A hordalékmozgás fajtáját az adott szemcse mérete és a víz turbulenciája határozza meg.

A lebegtetett hordalék koncentrációját leíró transzportegyenlet a következő:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) + S \quad (14)$$

c – koncentráció

w – ülepedési sebesség

Γ_T – turbulens diffúziós együttható

S – forrástag (a mederfenékről felkevert, vagy kiülepedett hordalék hozama)

A turbulens diffúziós együttható az alábbi hányadosból kaphatjuk:

$$\Gamma_T = \frac{v_T}{S_c} \quad (15)$$

S_c –Schmidt szám (alapbeállítása 1 vagyis a turbulens impulzus- és az anyagátvitel együtthatója megegyezik)

A mederfenék közeli cellákban az esetleges mederanyag felkeveredés vagy a szállított hordalék kiülepedésének becslésére egyensúlyi koncentráció **(16. egyenlet)** került meghatározásra.

$$c_{bed} = 0,015 \frac{d^{0,3}}{a} \frac{\left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c}\right)^{1,5}}{\left[\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2}\right]^{0,1}} \quad (16)$$

c_{bed} – mederfenék közeli egyensúlyi koncentráció

a – érdességmagasság

τ_c – kritikus csúsztatófeszültség

ρ_s – hordalék testsűrűsége

ρ_w – víz testsűrűsége

d – számított frakció jellemző szemcseátmérője

u – víz kinematikai viszkozitása

6. SSIIM modell eredménye

Mind hidrológiai, mind hordalék-mennyiségi adatokra egyaránt szükség van vizeink morfológiai vizsgálatához. Jelenleg a lebegtetett hordaléktranszport jellemzőinek meghatározása elég költséges és összetett folyamat. Ez jelentősen hátráltatja a szükséges mennyiségű és minőségű adatszolgáltatást. Gyakorlatban ez a korszerű berendezések

megbízható kalibrálását (amely előrelépést jelentene), valamint hordaléktranszport modellek megfelelő paraméterezését jelentősen hátráltatja. A lebegtetett hordalékmonitoring rendszer továbbfejlesztésének egy fontos pontja annak a modellezéssel való kiterjesztése. Ezzel egyidejűleg a terepi mérések további végrehajtása és az összefüggések megbízhatóbbá tétele a cél. Ezek az eredmények a modellezés igazolásához és validálásához is szükségesek.

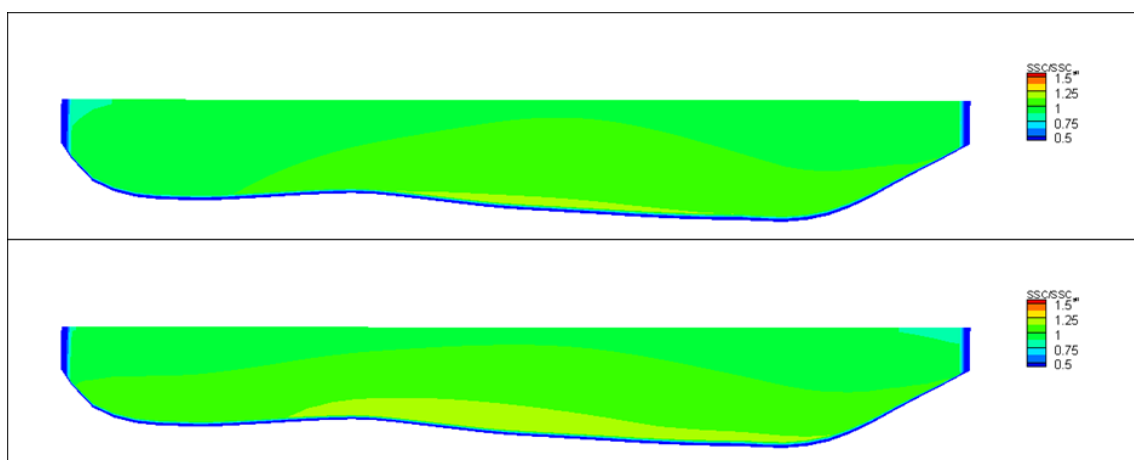
Fontos dolog a modellezés során, hogy az áramlási modell pontosan számoljon. Ehhez terepi áramlásmérések szükségesek, melyek jelene esetben nem álltak rendelkezésemre. Jelen kutatás során csak a vizsgált keresztmetszvénymenti SSC eloszlást tudtam vizsgálni.

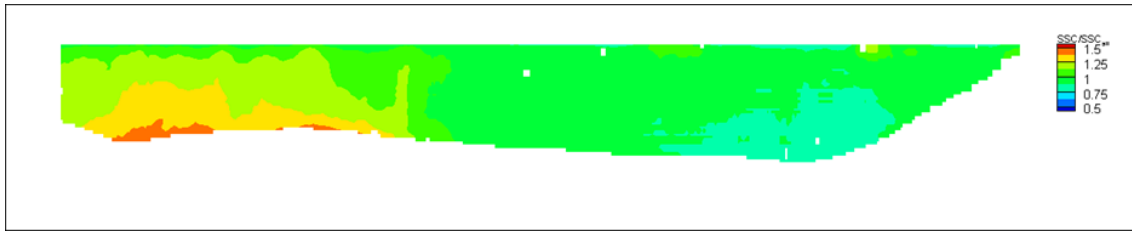
Az áramlási modell egyik legfontosabb pontja a megfelelő mederérdesség (k_s) felvétele. A modellezés során ezt az értéket 6mm-re vettem fel, egy korábbi tanszéki kutatás alapján, amely során ez az érték a Duna bal parti szakaszának modellezésénél igazolva lett.

Érdeemes továbbá megvizsgálni az alkalmazott séma megválasztását is a modellezés során. Az első- és másodrendű séma által eredményezett eloszlást vizsgáltam meg.

Az alapvető különbség az első és másodrendű séma között, hogy az előbbi egy stabil, de kevésbé pontos az utóbbi pedig áramlási megoldás szempontjából pontosabb, de instabilabb megoldást eredményez. A módszerek részletes leírását Olsen (2014) kézikönyve tartalmazza.

A **10. ábrán** a két séma valamint az ADCP-s mérésből kapott szelvény menti fajlagos hordalékhozam eloszlása látható.





10. ábra: első- és másodrendű séma valamint az ADCP mérés eredményei

Megfigyelhető, hogy a másodrendű séma tényleg jobb eredményt ad, hiszen a maximális koncentráció értéke a Duna bal partja felé tolódik el. Azonban nem ad meggyőző eredményt a modell, így a további finomítására lesz szükség. Ezzel a jelenlegi kutatás során nem foglalkoztam, de az alábbi vizsgálatokra van szükség:

Schmidt-szám vizsgálata: Alapbeállításban a Schmidt-szám értéke 1, ami a turbulens impulzus- és az anyagátvitel együtthatójának egyenlőségét jelenti (**15. egyenlet**). Az érték változtatásának részletes vizsgálata fontos, hogy pontos eredményt kapjunk a modellezés során.

A vizsgálat során definiálni kell a hordalékot, vagyis frakciók segítségével kell leírni. A modellezés során ennek érzékenysége vizsgálatára van szükség.

Valószínű a modell peremfeltételének pontos megadása is jelentősen befolyásolja az eredményeket. Jelen esetben a befolyási peremen a hordalékkoncentráció lett megadva. Vizsgálandó, hogy a Margit-sziget két ágában eltérő-e a hordalékeloszlás és ez befolyásolja-e a vizsgált szelvényünkénél az értékeket. Különböző eloszlás esetén pontosan kell megadni a két ág hordalékkoncentrációját vagy a befolyási perem helyét kell megváltoztatni a megbízhatóbb modell elérése miatt.

Látható, hogy a modell további pontosításával és különböző vizsgálatok segítségével kapunk megbízható, pontos eredményeket.

A hordalék elkeveredésének hossza (x) számítható az alábbi egyenlet alapján (Clement, 2007):

$$x = 0,027 \frac{D_y}{v_x} B^2 = 0,027 \frac{0,07}{1} 300^2 = 170,1m$$

v_x – folyásirányú szelvény középsebessége

B – meder szélessége

D_y – keresztirányú diszperziós tényező

$$D_y = d_y R U_* = 0,2 \cdot 5 \cdot 0,07 = 0,07 \text{ m}^2/\text{s}$$

d_y – dimenzió nélküli konstans (egyenes medernél 0,15, szabálytalan mederre 0,2-0,6)

R – hidraulikus sugár $R=BH/B+2H \approx 5\text{m}$

$$U_* = \sqrt{gRS} = \sqrt{9,81 \cdot 5 \cdot 0,0001} = 0,07 \text{ m/s}$$

S – fenékesés

Ennek eredményeként látható, hogy a vizsgált keresztmetszélvénnytől 170 méterre kell minimum felvenni a befolyási szélvénnyt. Jelen esetben ez a távolság sokkal nagyobb így a befolyási perem helye megfelelő számunkra.

7. Összefoglalás

Kutatásom során a korábbi mérések folytatásával, valamint a lebegtetett hordaléktranszport számítógépes vizsgálatával foglalkoztam.

Először bemutattam a mérési időszak hidrológiai jellemzőit: vízállás és vízhozam idősor.

A következő részben az expedíciós méréssel foglalkoztam. Ismertettem a mérés helyszínét és az új saját laboratóriumi körülményt, ahol a mérés során vett mintákat elemeztem. A laboratóriumi elemzés során a TSM és SSC értékeket határoztam meg mindegy egyes mintánál. Ezek az értékek később az ADCP mérések feldolgozása során használtam fel.

Ezek után a mozgó – és állóhajós ADCP mérések elemzését és eredményeit mutattam be. Ábrázoltam a sebesség-, SSC- és fajlagos hordalékhozam eloszlásokat a vizsgált keresztmetszelen mentén. Ezekből a hordalékhozam értékeket határoztam meg, melyeket a part menti SSC valamint a vízhozam függvényében jelenítettem meg. Így a korábbiakban felállított kapcsolatot további két értékpárral tettem megbízhatóbbá.

Bemutattam a hordaléktranszport elméleti hátterét majd az SSIIM numerikus modellt is. A számítógépes vizsgálat során egy korábbi expedíciós mérés eredményeit felhasználva modelleztem a hordaléktranszport folyamatot a Duna egy szakaszán, amely tartalmazza a vizsgált keresztmetszelynt is. Ezek után a modell eredményét hasonlítottam össze a korábbi ADCP-s mérés eredményével.

8. Következtetések

A kutatás során az alábbi következtetésekre jutottam:

Kutatásom során kisvízi állapotban hajtottam végre expedíciós méréseket azonban még a megbízhatóbb kapcsolat felállításához további mérési kampányokra van szükség.

SSIIM numerikus modell segítségével egy nagyvízi állapotot modelleztem azonban ez nem meggyőző eredmény, így további pontosítás szükséges:

- Elkeveredési hossz becslés számolása után meggyőződhetünk arról, hogy a modell peremeit megfelelően vettük fel.
- Másodlagos séma segítségével jobb megoldást adott azonban nem ad meggyőző eredményt a modell. Ezek alapján a vizsgált szakaszon az áramlási viszonyok hozzájárulnak a vizsgált keresztmetszvény hordalékhozam eloszlásához.
- Schmidt-szám érzékenységvizsgálata szükséges, hogy pontos eredményt kapjunk a modellezés során, mivel alapbeállítás esetén a turbulens impulzus- és az anyagátvitel együtthatójának egyenlőségét jelenti.
- Vizsgálni szükséges a befolyási szelvényben a hordalék eloszlását, amely nagyban befolyásolhatja a vizsgált keresztmetszvényben az eredményt.

A numerikus modellezéssel az ADCP-s mérésekkel kapott eredményeket szerettem volna tovább vizsgálni. A hordalékkoncentráció maximális értéke tényleg a Duna bal partja felé tolódott el, azonban nem olyan mértékű, mint az ADCP mérések során. Ezt több dolog is befolyásolhatta:

- Valószínű a Margit-szigetnél lévő befolyási peremen nem teljesen egyenletes a hordalék eloszlása, mint amit a modellezés során használtunk.
- A vizsgált szakaszon a helyi áramlási viszonyok is befolyásolhatják a hordalék eloszlását a keresztmetszvény mentén.

Összességében további nagyszámú expedíciós mérésre van szükség a megbízhatóbb kapcsolat kialakításához. Numerikus modellezésnél pedig további pontosításra van szükség, hogy azt validálva alkalmazható legyen további vizsgálatokra.

9. Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni elsősorban konzulenseim felé. Hálásan köszönöm Dr. Baranya Sándor és Török Gergely Tihamér témavezetését, folyamatos segítségét és ötleteit.

Köszönöm Pozsgai István, Tóth Károly és Sándor Balázs mozgóhajós méréseknél nyújtott segítségeiket.

Köszönöm szépen a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéknek, hogy a méréseinkhez szükséges eszközöket rendelkezésünkre bocsátották, valamint a vizsgálatok során jelentkező költségek anyagi háttérét biztosították.

10. Hivatkozások

Baranya S., Józsa J. (2010): ADCP alkalmazása lebegtetett hordalék koncentráció becslésére

Kutai R. (2014): Pontbeli zavarosság mérésen alapuló hordalékhozam becslő eljárás implementálása a Dunára

Clement A. (2007): Vízminőség szabályozás HEFOP

Olsen N.R.B. (2014): A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with moving option (User's Manual, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway)