



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Budapest, 2018

TDK dolgozat

Lebegtetett hordalék elkeveredésének 3D numerikus modell alapú vizsgálata torkolati folyószakaszon

Szerző:

Dávid Barnabás

Konzulensek:

Dr. Baranya Sándor

Dr. Török Gergely Tihamér

Pomázi Flóra

Tartalomjegyzék

1	Ábrajegyzék	2
2	Tartalmi kivonat.....	4
3	Bevezetés.....	5
4	Dolgozat célja	7
5	A hordalékkelkeveredés problémakörével érintett vizsgálati terület bemutatása	8
6	Az elkeveredés elméleti és numerikus háttere, irodalomkutatás.....	10
6.1	Elkeveredés numerikus modellezése	10
6.1.1	Elkeveredés 1D esetben	12
6.1.2	Elkeveredés 2D esetben	13
6.1.3	Elkeveredés 3D esetben	13
6.2	Folyók találkozásához kapcsolódó korábbi 3D modellvizsgálatok	19
7	Szimulációs vizsgálatok tesztcsatornában	21
7.1	Felhasznált szoftverek ismertetése	21
7.2	Referencia modell	22
7.2.1	Eredmények értékelése	24
7.3	Numerikus modellparaméterek érzékenységvizsgálata.....	25
7.3.1	Eredmények értékelése	26
7.4	Helyszínrajzi vonalvezetés hatása az elkeveredési viszonyokra.....	31
7.4.1	Eredmények értékelése	32
7.5	Vízhozam-arány hatása az elkeveredési viszonyokra.....	35
7.5.1	Eredmények értékelése	37
8	Elkeveredés vizsgálatok valós esettanulmányon keresztül.....	39
9	Eredmények összefoglaló értékelése	43
10	Köszönetnyilvánítás.....	45
11	Irodalomjegyzék	46
12	Függelék.....	48

1 Ábrajegyzék

1. ábra Műholdfelvétel (forrás: Google Earth).....	5
2. ábra Műholdas felvétel a vizsgált Duna-szakaszon tapasztalt elkeveredési jelenségről (forrás: Sentinel-2 satellite).....	8
3. ábra Műholdas felvétel a vizsgált területről (forrás: Sentinel-2 satellite)	9
4. ábra Mederszelvény a gönyői vízmércénél	9
5. ábra Koncentráció idősorok különböző helyeken a folyásiránynak megfelelően (forrás: Olsen, 2012)	12
6. ábra Rácsháló típusok (forrás: Olsen, 2012)	13
7. ábra Szemléltető fluxus molekula ábra (forrás: Olsen, 2012).....	15
8. ábra Másodrendű advekcións séma számítási menete (forrás: Olsen, 2012).....	15
9. ábra Áramlási viszonyok alakulása a D keresztmetszvény mentén legdurvább (bal), illetve legfinomabb (jobb) rácsfelbontást alkalmazva.....	20
10. ábra 2D számítási rácsháló részlet SMS szoftverben.....	23
11. ábra Referenciamodell lebegtetett hordalék eloszlása hossz és keresztmetszvények mentén	24
12. ábra Turbulens örvényviszkózitás és horizontális eredő erők alakulása.....	25
13. ábra M-D és Duna összefolyásának torz cellás kialakítása.....	26
14. ábra Lebegtetett hordalék eloszlása 40 m x 20 m cellafelbontás esetén	27
15. ábra Örvényviszkózitás és horizontális irányú eredő sebességvektorok alakulása 40 m x 20 m cellafelbontás esetén.....	27
16. ábra Lebegtetett hordalékeloszlás alakulása torz cellakiosztás esetén.....	28
17. ábra Keresztirányú sebességek, örvényviszkózitás és horizontális eredő sebességek alakulása torz cellakiosztások esetén	28
18. ábra Hordalékeloszlás $k - \epsilon$ (RNG) turbulenciamodell esetén.....	29
19. ábra Örvényviszkózitás alakulása $k - \epsilon$ (RNG) turbulenciamodell esetén	29
20. ábra Hordalékeloszlás alakulása algebrai turbulenciamodell esetén.....	30
21. ábra Örvényviszkózitás alakulása algebrai turbulenciamodell esetén	30
22. ábra Szinuszosan meanderező folyó	31
23. ábra Sziget leírása 2D rácsháló esetén a stabilitás megtartása érdekében.....	32
24. ábra Hordalékeloszlás alakulása 15°-os betorkollás esetén	32
25. ábra Örvényviszkózitás és horizontális eredő sebesség eloszlás 15°-os betorkollás esetén	33
26. ábra Hordalékeloszlás alakulása 90°-os betorkollás esetén	33

27. ábra Örvényviszkozitás, horizontális eredő sebesség alakulása 90°-os betorkollás esetén	34
28. ábra Hordalékeloszlás alakulása szinuszosan meanderező csatorna esetén.....	35
29. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlás alakulása szinuszosan meanderező csatorna esetén.....	35
30. ábra Kifolyási szelvény Q – h görbéje	36
31. ábra Hordalékeloszlás alakulása kis vízhozam arány esetén.....	37
32. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlás alakulása kis vízhozam arány esetén.....	37
33. ábra Hordalékeloszlás alakulása nagy vízhozam arány esetén	38
34. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességek alakulása nagy vízhozam arány esetén	38
35. ábra Korrigált torz cellák a vizsgálati területen.....	40
36. ábra Terepi mérés (bal) és modellezett eredmény (jobb) összehasonlítása (áramlási irány lentől fel).....	41
37. ábra Hordalékeloszlás alakulása 10 m x 5 m cellakiosztás esetén.....	48
38. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlások alakulása 10 m x 5 m cellakiosztás esetén	48
39. ábra Hordalékeloszlás alakulása másodrendű advekción séma esetén.....	49
40. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlások alakulása másodrendű advekción séma esetén.....	49
41. ábra Hordalékeloszlás alakulása 20 függőleges réteg esetén	50
42. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlások alakulása 20 függőleges réteg esetén.....	50
43. ábra Hordalékeloszlás alakulása 5 függőleges réteg esetén	51
44. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlások alakulása 5 függőleges réteg esetén.....	51
45. ábra Hordalékeloszlás alakulása 30°-os betorkollás esetén	52
46. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlások alakulása 30°-os betorkollás esetén.....	52

2 Tartalmi kivonat

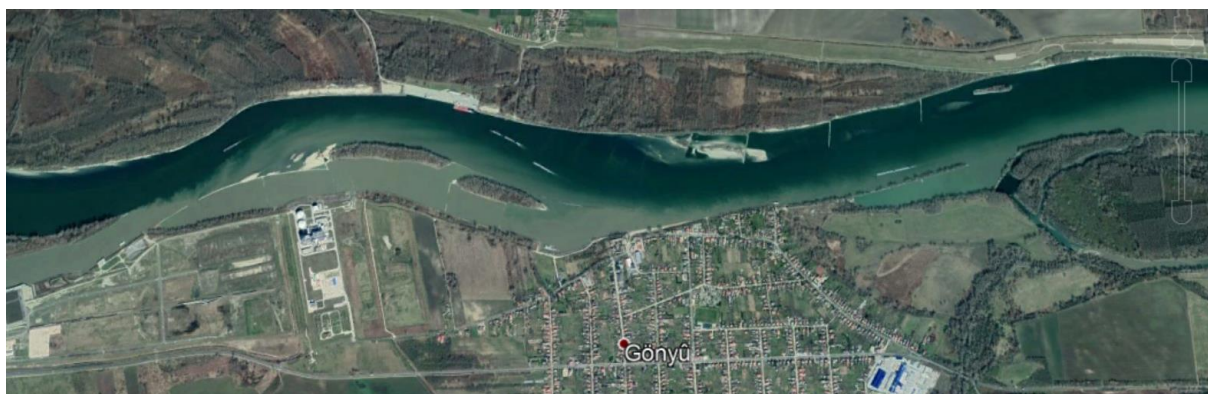
Vízfolyások lebegtetett hordalékháztartásának és hordalékmozgási folyamatainak feltérképezése fontos szerepet játszik a mederalakváltózási jelenségek megismerésében. Vízfolyások találkozásánál, vagyis összefolyásoknál a lebegtetett hordalékmozgás folyamatának feltárása még ma is komoly kihívást támaszt a kutatók számára, ugyanis ezeken a helyeken jellemzően összetett áramlási és hordalékmozgási folyamatok alakulnak ki, amik bonyolult lebegtetett hordalék-elkeveredési struktúrát eredményeznek. A Mosoni-Duna Dunához való hozzáfolyásánál például légi felvételek alapján jól megfigyelhető, hogy a hozzáfolyáson érkező lebegtetett hordalékban gazdag víz a befogadó Dunában hosszú szakaszon, akár több 10 km-en keresztül is csóvaként terjed, a teljes elkeveredés jóval a torkolat alatt történik meg. Az ehhez hasonló egyedi jelenségek nagy szerepet játszanak a folyószakasz morfordinamikai folyamataiban, ezért azok vizsgálata hangsúlyos.

A lebegtetett hordalék torkolati szakaszon történő elkeveredésének vizsgálatában nagy áttörést jelent a számítógépes numerikus modellezés megjelenése, hiszen az áramlási és elkeveredési folyamatok részletes, akár 3D leírására nyílt lehetőség.

TDK kutatásomban áttekintem a Duna lebegtetett hordalékmozgásával és a folyami elkeveredéssel kapcsolatos szakirodalmat. Terepi méréseken veszek részt, aminek célja egyrészt a folyók által szállított lebegtetett hordalék mennyiségének és hordaléktöménység területi változékonyság meghatározása, valamint a numerikus modellépítéshez szükséges adatok gyűjtése. Kiválasztok egy a 3D hidrodinamikai és elkeveredési folyamatok szimulációjára alkalmas modellt, amit első lépésben egy sematizált csatornán, majd a Duna példáján keresztül tesztelek különböző geometriai, fizikai és numerikus beállításokkal. A dolgozat fő eredményeként értékelem a 3D numerikus modell alkalmazhatóságát dunai léptékű folyamok torkolati szakaszán tapasztalható hordalékcsóvák elkeveredésének leírására, amely következő lépésben egy terep hordalékmérő állomás kialakítását támogathatja.

3 Bevezetés

A folyók nemcsak hazánkban, de az egész világon jelentős szerepet töltenek be az emberek életében. Hasznosítjuk vizüket ivóvízként, higiéniai célokra, valamint, szinte bármilyen árucikk előállításához szükséges bizonyos mennyiség. Kereskedelmi, ipari, tömegközlekedési, szabadidős célú hajózás zajlik az arra alkalmas folyókon. Magyarország legnagyobb folyója a Duna, melyre kivétel nélkül igazak az imént említett felhasználási formák. Éppen ezért, a hazai vízügyi ágazat fő törekvései közé tartozik a folyó alapos megismerése, azon belül is, a lebegtetett hordalékháztartásának feltérképezése. A mederváltozási folyamatokban jelentős szerepet játszik a lebegtetett hordalékmozgás, melynek mennyiségi és keresztmetszeti eloszlás szerinti elemzésére létesítenek egy monitoring állomást, Gönyű környezetében lévő 1790,61 fkm szelvényben. A Duna érintett szakasza lebegtetett hordalékszállítás kapcsán igen érdekes a Mosoni-Duna hozzáfolyása miatt. Légi felvételekről is jól látható, hogy a Rába hordalékban gazdag mellékfolyó által szállított lebegtetett hordalék több kilométeren keresztül sem keveredik el a Dunában (1. ábra), a hozzáfolyást követően kialakuló összetett áramlási viszonyok miatt. Sajnálatos módon nem könnyű feladat a hasonló hidrodinamikai állapotok számszerű leírása.



1. ábra Műholdfelvétel (forrás: Google Earth)

Kutatók több évtizedes kitartó munka során kidolgoztak egyszerűsített leírásokat, azonban a mai napig nincs egyöntetű vélemény, melyik séma a legtökéletesebb. A számítástechnika rohamos fejlődésének köszönhetően lehetőségünk van ezeket az összefüggéseket programozni egyenként vagy kombinálva, azokat terepi mérések eredményeivel kalibrálva egészen közeli képet kaphatunk a valósághoz. A dolgozatomban először egy tesztszatórnán végzek el különböző paraméterekre érzékenységvizsgálatot, keresve a beállítást, amivel a torkolati folyószakaszra jellemző áramlási, elkeveredési viszonyok legpontosabban modellezhetők. Az általam optimálisnak vélt beállításokkal egy közel 19 km hosszú 3D modellt építék fel és



futtatom azt, a kapott eredményeket terepi mérések eredményeivel hasonlítom össze. Ezek után levonom a következtetést a modell alkalmazhatóságával kapcsolatban.

4 Dolgozat célja

Dolgozatomban az elkeveredés numerikus modellezését érintő szakirodalom feldolgozása után, létrehozok SMS szoftverben a referencia tesztszatórnához terepmodellt, mely két folyó találkozását reprezentálja egyszerűsített geometriával, torkolatnál 2 m-es szintkülönbséggel. A terepmodell elkészültével 2D számítási rácshálót generálok, majd kiterjesztem SSIIM2 program segítségével 3D-ba. A referencia modell két folyó medrének 45°-os találkozását jelenti 20 m x 10 m x 10 cella felbontással, 2200 – 620 m³/s vízhozam-aránnyal. Érzékenységvizsgálatot végzek a felbontást, cellák alakját, vízhozam-arányt, advekciós-sémát, turbulencia modellt illetően. Majd további vizsgálatot folytatok le a találkozás szögével és a főfolyó meanderezésével kapcsolatban. Az előbb leírtakat a kialakult áramlási viszonyok és lebegtetett hordalékcsóva elkeveredése alapján értékelem. Céлом találni egy alkalmas beállítást, amit aztán egy valós esettanulmányhoz használhatok fel. Felépítek egy 3D hidrodinamikai modellt a Mosoni-Duna és Duna folyó találkozásának környezetére. Futtatom a 2018.06.19 napon feljegyzett vízhozam értékekkel (Duna, Mosoni-Duna, Rába), majd terepi mérések eredményeivel vetem össze a kapott eredményeket.

A vizsgálataim fő célja, hogy numerikus teszteken keresztül rámutassak a torkolati folyószakaszokon kialakuló lebegtetett hordalékkeveredés különböző geometriai, hidrológiai és numerikus paraméterekre való érzékenységére. Az eredmények hozzájárulnak az elkeveredési folyamatok jobb megértéséhez és olyan gyakorlati kérdések megválaszolásához, mint például egy összefolyási zónában kialakítandó hordalékmérő monitoring állomás kialakítása, mérési eszközök jellemzőinek megválasztása, monitoring program megtervezése. Utóbbi egy valós problémakörhöz kapcsolódik, mivel a dunai hordalékmonitoring rendszer hazai fejlesztése során az egyik új állomás éppen a Mosoni-Duna torkolattól alvízi irányban kerül majd kiépítésre, és mint ilyen, nagyon kitett a mellékfolyóból érkező hordalék dunai elkeveredési viszonyainak. A következő pontban ezt az esettanulmányi területet mutatom be.

5 A hordalékelkeveredés problémakörével érintett vizsgálati terület bemutatása

A gönyői vízmérce szelvénye (1790.61 fkm) a Duna felső-magyarországi szakaszán található. Maga a vizsgált szakasz az Észak-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság (ÉDUVIZIG) fennhatósága alá tartozik. Hazai és nemzetközi irodalom is található a terület morfológiai állapotáról, történelmi hordalékviszonyairól, ebben a fejezetben a vizsgált terület szempontjából releváns tanulmányok megállapításai kerülnek összefoglalásra és bemutatásra. A terület mederváltozásait vizsgálta például Rákóczi (2000), Varga-Lehofer (2014), Török (2014), Szombati (2016); a Duna magyarországi lebegtetett hordalékjellemzői feltérképezésre kerültek a Nagyvízi Mederkezelési Terv (2014) keretében; a felvízi vízlépcsők hatásait vizsgálta például Holubová et al. (2004), Habersack et al. (2016), Zugor (2017).



2. ábra Műholdas felvétel a vizsgált Duna-szakaszon tapasztalt elkeveredési jelenségről
(forrás: Sentinel-2 satellite)

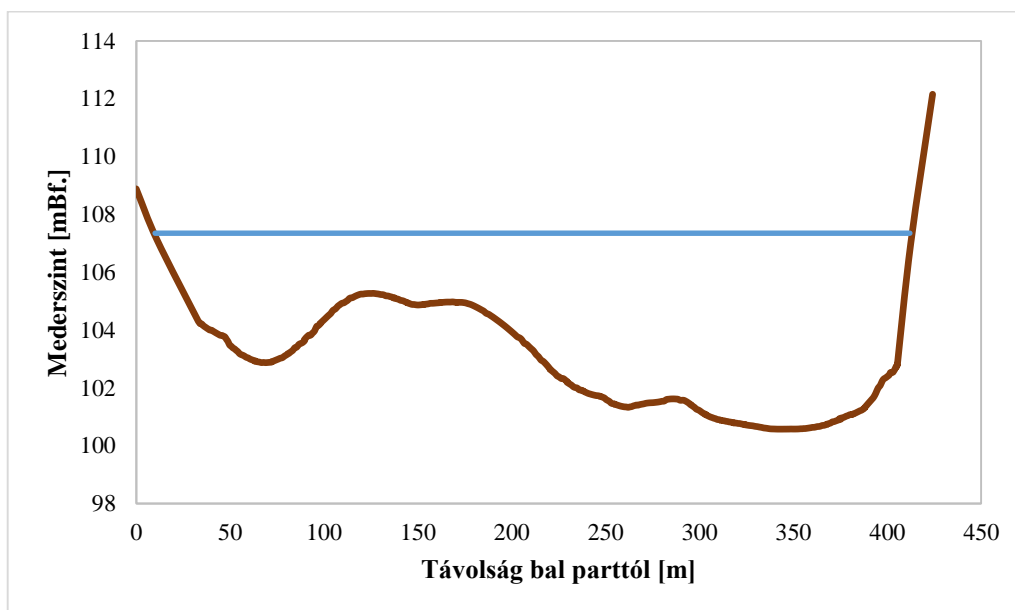
A műholdas felvétel alapján (2. ábra) egyértelműen látható, hogy a Mosoni-Duna hordalékban gazdag csóvája igen hosszú szakaszon sem keveredik el a Dunába való torkollását követően, holott a két folyó közt a teljes vízhozam körülbelül 97%-3% arányban oszlik meg. Megfigyelhető az is, hogy a hordalékcsóva kiterjedése a Duna kanyargásával együtt változik – a domború ívekben jobban szétterül, míg homorú íveknél (mint amilyenben a gönyői vízmérce szelvénye is található) elkeskenyedve a jobb parthoz szorul. A hordalékcsóva elkeveredésének vizsgálata tehát ezen a szakaszon kifejezetten összetett.

A modellezett eredmények összehasonlításához a gönyői vízmérce szelvényében (3. ábra) végzett terepi mérések eredményei szolgálnak alapul. A vízmérce a Duna 1790.61 fkm szelvényében található, kb. 3.5 km-re a Mosoni-Duna torkolatától (1794.00 fkm).



3. ábra Műholdas felvétel a vizsgált területről (forrás: Sentinel-2 satellite)

A szelvényben tetten érhető a szabályozási művek (sarkantyúk) hatása is. A keresztshelvény mentén változatosan alakulnak a mélységek (4. ábra), illetve az áramlási sebességek, így kérdéses, vajon hány dimenzióban írhatók le megfelelően a kialakuló hordalékjelenségek.



4. ábra Mederszelvény a gönyői vízmércénél

6 Az elkeveredés elméleti és numerikus háttere, irodalomkutatás

Mivel a kutatás eszköze egy számítógépes áramlási és hordaléktranszport modell és a vizsgálatok egyik fő célja numerikus tesztek végrehajtása, a jobb megértés érdekében fontosnak tartom, hogy mind az elkeveredési folyamatokat leíró elmélet, mind a numerikus háttér bemutatásra kerüljön, valamint a témában már korábban bemutatott legrelevánsabb tanulmányok eredményei kivonatszerűen ismertetve legyenek. Ebben a fejezetben ezeket a pontokat érintem, majd rátérek a numerikus tesztek ismertetésére.

6.1 Elkeveredés numerikus modellezése

Ahhoz, hogy egy szennyezőanyag vagy lebegtetett hordalék csóva elkeveredéséről beszélhessünk, mindenekelőtt tisztáznunk kell néhány alapvető fogalmat, melyek az alábbiak:

Advekcio: Advekcioról beszélhetünk, abban az esetben, ha lebegtetett hordalék vagy szennyezőanyag (idegen anyag) a szállító közeggel együtt áramlik vagy egy teljesen elkülönülő fázisként terjed. Tehát, az áramlási sebességtől függően az eltérő koncentrációjú részecskék különböző mértékű elmozdulásokat hajtanak végre.

Konvekció: Az a transzportfolyamat, amely hőmérséklet-különbség hatására jön létre.

Diffúzió: Eltérő koncentrációjú vízrészecskék esetén a víztestben elkeveredés jön létre, mely a koncentráció kiegyenlítődését eredményezi. Fő tulajdonsága, hogy annál intenzívebb a folyamat, minél nagyobb a koncentráció gradiense. Tudjuk, hogy mindig a magasabb koncentrációjú közeg felől áramlik a folyadék az alacsonyabb koncentrációjú közeg felé. Ezt a jelenséget Fick I. törvénye írja le:

Egy dimenzióban:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

ahol:

- D – molekuláris diffúziós együttható (víz esetén – 10^{-4} cm²/s)
- C – koncentráció
- J – diffúziós anyagáram sűrűség

Három-dimenzióban:

$$J(J_x, J_y, J_z) = -D \left(\frac{\partial C}{\partial x}, \frac{\partial C}{\partial y}, \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

ahol:

x, y, z – Descartes-féle koordináták

A diffúzió leírása turbulens áramlásban:

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

Turbulens diffúzió: A vízrészecskék sebességének véletlenszerű pulzációjából jön létre. Ha matematikailag akarjuk leírni, a folyamatot diffúziósként kell tekintenünk, valamint D_x , D_y , D_z függ a vízrészecske helyétől és irányától.

Diszperzió: A diszperzió kombinációja a konvekciós és diffúziós folyamatoknak. A konvekció hatása viszonylag könnyen számszerűsíthető időátlagolt vízsebesség esetén. Azonban a diffúzió turbulenciát és sebességgradienseket okoz, amik számításainkat igen komplikálttá teszik. A diffúzió modellezésének legegyszerűbb formája, ha egyszerűen turbulens diffúziós együtthatóként vesszük figyelembe (Γ).

$$\Gamma = \frac{\overline{F}}{\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)}$$

ahol:

- F – a szennyezés fluxusa,
- c – koncentráció,
- A – keresztmetszeti terület,
- x – fluxus transzport iránya.

A turbulens diffúziós együttható egyenlővé tehető a turbulens örvényviszkozitással (v_t). A két változó közti kapcsolat az alábbi egyenlet formájában értelmezhető:

$$\Gamma = \frac{v_t}{Sc}$$

ahol:

- Sc – Schmidt szám. Értéke 0.5-1,0 között változhat. Azonban, hogy a turbulens diffúziós együtthatót és a turbulens örvényviszkozitást egyenlővé tudjuk tenni, érdemes a számításaink során 1,0-nek felvenni.

Innen levezethető, hogy a turbulens örvényviszkozitás értéke a következő képlettel számolható:

$$v_t = 0,11 * u_* * h$$

ahol:

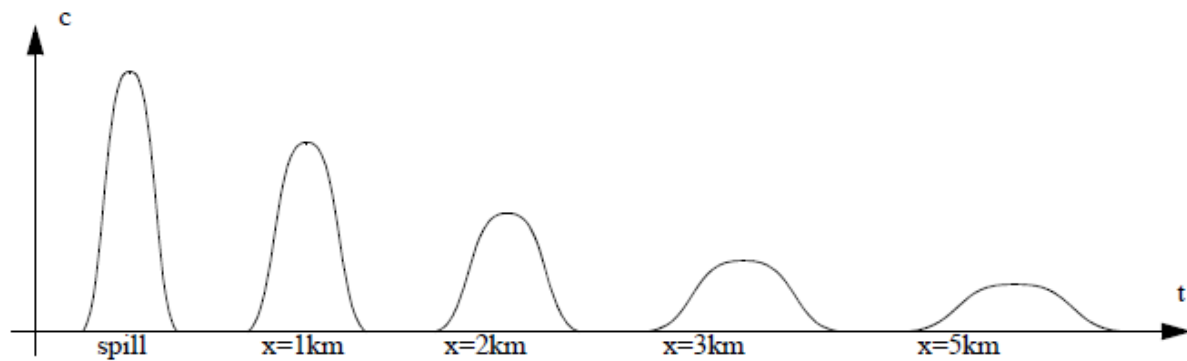
- u_* - csúsztató sebesség,
- h – vízmélység.

Tehát elkeveredésről akkor beszélhetünk, ha fent említett transzportfolyamatok együttesen fennállnak.

Irodalom: (Hefop Dr. Clement Adienne 2007, vízminőségszabályozás, Somlyódy 1985, Olsen 2012)

6.1.1 Elkeveredés 1D esetben

Egy folyó befogadásába való betorkollását tekinthetjük a befogadóba pontszerű szennyezés bevezetésének mintájára, ahol a függőleges és vízszintes elkeveredés is nagy. A bevezetés utáni koncentrációk alakulása az alábbi ábrán (5. ábra) jól nyomon követhető:



5. ábra Koncentráció idősorok különböző helyeken a folyásiránynak megfelelően (forrás: Olsen, 2012)

A transzport le tudja írni a konvekciós-diffúziós együtthatóval a szennyezés koncentrációját:

$$\frac{dc}{dt} + U \frac{dc}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{dc}{dx} \right)$$

A hosszirányú diffúziós együttható pontos számszerűsítése 1D esetben igen nehéz, mivel nem tudja jól kezelni az apró turbulens folyamatokat. Ehelyett, a hosszirányú elkeveredés gyakran konvektív mozgást eredményez az oldalsó sebességgradiensek következtében. A diffúziós együttható egy 1D folyómodellnél sokkal nagyobb lesz, mint egy alacsony skálájú diffúziós együtthatót használó többdimenziós modell esetében. Éppen ezért jelen esetben az 1D folyómodell nem a legalkalmasabb megoldás.

Bár meg kell jegyeznünk, hogy léteznek empirikus formulák az előbb említett együttható számítására. Ilyen például:

Fischer et. al. (1979)

$$\Gamma = 0.011 \frac{(UB)^2}{HU_*}$$

ahol:

- U – vízsebesség,
- B – folyó szélessége,
- H – vízmélység,
- u_* - csúsztató sebesség.

Irodalom: (Niels Reidar B. Olsen 2012)

6.1.2 Elkeveredés 2D esetben

2D transzportegyenletet úgy tudjuk felírni turbulens áramlásban, hogy a koncentrációnak vesszük a mélység menti átlagát és így vesszük figyelembe a harmadik irányú komponensét. Az egyenlet az alábbi módon néz ki:

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(Hv_x C)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv_y C)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x^* \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y^* \frac{\partial C}{\partial y} \right) = 0,$$

ahol:

- D_x^*, D_y^* a 2D transzport egyenletben szereplő turbulens diszperziós tényező.

Irodalom: (Hefop Dr. Clement Adienne 2007)

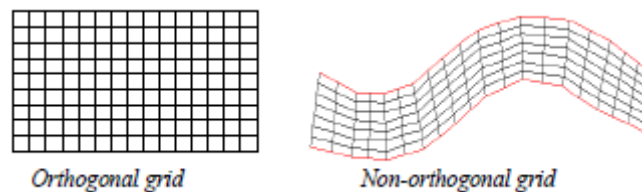
Az elkeveredés modellezése 2D esetben a mélység menti átlagolással tér el a 3D esettől. Így nem kapunk függőleges rétegenkénti koncentráció eloszlást eredményül, csupán x, y koordinátákhoz rendelt értékeket. Esetemben egy torkolati folyószakasgról van szó, ráadásul a mellékfolyó szintkülönbséggel érkezik a főfolyó medrébe, így elkerülhetetlen számomra a függőleges értelmű komponensek számszerűsítése. A továbbiakban nem részletezem a 2D esetet, hanem rátérek a 3D-re.

6.1.3 Elkeveredés 3D esetben

3D transzportegyenlet turbulens áramlásban az alábbi módon néz ki:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{v}_x \bar{c})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}_y \bar{c})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{v}_z \bar{c})}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) = 0$$

Ahhoz, hogy 3D-ban tudjunk elkeveredést számolni, létre kell hoznunk egy struktúrált számítási rácshálót (6. ábra). Törekedni kell rá, hogy a cellakiosztást tekintve minél ortogonálisabb (cellák belső szögei 90°-osak) legyen a háló.



6. ábra Rácsháló típusok (forrás: Olsen, 2012)

Természetesen egy valós esetben, ahol a folyók medrének alakja sokszor igen szabálytalan alakzatot rajzol ki, valamint többször előfordul, hogy szigeteket, hozzáfolyásokat kell beépíteni a modellbe, ezért a nem-ortogonalitás elkerülhetetlen. A legegyszerűbb computational fluid dynamics (CFD) számítási mód, ha létrehozuk a 2D rácshálót, majd ezt terjesztjük ki 3D-ba a függőleges cellák kiosztásával. Befolyási, kifolyási kezdeti és peremfeltételek megadása után a víz a cellákba fog áramolni és a modell numerikus megoldója az összes cellára egyenként oldja

meg az egyenleteket. A SSIIM program használata esetén törekedni kell, hogy vízszintes és függőleges értelemben is a nyolcszög alakú cellák belső szögei minél közelebb legyenek a 90°-hoz.

A számítások végrehajtására többféle sémát is alkalmazhatunk:

- Diszkretizációs módszer,
- The First-Order Upstream Scheme (elsőrendű advekción séma),
- Spreadsheet programming,
- False diffusion,
- The Second Order Upstream Scheme (másodrendű advekción séma),
- Time-dependent computations and source terms.

Dolgozatomban első- és másodrendű advekción sémákat használok, ezért csak ezt a két módszert mutatom be részletesen.

Elsőrendű advekción séma:

A rácsháló összes cellájához tartozó változó értékét a cella középpontjában értelmezzük. Véges elemes módszert használva meghatározzuk minden egyes cellához tartozó értéket, mégpedig úgy, hogy mindig az áramlás irányával szemben lépünk vissza egyet (upstream cella) majd ebből a cellából számoljuk az aktuális cellát. Tehát az aktuális cella bemeneti koncentrációja megegyezik az upstream cellákból érkező koncentrációval. A számítás alapja a cellába érkező vízmennyiség. A konvektív fluxust és a diffúzív fluxust az alábbi módon számolja a séma:

Konvektív fluxus:

$$U * A * c$$

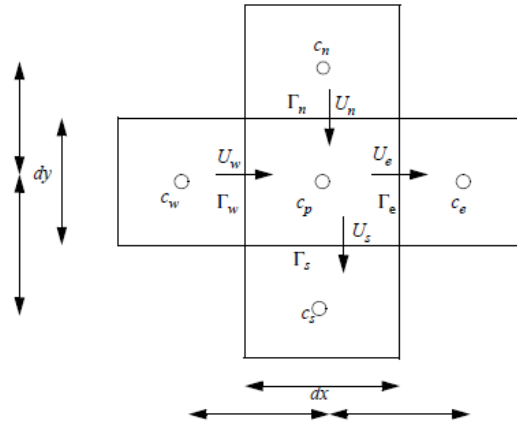
ahol:

- U – vízsebesség
- A – cella felülete
- c – koncentráció

Diffúzív fluxus:

$$\Gamma * A * \frac{dc}{dx}$$

Ezek összege adja a teljes fluxust (7. ábra). Ezen felül, minden egyes határoló cellára fel tudunk írni egy súlyszámot, amivel az adott számítási cellára vonatkozó eredmény kiszámításához besorozzuk az egyes koncentrációkat.



7. ábra Szemléltető fluxus molekula ábra (forrás: Olsen, 2012)

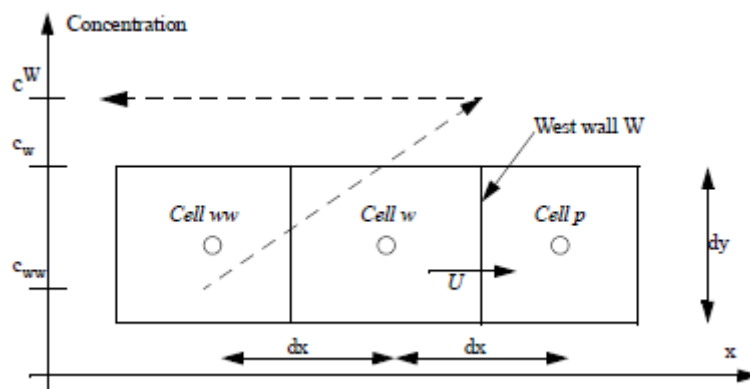
P cellába áramló fluxus:

$$F_w = U_w A_w c_w + \Gamma_w \frac{A_w (c_w - c_p)}{dx}$$

Súlyszámok levezetéséhez lásd Olsen (2012) munkáját.

Másodrendű advekcións séma:

A másodrendű advekcións séma abban tér el az előbbi folyamattól, hogy a konvektív fluxust máshogy számolja. Vegyük a következő ábrát alapul (8. ábra):



8. ábra Másodrendű advekcións séma számítási menete (forrás: Olsen, 2012)

A formula dx , dy c^{ww} , c^w ismeretében extrapolál a W falra koncentrációt, majd abból folytatja a számítást. A fluxus, ami a W falon át belép a p cellába, a következő:

$$F_w = U_w A_w \left(\frac{3}{2} c_w - \frac{1}{2} c_{ww} \right) + \Gamma_w \frac{A_w (c_w - c_p)}{dx}$$

Ennek értelmében a súlys számok is módosulnak, (lásd Nils Reidar B. Olsen 2012 munkájában). Az előzőekben leírtak 2D esetre voltak alkalmazhatóak, ha 3D-re írjuk fel, szükséges 4 további taggal számolnunk (a_{top} , $a_{topoptop}$, a_{bottom} , $a_{bottombottom}$).

A következő két fejezet a SSIIM2 szoftver áramlás és hordalék számítási módszeréről szól, melyet Kutai Rebecka Debóra 2015-ös TDK értekezéséből emeltem át.

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 megoldhatósághoz szükség van egy negyedik egyenletre (6. egyenlet), melyet a térfogat-megmaradás törvényéből kapunk.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

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

v_T – turbulens örvény viszkozitási együttható

Ezek után a Navier-Stokes egyenletek az alábbiak:

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

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 az impulzusdiffúziót 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.

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

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 energiai disszipációs rátája

A P_k és ε értékét az alábbi összefüggésekből számíthatóak:

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

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

$C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, 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 ismertetett 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 (κ=0,4)

y – a mederfelszíntől mért merőleges távolság

k_s – Nikuradze-féle érdességmagasság (mederanyag szemösszetételére jellemző)

Hordalék 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 együtthatót az alábbi hányadosból kaphatjuk:

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

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.

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

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

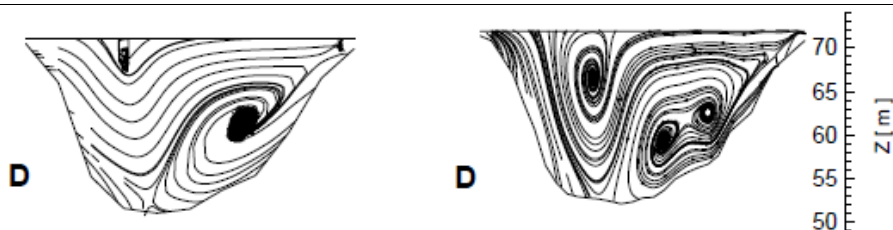
ν – víz kinematikai viszkozitása

6.2 Folyók találkozásához kapcsolódó korábbi 3D modellvizsgálatok

Biron et al. (2004) cikkében folyók találkozásánál való elkeveredési folyamatok 3D modellezését végzik a szerzők. Az általuk alkalmazott modell numerikus megoldója a Navier-Stokes egyenleteknek Reynolds-átlagolt formáját oldja meg permanens állapotú, szabadfelszínű áramlás esetén. Az elkeveredés alapját jelentő turbulenciát az úgynevezett $k - \epsilon$ modell segítségével számszerűsítették. A koncentráció eloszlás számításához és megjelentéséhez az elektromos induktivitás jelenségét hívták segítségül. Vizsgálataikat egyszerűsített geometriájú csatornákon majd két folyó találkozási zónájára hajtották végre. Kimutatták a betorkollásnál jellemző szintkülönbség hatását az elkeveredés jellegére, majd a valós esettanulmányon keresztül vezetőképesség mérésekkel mutatták be a találkozó folyók vízhozam arányának hatását az csóvaterjedésre.

Dordevic és Ivetic (2006) a Száva és Duna folyók összefolyását modellezzik három-dimenziós numerikus megoldóval. A folyók találkozásánál a morfológia kiváltképp érdekes. Éppen ezért kiváló modell kísérletek elvégzésére. A Száva és Duna összefolyásával átellenben egy öböl található. Az így kialakult geometriai és morfológiai jellemzők miatt a területre összetett áramlási viszonyok jellemzőek. A torkolat szintben különböző medrekből tevődik össze. Feltételezve, hogy a mederfenék nem változik, a természetes folyómeder – vízfolyás interakcióját lehet elemezni. A kutatók SSIIM2 szoftvert alkalmaztak az áramlás 3D számítására.

A kutatásom szempontjából legfontosabb része a számítás alapját képező számítási rácsháló érzékenységvizsgálata. Egy eredmény összehasonlítást az alábbi ábrán (9. ábra) láthatunk:



9. ábra Áramlási viszonyok alakulása a D keresztmetszvény mentén legdurvább (bal), illetve legfinomabb (jobb) rácsfelbontást alkalmazva

Az ábrákon látható, hogy egy a torkolattól távol felvette keresztmetszvényben is érezhető az összefolyás elkeverő hatása. A nem szintben csatlakozás miatt a folyó hossz tengelyére merőleges csavaráramlások jönnek létre. Azonban ezeknek a csavaráramlásoknak a mértéke függ attól, hogy milyen finom számítási rácshálót használunk. Továbbá ezen jelenség kimutatására nem lenne elég egy 2D modell, szükséges a harmadik dimenziót is alkalmazni.

Baranya et al. (2013) kutatásának alapját a Mosoni-Duna és Duna folyók összefolyása képezte. Szó volt már arról, hogy a torkolati folyószakaszon kialakuló áramlási viszonyok igen összetettek tudnak lenni mind függőleges mind vízszintes értelemben. Ezért jelen munkában terepi mérések eredményeinek feldolgozását, valamint alkalmas 3D numerikus modell építését végezték el. A tanulmány az eredmények birtokában levonta a következtetést arról, hogy a CFD modell megfelelő beállításokkal és rácsfelbontással, alkalmas torkolati folyószakaszok elkeveredési és áramlási viszonyok elemzésére. Valamint, sokkal költség-hatékonyabb, mintha komplex laboratóriumi vizsgálatokat végeznénk.

7 Szimulációs vizsgálatok tesztsatornában

A lebegtetett hordalék torkolati folyószakaszon való elkeveredésének numerikus vizsgálatát két fő lépésben hajtottam végre. Első lépésben egy egyszerű geometriájú tesztsatornán végeztem vizsgálatokat különböző geometriai, hidrológiai és numerikus paraméterbeállításokkal azért, hogy jobban megértsük, milyen szerepe van a kiválasztott paramétereknek az hordalékelkeveredés jellegére. Második lépésben, a tesztsatornán végzett numerikus kísérletek alapján optimálisnak vélt paraméterbeállításokkal végzek szimulációt az esettanulmányi területre, ahol már a helyszínen mért adatok segítségével tudom értékelni a modell képességeit és későbbi használhatóságát. Utóbbi vizsgálatokat a 6. fejezet ismerteti.

Ebben a fejezetben elsőként röviden ismertetem a vizsgálatra kiválasztott numerikus eszközt, majd egy, az előzetes tapasztalatok alapján optimálisnak vélt beállítással végzek szimulációt, ami referencia változatként szolgál a későbbi elemzéshez. Következőként a különböző numerikus paraméterekre (rácsháló felbontás, cellák alakja, advekciós séma, turbulencia-modell) való érzékenységet mutatom be a modelleknek. Ezután a tesztsatornák helyszínrajzi alakjának a hatását vizsgálom, végül pedig a találkozó folyók érkező vízhozamának arányának hatását. Minden esetben az áramlási sebességek és a lebegtetett hordalékcsova térbeli eloszlását mutatom be és szövegesen értékelem azokat.

7.1 Felhasznált szoftverek ismertetése

Az **SMS** (Surface-water Modeling System) egy grafikus felhasználói felület és elemző eszköz, amellyel képesek vagyunk megjeleníteni, módosítani, megérteni numerikus adatokat, mérési eredményeket. Továbbá felhasználhatjuk folyók, tavak, öblök és egyéb vízfolyások 2D modellezéséhez. Jelen dolgozatomban a 3D modellezés alapját képező magassági adatokkal rendelkező rácsháló generálását végeztem el segítségével.

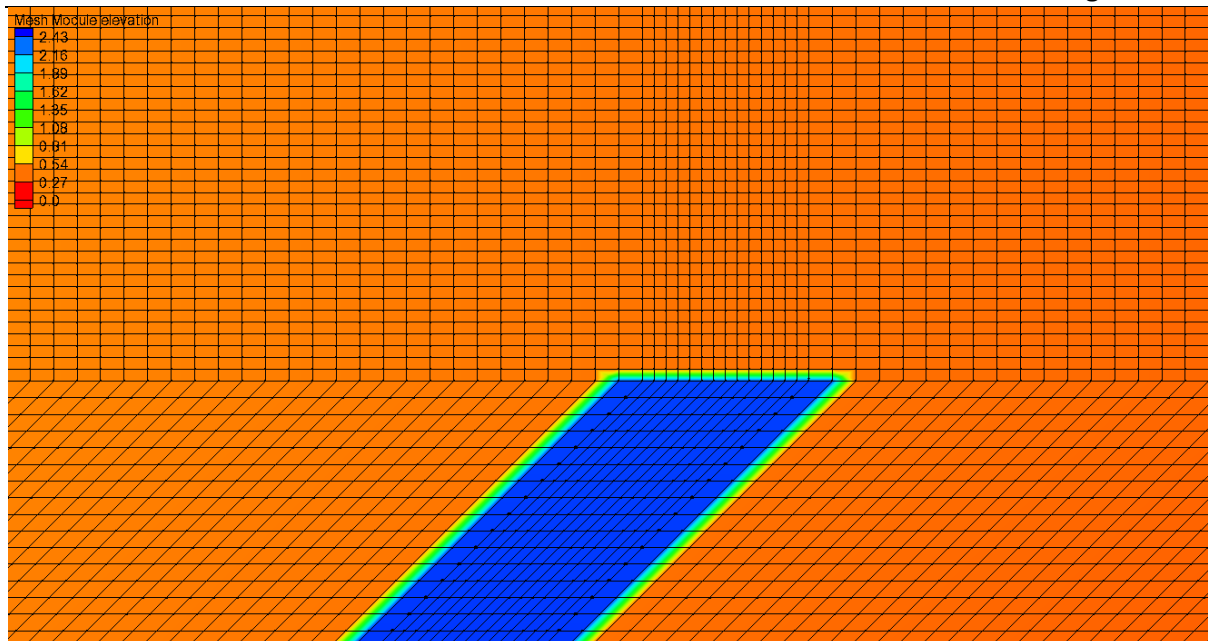
SSIIM2 egy akadémiai szoftver, mely bárki számára szabadon elérhető. A programot egy norvég kutatócsoport fejlesztte 3D hidrodinamikai szimulációk elvégzéséhez. A munkám során az SMS-ben felépített 2D rácshálóra SSIIM2-ben a függőleges cellakiosztást építettem rá. Ezzel megteremtve a harmadik dimenzióbeli kiterjedését a geometriának. Ezek után a kezdeti és peremfeltételek megadása következett, majd a szimuláció futtatását végeztem el a programmal. Az eredményeket többféle formában tudjuk kinyerni, amiket más szoftverek segítségével tudunk feldolgozni, mint pl.: **Tecplot 360**.

7.2 Referencia modell

Alapvetően két téglalap szelvényű csatorna találkozását vizsgáltam az alábbi megfontolásokkal:

- main folyó Duna méretű: 400 m széles, 5 m mély, 5000 m hosszú,
- tributary folyó Mosoni-Duna méretű: 100 m széles, 3 m mély, 1000 m hosszú,
- az összefolyás után 4000 m hosszú a kifolyási peremig a folyó,
- az összefolyásnál 2 m-es lépcső került kialakításra,
- betorkollás szöge 45° ,
- mindkét folyó fenékesése 7 cm/km,
- rácsfelbontás: 20 m x 10 m (hossz x keresztirány),
- függőleges felbontás: 10 réteg,
- cellák alakja: szabályos cellák
- advekciós séma: elsőrendű,
- turbulencia modell: $k - \epsilon$ modell.
- vízhozam arány: $Q_m = 1100 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_t = 70 \text{ m}^3/\text{s}$,
- hordalékfrakció:
 - első (durva hordalék, hogy csak a mederben legyen és ne tudjon az mélyülni): 0.5 mm átmérőjű; ülepedési seb: 2 m/s,
 - második (finom hordalék): 0.00005 mm; 0.003 m/s,
- hordaléktöménység:
 - $c_1 = 28,09 \text{ mg/l}$ (kvarc),
 - $c_2 = 1 \text{ g/l}$ (kvarc),
- kifolyási vízszint: 6,84 m (számítását lásd az 5.5 fejezetben)

A modell 2D vázát SMS szoftverrel építettem fel. Először a fenti adatokkal kiszerkesztettem AutoCAD-ben a szükséges pontok x és y koordinátáit, majd jegyzetombban ezekhez a kapott értékekhez magassági értéket rendeltem. Az egyes pontok között lineárisan interpolált a terep lejtése. Külön elkészítettem a főfolyó, mellékfolyó és később kikapcsolt terület domborzatának koordinátáit. Ezeket beolvasva az SMS scatter moduljába, létrejött három különböző terepmodell. Ezután az x,y koordinátákat magassági adatok nélkül a map modulba feature pointokként importáltam és megrajzoltam a számítási rácshálót a fent említett rácsfelbontással (20m x 10 m). Poligonok megépítése után definiáltam a négyszögletű hálózasi típust, és megadtam az egyes poligonok mely scatter rétegből vegyék a magassági adatokat, majd pedig a rácsháló generálásával elkészült a 2D számítási váz, magassági értékekkel (10. ábra):



10. ábra 2D számítási rácsháló részlet SMS szoftverben

A számítási rácsháló minden egyes pontját koordinátaival együtt ki tudtam menteni egy .2dm kiterjesztésű fájlba, amit a SSIIM2 modellhez használtam fel.

Az SSIIM2 szoftver egységes rácshálóban gondolkodik. A rácsháló generáláshoz úgynevezett koosurf nevű kiterjesztés nélküli fájlt kell létrehozunk. A .2dm kiterjesztésű fájl tartalmát excel táblába beolvasva el tudjuk végezni a szükséges indexelését az egyes pontoknak, valamint egy következő oszlopba meg kell adnunk a kifolyási vízszintet (meghatározásáról később ejtek szót), amit szeretnénk, hogy a modell alapul vegyen. Majd ha ez készen van, elmentjük a fájlt a már említett koosurf néven. Továbbiakban létre kell hoznunk egy control nevű kiterjesztés nélküli fájlt, melyben különböző beállításokat adhatunk meg, mint például a 3D rácsháló generálásának típusát, melyik cellák ne vegyenek részt a számításban, melyik cellában értelmezze a kifolyási vízszintet a modell, advekciónak sémájának rendjét, milyen turbulencia-modellt szeretnénk használni, milyen eredményeket szeretnénk kiírni. E két fájl birtokában a programot indítva, grid editor menüben elkészítettem a 3D számítási rácshálót, majd definiáltam a discharge editor menüpontban a befolyási peremetek ($2200 - 620 \text{ m}^3/\text{s}$, inlet Q) és kifolyási peremet ($2820 \text{ m}^3/\text{s}$, zero gradient). Ebben az állapotában ki tudtam menteni egy unstruc fájlt, ami a jelenlegi beállításokat tárolja. A control fájl módosításával (F 2-es kapcsoló UW), program indításával a számítás elkezdődik. A számítás végeztével kiíratam az eredményfájlokat, melyek a hordalékmodell bemeneti fájljait képezik: result, bedres.t, unstruc. Továbbá kiíratam egy tecplfe.dat fájlt is mely a hidrodinamikai modell eredményeinek Tecplot szoftverrel való megjelenítéséhez szükséges.

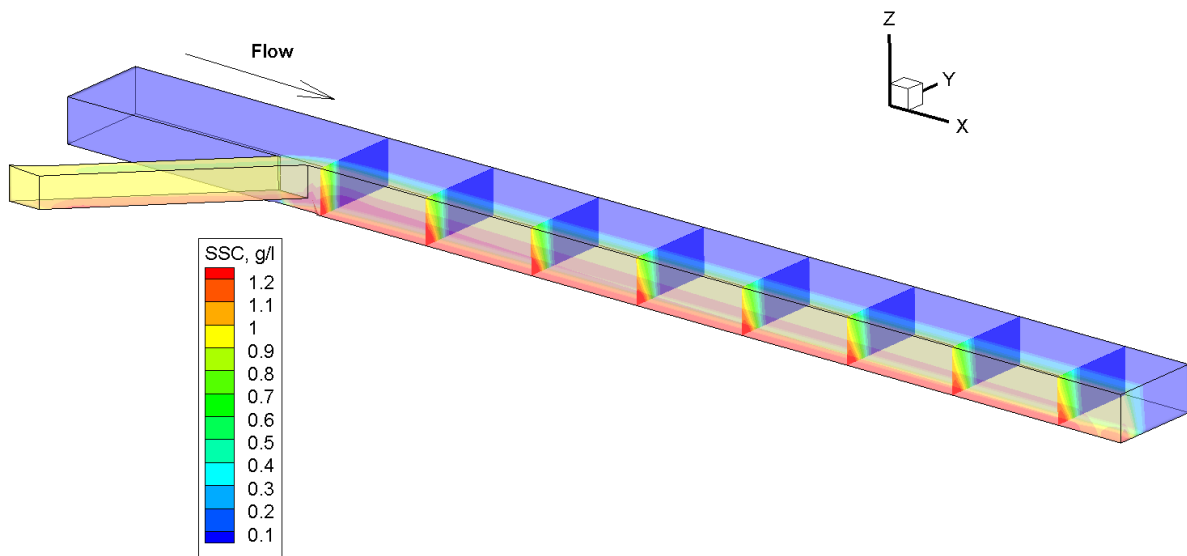
Az említett eredményfájlokon kívül a hordalékmodell futtatásához szükséges készíteni egy timei fájlt, melyben definiálni tudunk adott időponthoz befolyó vízhozamot, kifolyó vízhozamot, befolyási vízszintet, kifolyási vízszintet, befolyási peremenként hordaléktöménységet frakciónként, kifolyási vízszintet.

Ezek után már csak a control fájlt kell értelemszerűen módosítani (lásd: User's Manual (Olsen, 2011)).

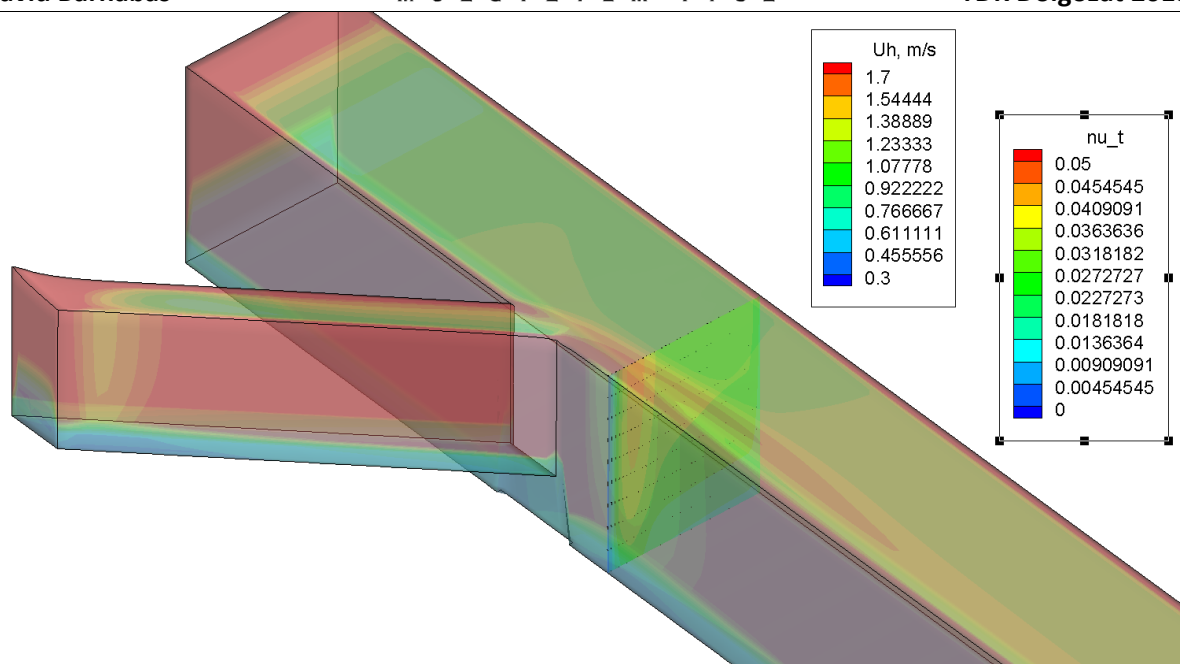
A hordalékmodell ezennel futtatható állapotban van.

7.2.1 Eredmények értékelése

Ahogy az az alábbi ábrákon látszik (11-12. ábra), beigazolódottak a várakozásaim mi szerint a hordalékcsóva a jobb parthoz húzódik és nem tud teljesen elkeveredni ezen a 4 km-es szakaszon. A legintenzívebb elkeveredés a torkolat közelében adódik. Ennek oka lehet a 21. ábrán látható nagy torkolati örvényviszkozitás és eredő sebesség. A sebességek a parthoz közeledve lassulnak, nagyobb lesz a súrlódó hatás, leváló áramlások keletkeznek. Viszont a hordalékcsóva továbbra is egyben marad.



11. ábra Referenciamodell lebegtetett hordalék eloszlása hossz és keresztmetszvények mentén



12. ábra Turbulens örvényviszkozitás és horizontális eredő erők alakulása

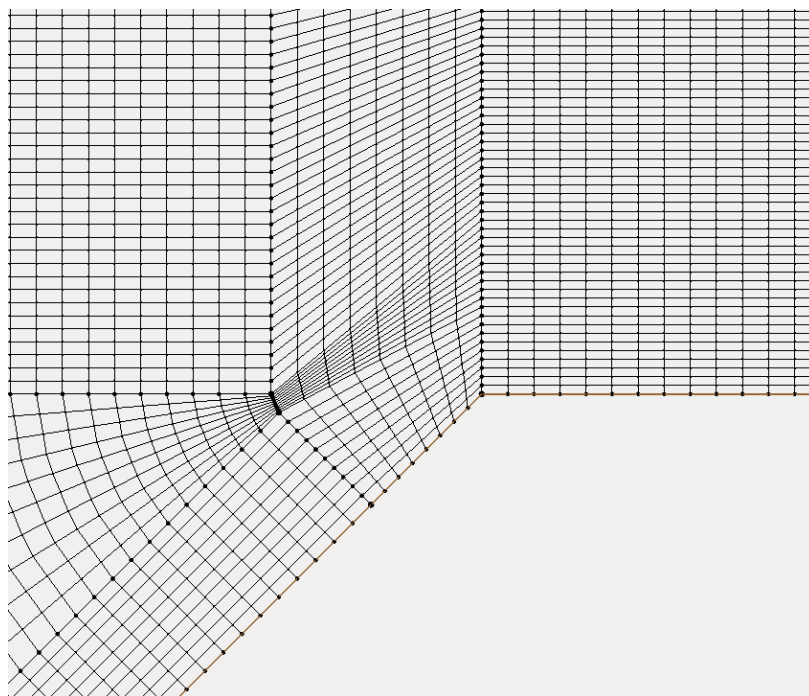
7.3 Numerikus modellparaméterek érzékenységvizsgálata

Az érzékenységvizsgálat során mindig csak egy paramétert változtatok meg a fent leírtak közül.

A változtatott paraméterek a következők:

- rácsfelbontás: 10 m x 5 m; 40 m x 20 m,
- függőleges felbontás: 5, 20 réteg,

- cellák alakja: torzított (13. ábra))

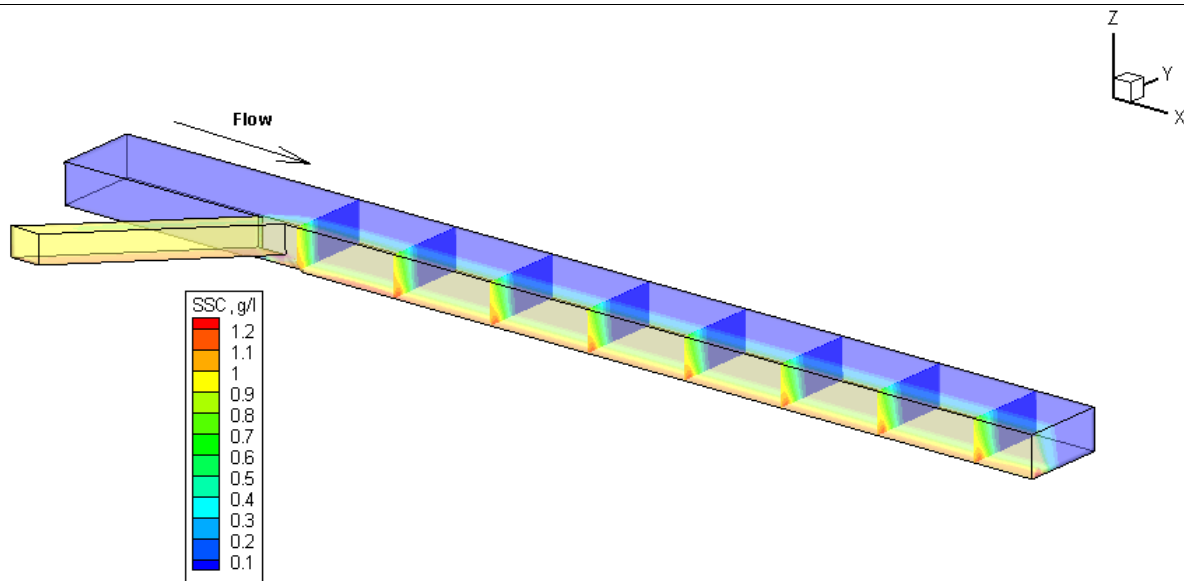


13. ábra M-D és Duna összefolyásának torz cellás kialakítása

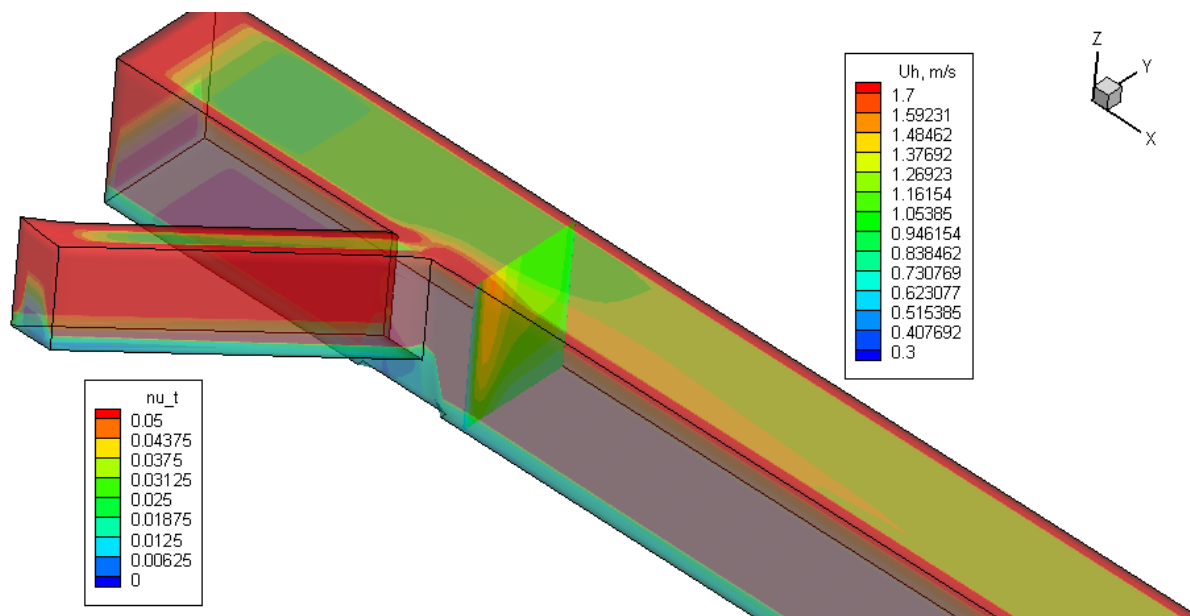
- másodrendű advekcións séma,
- turbulencia modell:
 - $k - \varepsilon$ (RNG),
 - algebrai: $0.11 \cdot \text{vízmélység} \cdot \text{nyírósebesség}$ (Olsen,2011).

7.3.1 Eredmények értékelése

Kevesebb számítási idővel jár, ha a számítási igényt lecsökkentjük, ezt el lehet érni például durvább cellakiosztással. A következő két ábrán (14-15. ábra) ennek eredményeit vizsgálom. Láthatjuk, hogy a lebegtetett hordalék eloszlása tekintetében sokkal kisebb koncentrációk jelentkeznek, mint a referenciamodellben. A maximális intenzitású elkeveredés nem is torkolatnál jelentkezik jelen esetben, hanem attól távolabb a vártakkal ellentétben. A csóva terjedése ugyanúgy a jobb parthoz szorul, viszont sokkal közelebb mozog ahhoz. A legnagyobb örvényviszkózitás a partok mellett található. Mivel a modell pontosságát a rácsháló felbontás befolyásolja és az itt bemutatott eredmények eltérő viselkedést mutatnak durvább felbontás esetén, a referenciamodell eredményei pontosabbak. A rácsháló felbontás hatását célszerű az ún. rácsháló függetlenség elve alapján végezni, ami szerint addig szükséges finomítani a számítási háló felbontását, amíg az az eredményekre már nem hat ki. A bemutatott eredmények alátámasztják ennek szükségességét.



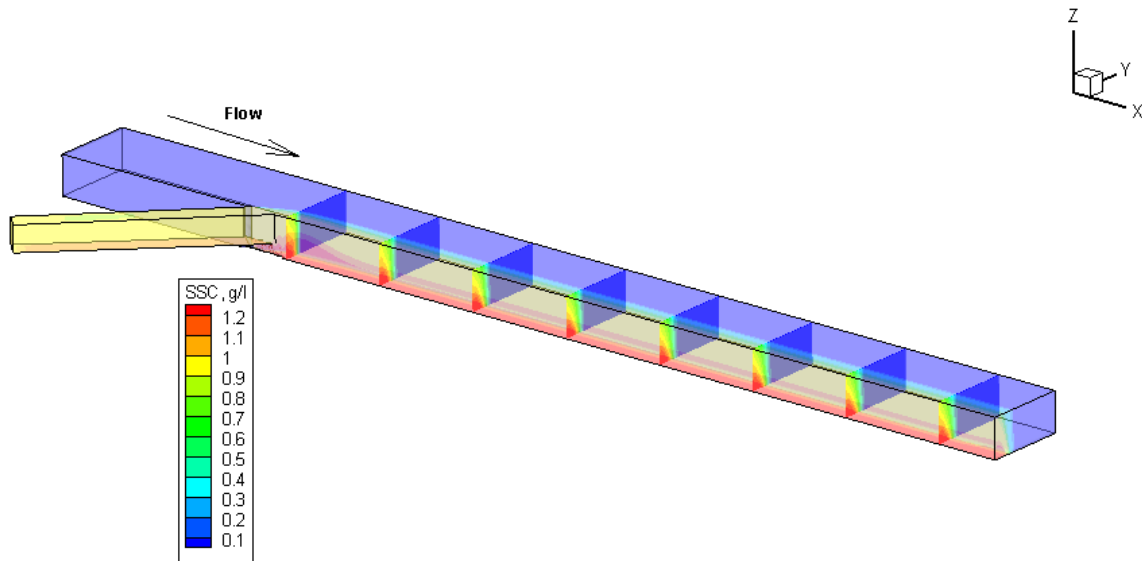
14. ábra Lebegtetett hordalék eloszlása 40 m x 20 m cellafelbontás esetén



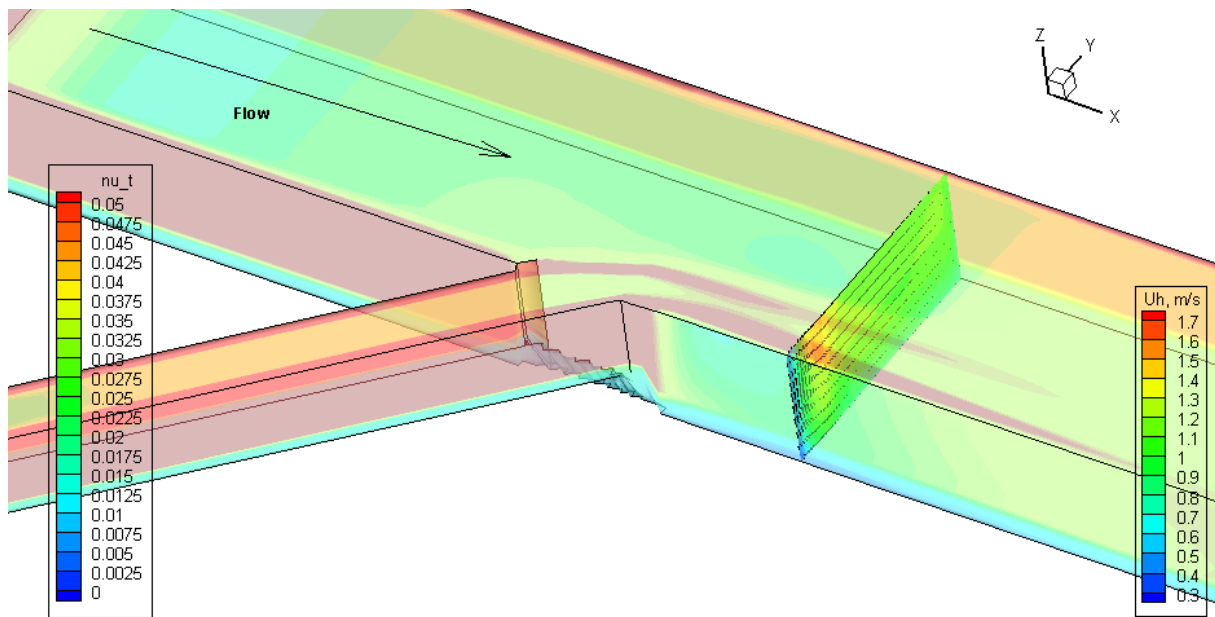
15. ábra Örvényviszkozitás és horizontális irányú eredő sebességvektorok alakulása 40 m x 20 m cellafelbontás esetén

A továbbiakban a torz cellákkal modellezett torkolati szakasszal folytatom. Láthatólag a hordalékeloszlás tekintetében nincs igazán nagy eltérés a referenciamodellhez képest (16-17. ábra). További alapos vizsgálatra volna szükség, hiszen egy ilyen jellegű cellakiosztás nagyobb léptékű csóvaszétterülést kellene, hogy eredményezzen, mindenesetre az alkalmazott modell az eredmények alapján nem tűnik érzékenynek a rácsvonalak és az áramvonalak által bezárt szögre, ahogy azt vártuk volna. Kirajzoltattam a keresztmetszvény menti sebességeloszlásokat, melyekből láthatjuk, hogy függőleges irányú csavaráramlások jönnek létre, valószínűleg a

torkolatnál lévő szintkülönbség miatt. Az örvényviszkózitás szintén a torkolatnál és a partok mentén a legnagyobb, ahogy az várható is volt.



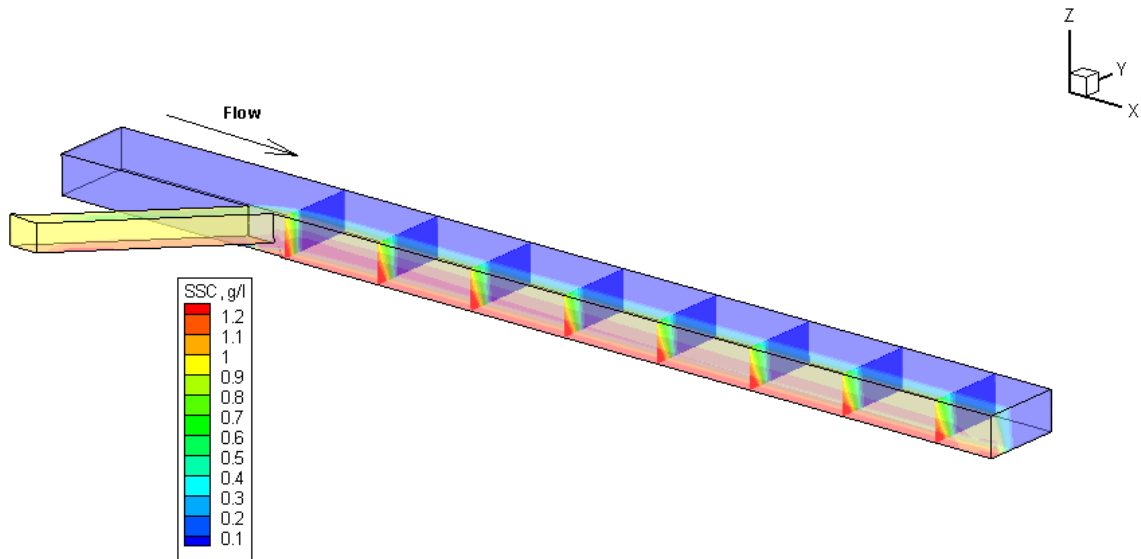
16. ábra Lebegtetett hordalékeloszlás alakulása torz cellakiosztás esetén



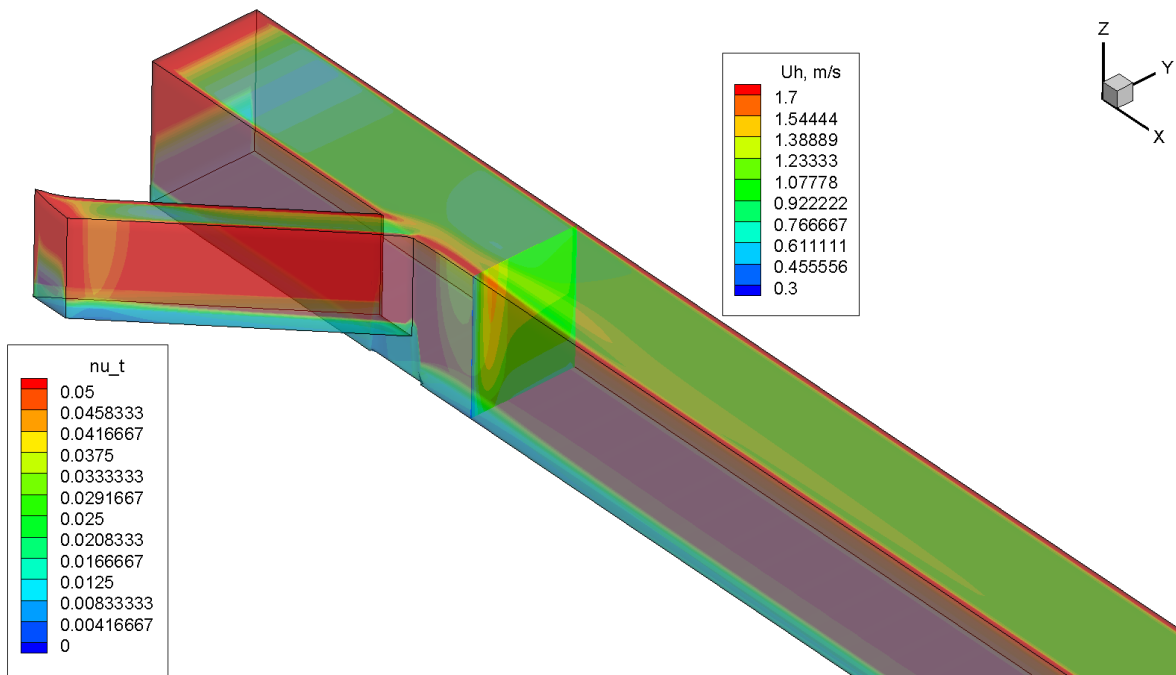
17. ábra Keresztirányú sebességek, örvényviszkózitás és horizontális eredő sebességek alakulása torz cellakiosztások esetén

A következő négy ábrán (18-21. ábra) két különböző turbulenciamodell eredményei láthatók. A $k-\varepsilon$ RNG nagyon hasonlóan viselkedik, mint a referenciamodellben használatos $k-\varepsilon$ turbulenciamodell. Az RNG típusú modellek egyébként a turbulencia-modell leírásában található konstansokban tér el az alapváltozattól, amit kisméretű örvények hatásának pontosabb leírására fejlesztettek ki (Yakhot et al., 1992). Azonban az egyszerűbb algebrai modell, szétkeni

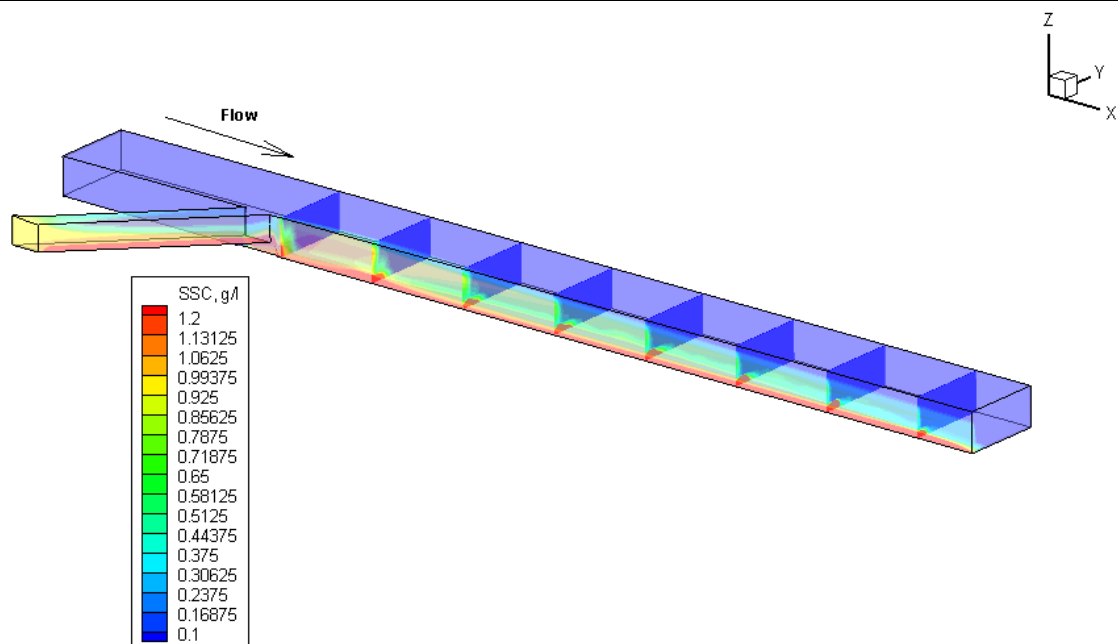
a csóvát, a sokkal magasabb diffúzió miatt. A kétegyenletes turbulencia-modellhez képest ez a sokkal egyszerűbb megközelítési mód bizonyosan hibával terheli az elkeveredés modellezését, aminek mértéke jelentős a bemutatott eredmények szerint.



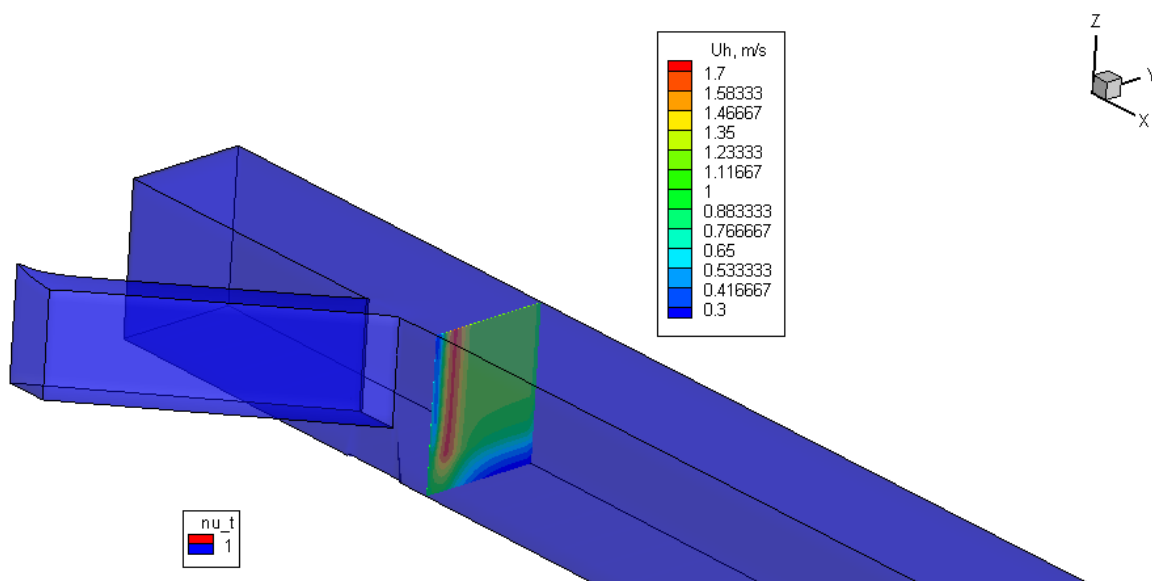
18. ábra Hordalékeloszlás $k - \varepsilon$ (RNG) turbulenciamodell esetén



19. ábra Örvényviszkozitás alakulása $k - \varepsilon$ (RNG) turbulenciamodell esetén



20. ábra Hordalékeloszlás alakulása algebrai turbulenciamodell esetén



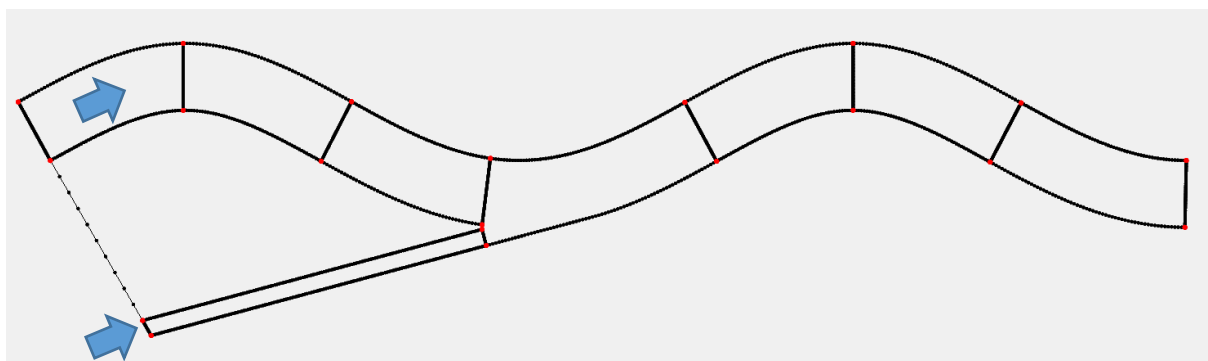
21. ábra Örvényviszkozitás alakulása algebrai turbulenciamodell esetén

Elvégeztem még a szimulációt cellakiosztást 10 m x 5 m-re állítva, másodrendű advekción sémával, 5 illetve 20 függőleges réteggel (az eredményeket lásd a függelékben 37-44. ábra). A 10 m x 5 m-es cellakiosztás nem eredményezett annyival nagyobb pontosságot, mint amennyivel a számítási kapacitás megnőtt. A másodrendű advekción sémával futtatott modell jobban leírta a másodlagos áramlási struktúrákat, mint az elsőrendű, ezért a következő fejezetekben már ezt a sémát alkalmazom. A 20 függőleges réteg túlzottan megnöveli a számítási igényt és hasonlóan az előbb említett változathoz, nem nyújt annyival nagyobb

pontosságot, hogy megérje alkalmazni ilyen kicsi csatornán. A függőlegesen 5 cellával leírt folyómodell pedig az örvényviszkózitást valószínűleg pontatlanul számolja. Ennél azért részletesebb felbontást igényel a feladat.

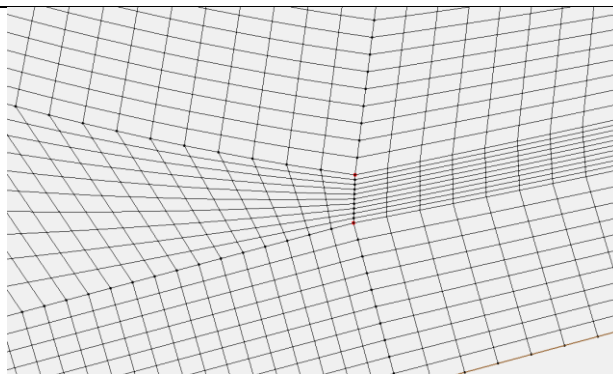
7.4 Helyszínrajzi vonalvezetés hatása az elkeveredési viszonyokra

Mint korábbi kutatásokból kiderült (Biron et al.,2004), nagy szerepe van az elkeveredés milyenségében a folyó betorkollási szögének. Úgy hisszük, minél nagyobb a betorkollás szöge, az elkeveredés, annál intenzívebben és gyorsabban megy végbe a torkolatot követő folyószakaszon. Azért, hogy ebben megbizonyosodhassunk, modelleket készítettem a már korábban említett módon 15° , 30° , 90° -os összefolyással, egy extra változtatással. Másodrendű advekción sémát használok minden egyes futtatáshoz, mivel az áramlási viszonyokat így pontosabban írja le a modell. Az eddigi esetek mind egyenes csatornák találkozását szimulálták, de a valóságban a Duna Gönyű környékén erősen meanderezik a torkolat közelében is. A meanderezést egy kellően torzított szinuszos hullámmal közelítettem az alábbi módon (22. ábra):



22. ábra Szinuszosan meanderező folyó

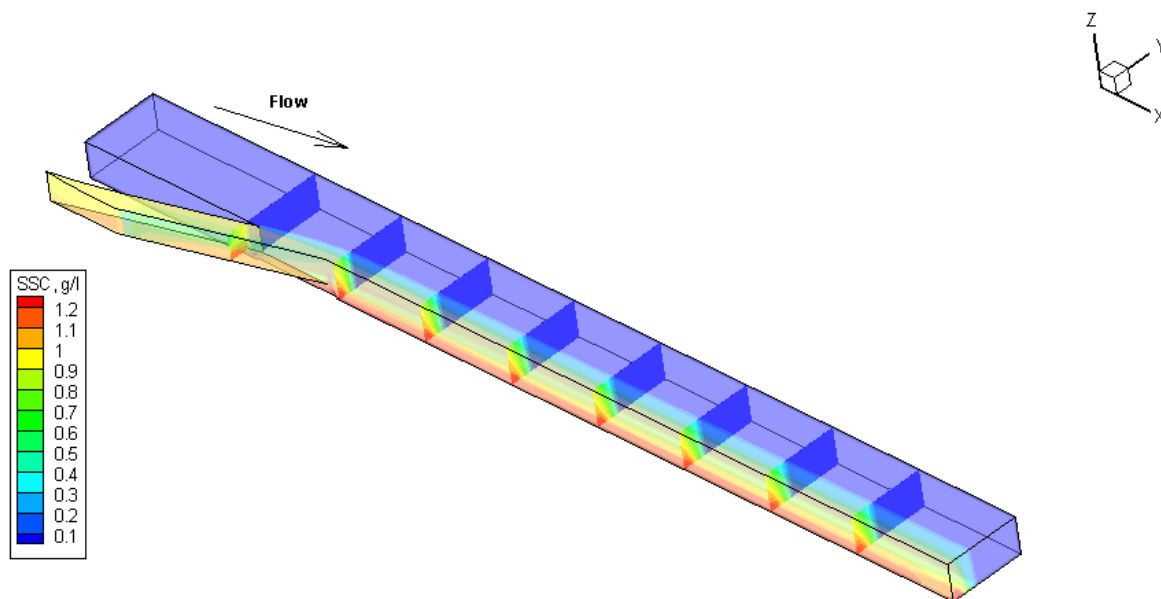
A nehézséget a sziget leírása okozta ennél a kialakításnál. Ahhoz, hogy a modell stabil maradjon, egy rácspontba csak 4 él futhat be. Ennek okán, ahogy Baranya et al. (2013) alapján a szigetet több cellával írtam le (szám szerint 10 db sor), amik egészen a torkolatig ki lettek kapcsolva, majd a folyók találkozásától a mederbe beolvadva futnak egészen a modell végéig. Ez látható az alábbi ábrán (23. ábra):



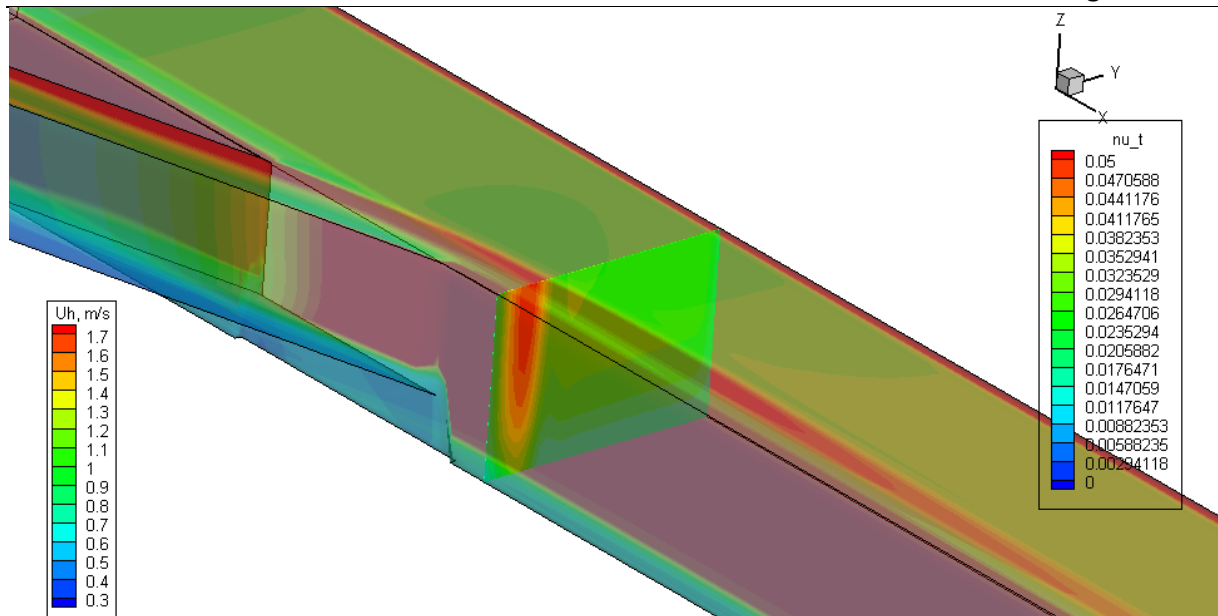
23. ábra Sziget leírása 2D rácsháló esetén a stabilitás megtartása érdekében

7.4.1 Eredmények értékelése

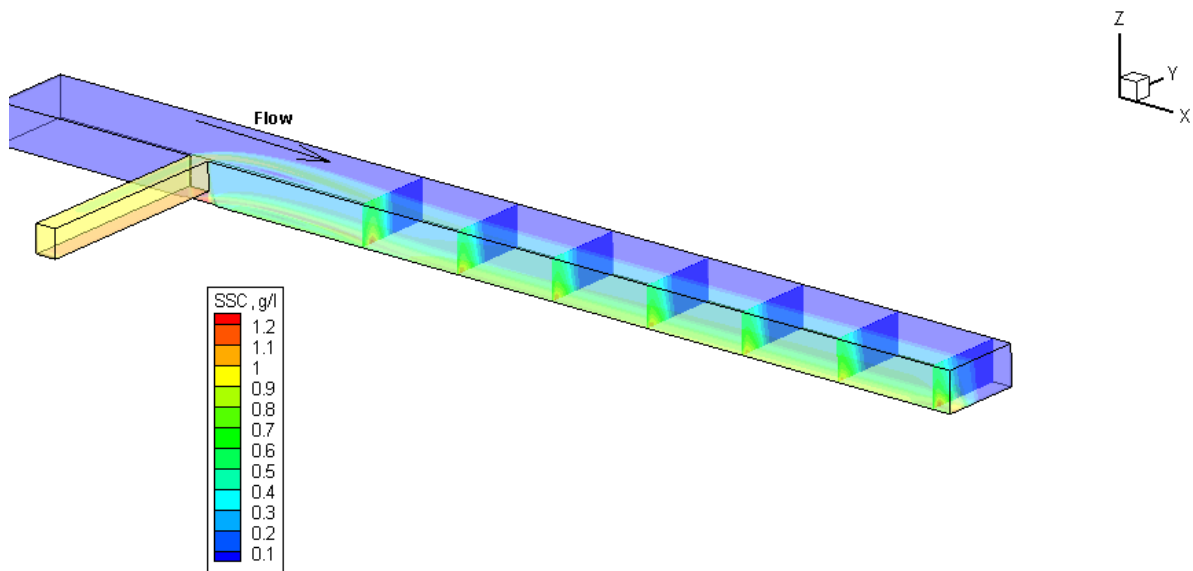
A 15 °-os betorkollás nagyobb áramlási sebességeket eredményez, ezzel együtt a főmederben a hordalék elkeveredés is hatékonyabb, bár a csóva oldalirányban nem terjed szét (24-25. ábra). A hordalék szinte egy csomóban úszik az őt szállító közegben. 90°-os összefolyásnál viszont a part mentén szinte állóvíz alakul ki, a sebességvektorok a folyó közepe felé mutatnak, a legnagyobb turbulencia is ott keletkezik ezáltal (26-27. ábra). A csóva elkeveredése igen jelentős, már rövid időn belül is jól kimutatható.



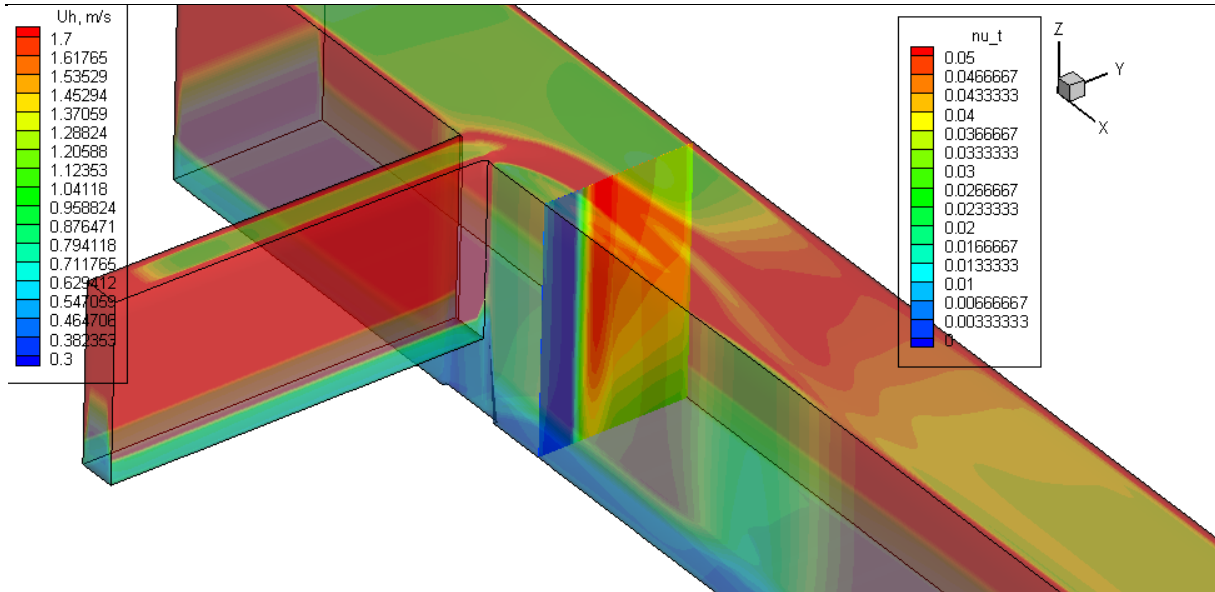
24. ábra Hordalékeloszlás alakulása 15°-os betorkollás esetén



25. ábra Örvénviszkozítás és horizontális eredő sebesség eloszlás 15°-os betorkollás esetén

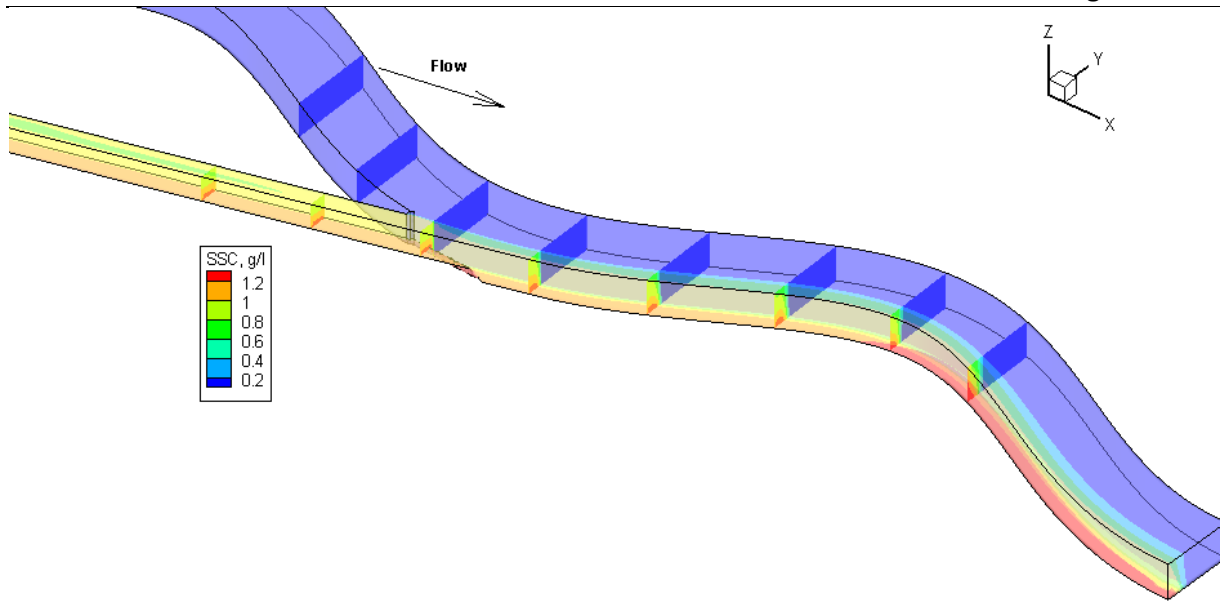


26. ábra Hordalékeloszlás alakulása 90°-os betorkollás esetén

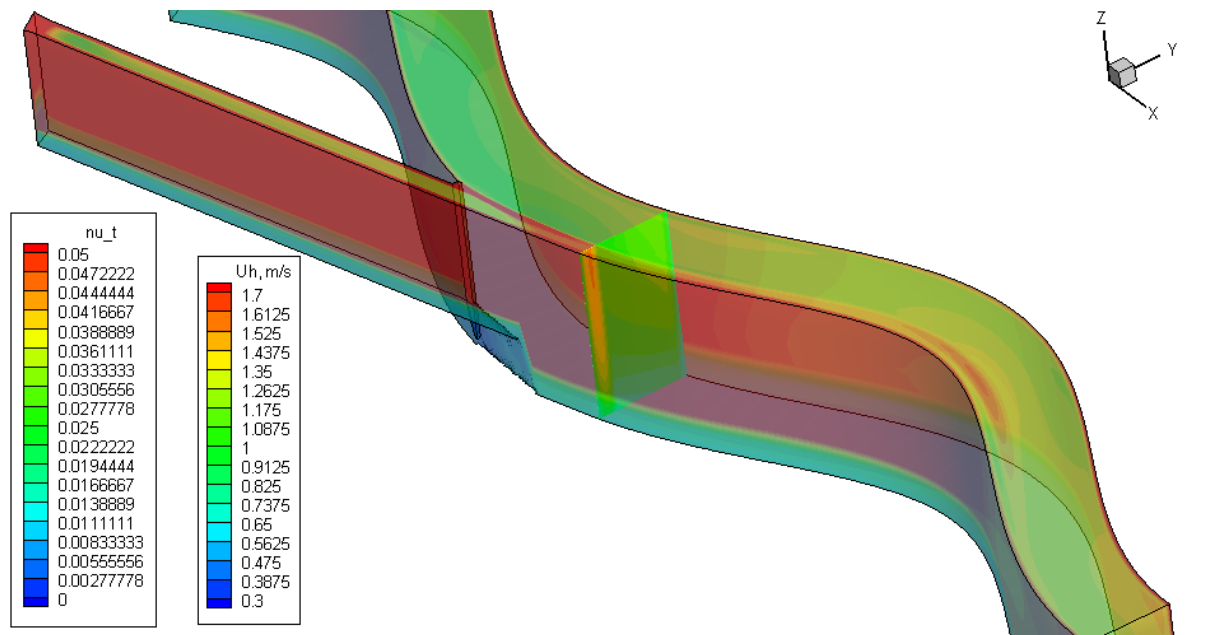


27. ábra Örvényviszkozitás, horizontális eredő sebesség alakulása 90°-os betorkollás esetén

A szinusz hullámot követve meanderező csatorna 15°-os betorkollással első ránézésre semmi újat nem mond nekünk a torkolat közvetlen környezetében (28-29. ábra). Azonban alvízi irányba haladva, az ívekben érdekességet figyelhetünk meg. Ugyanúgy, mint a valóságban a csóva kiszélesedik a folyó középvonala felé domboruló ívekben, majd ezután újra összeszűkül. Ezt a jelenség több ívben is tetten érhető egymás után a Dunán. A hordalékcsóva ilyen, térben változó jellegéért a csavaráramlási struktúrák felelnek, ami a vízfelszín közelében a homorú part felé tereli az áramlást, míg a mederfenéknél a domború part felé. Az eredmények alátámasztják a 3D leírás szükségességét, hiszen mélységátlagolt modellek segítségével ez a jelenség nem szimulálható.



28. ábra Hordalékeloszlás alakulása szinuszosan meanderező csatorna esetén



29. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlás alakulása szinuszosan meanderező csatorna esetén

Továbbá elvégeztem még 30°-os betorkollással a szimulációt. Az eredmények igen hasonlóak mint a 15°-os esetben (lásd függelék 45-46. ábra).

7.5 Vízhozam-arány hatása az elkeveredési viszonyokra

Korábbi tanulmányokban már olvashattunk róla (Biron et al., 2004), hogy nem csak az eddig vizsgált paraméterek, geometriai hatások tudják befolyásolni az elkeveredés gyorsaságát. Döntő szerepe van a folyókon megjelenő vízhozamoknak is. Ennek okán a következő vízhozam arányokkal végeztem további futtatásokat ($Q_m - Q_{main}$; $Q_t - Q_{tributary}$):

- $Q_m=1100 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_t=70 \text{ m}^3/\text{s}$,
- $Q_m=5500 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_t=70 \text{ m}^3/\text{s}$.

Azt várom, hogy minél nagyobb vízhozam érkezik az egyes folyókra, annál intenzívebb lesz az elkeveredés a torkolat közelében.

Korábban említettem, hogy az SSIIM2 szoftver csak kifolyási vízszint megadásával tud számítást elindítani. Ezt a szintet az aktuális vízhozamokból, és a csatorna ismert geometriai jellemzőiből számoltam a következő módon (Hidraulika I. Hefop, 2004):

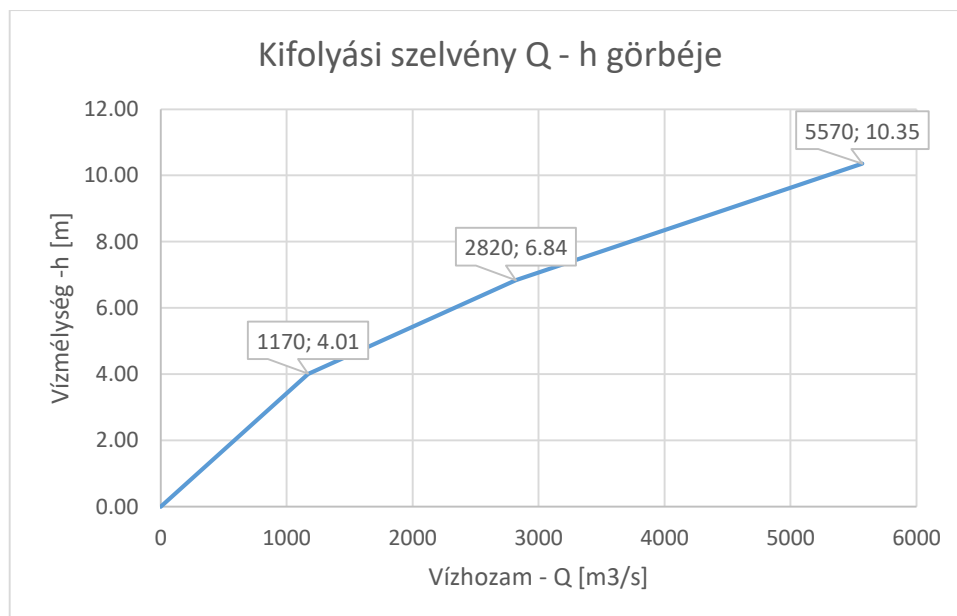
Fixponti iterációval a Chézy-képletet megfelelően átrendezve kifejezhető az alábbi összefüggés:

$$h = \frac{\left(\frac{nQ(2h+b)^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{S}} \right)^{\frac{3}{5}}}{b} = f(h)$$

ahol:

- h – vízmélység,
- n – érdesség,
- Q – összesített vízhozam,
- b – csatorna kifolyási szelvényének szélessége,
- S – fenékesés.

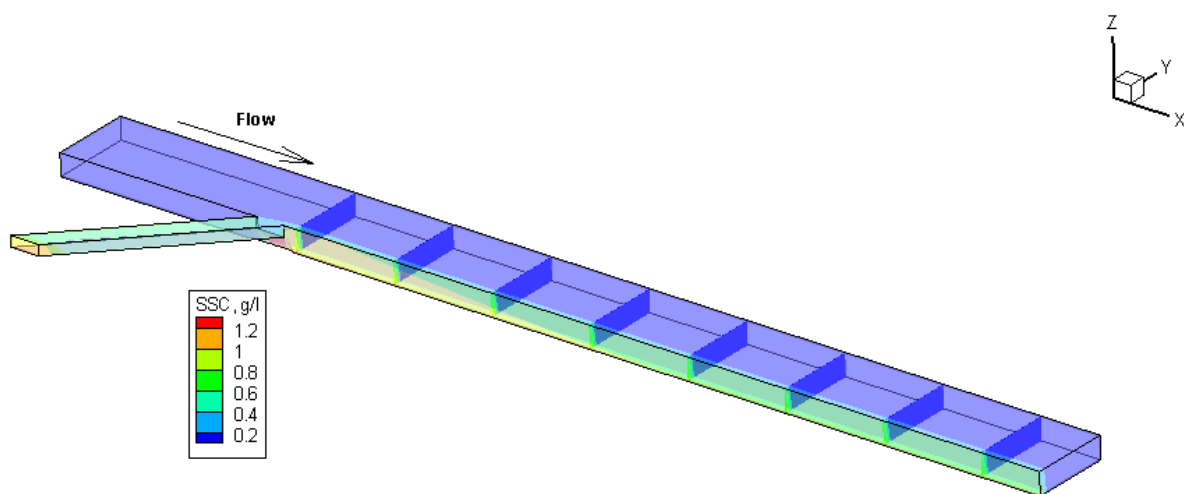
A h ciklikus visszahelyettesítését ismétljük, míg a kapott érték és az előző érték közötti eltérés kellően kicsi nem lesz. Az így kapott $Q - h$ görbe a következő (30. ábra):



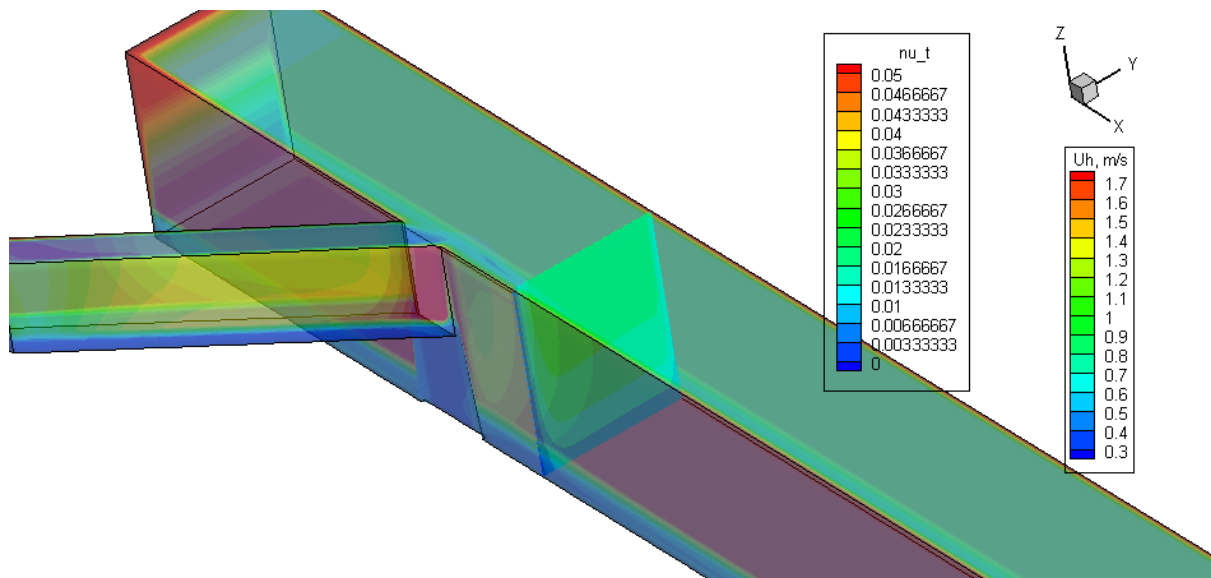
30. ábra Kifolyási szelvény $Q - h$ görbéje

7.5.1 Eredmények értékelése

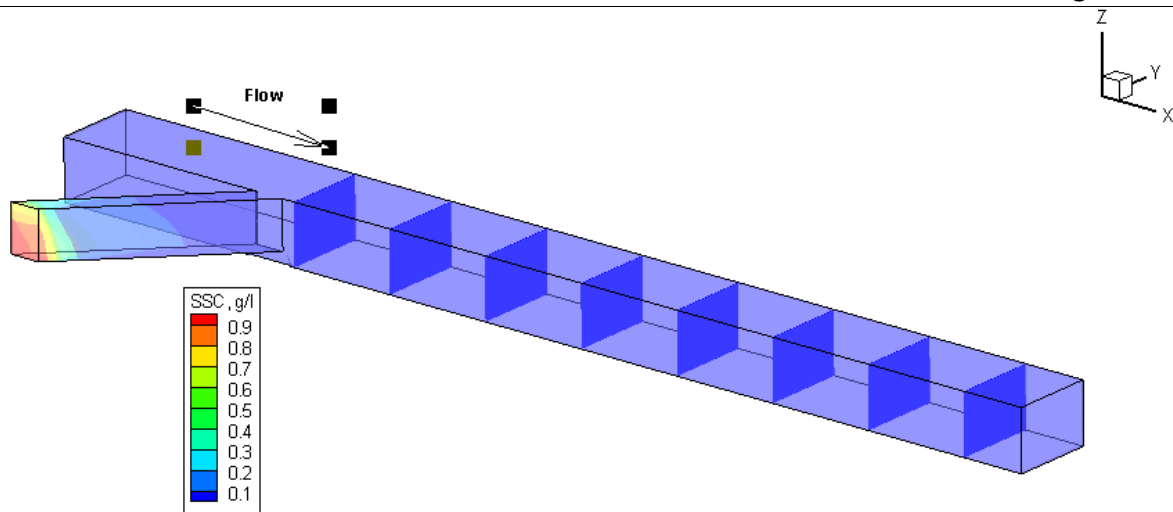
Ha alacsony vízhozamokat engedünk be mindkét folyó befolyási peremén (31-32. ábra), a lebegtetett hordalékszállítás is kisebb lesz. Az alacsony vízhozam, lassabb áramlási sebességeket eredményez, így a torkolatnál lévő lépőcsőnek még nagyobb szerepe lesz az elkeveredésben. Látható, hogy amint belép a csóva a főmederbe, egy kis időre megreked. A jobb parthoz húzódik, majd lassan elkeveredve terjed tovább. Ha a mellékfolyóra alacsony vízhozamot állítunk be, a főfolyóra pedig nagyot (33-34. ábra), tapasztalhatunk némi visszaduzzasztást a főfolyó irányából, ezért a mellékfolyóban érkező hordalék, egyáltalán nem, vagy csak nagyon csekély mennyiségben jut a főmederbe. Sem a sebességeloszlást, sem az örvényviszkózitást tekintve nem alakul ki összetett struktúra a főmeder szelvényei mentén.



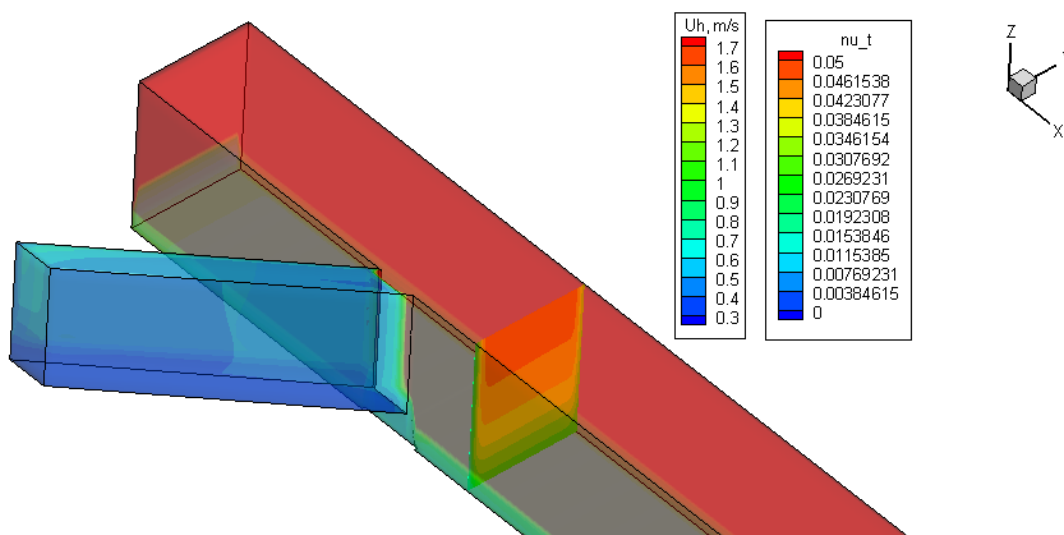
31. ábra Hordalékeloszlás alakulása kis vízhozam arány esetén



32. ábra Örvényviszkózitás és horizontális sebességeloszlás alakulása kis vízhozam arány esetén



33. ábra Hordalékeloszlás alakulása nagy vízhozam arány esetén



34. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességek alakulása nagy vízhozam arány esetén

8 Elkeveredés vizsgálatok valós esettanulmányon keresztül

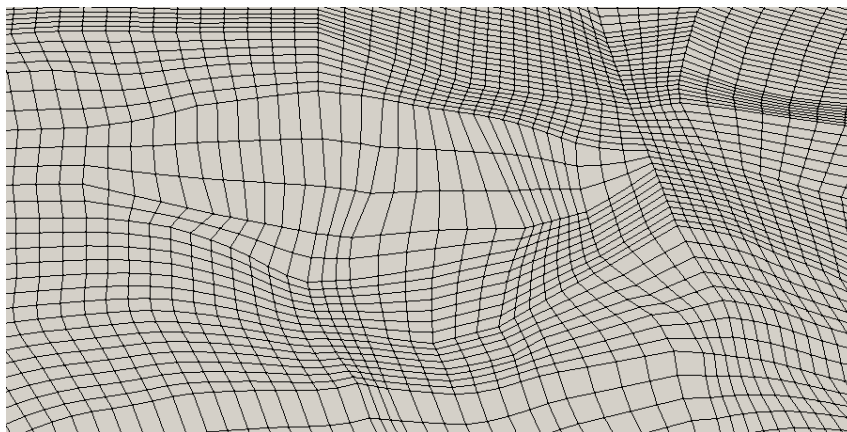
Az előzőekben mind egyszerűsített tesztszatórnákon folytak a kísérleteim, most egy valódi Duna szakaszra felépített modellel tesztelem az előzőekben alkalmasnak talált beállításokat. A korábban ismertetett okok miatt a modellvizsgálatok alapját a Gönyű közelében lévő Mosoni-Duna és Duna összefolyása képezi. A modell felépítéséhez terepi mérésen vettem részt 2018.06.19-én. ADCP (Acoustic Doppler current profiler) segítségével mozgóhajós méréseket végeztünk a Dunán több szelvényben (többek között a torkolat alatt, felett, gönyűi vízmérce szelvényében). Az ADCP mérésekből a meder fenékszintjét, vízhozamot, sebességeloszlást és lebegtetett hordalék eloszlását tudtuk feltérképezni az adott szelvények mentén. Továbbá közvetlenül izokinetikus mintavevővel lebegtetett hordalék mintákat is vettünk. Az eredményeket lásd Pomázi et al. (2018). Megjegyzendő, hogy a méréskor a Rábán egy kisebb árhullám vonult le, aminek eredményeképpen a lebegtetett hordaléktartalma megemelkedett és a fenti műholdfelvételen is látható módon, egy hordalékban gazdag csóva érkezett a torkolathoz.

Kiindulási alapadatok:

- Hidrológiai alapadatok (2018.06.19. mérések alapján):
 - Q_{Duna} : 1810 m³/s,
 - $Q_{\text{Rába}}$: 75 m³/s,
 - $Q_{\text{Mosoni-Duna}}$: 53 m³/s.
 - Kifolyási vízszint: 106.68 mBf. (5 cm/km lejtést feltételezve a főmederre, gönyűi vízmérce 0 pontjáról számolva)
- Geometriai alapadatok:
 - raszteres terepmodell,
 - 2016-os mederfenék felmérések,
 - korábbi modellrácsosháló alkalmas cellakiosztással,
 - Ortofotó a területről,
 - CAD rajz a területen megtalálható műtárgyak pontos helyzetével.
- Bemeneti hordalék jellemzők:
 - hordalékfrakció:
 - szemátmérő 0.01 mm
 - lebegtetett hordaléktöménység:
 - $c_1 = 18,55$ mg/l,
 - $c_2 = 1,06$ g/l.

Modellépítés folyamata:

Első lépésben a 2D rácshálót kellett megszerkeszteni SMS-ben, arra ügyelve, hogy a négyszögek belső szögei közel 90° -osak legyenek a stabilitás miatt. Alapvetően a főmedret 5 m x 20 m-es cellakiosztással próbáltam meg leírni. A hullámtéri részekben elegendőnek bizonyult, ha 15 m x 20 m-es cellakiosztást tartani tudtam. A Duna vizsgált szakaszán igen sok mellékág, holtág, kis sziget található, ezért helyenként hosszirányban sűríteni kellett a cellafelbontást, a pontosabb eredmény érdekében, ahogy azt az alábbi ábrán is láthatjuk (35. ábra):

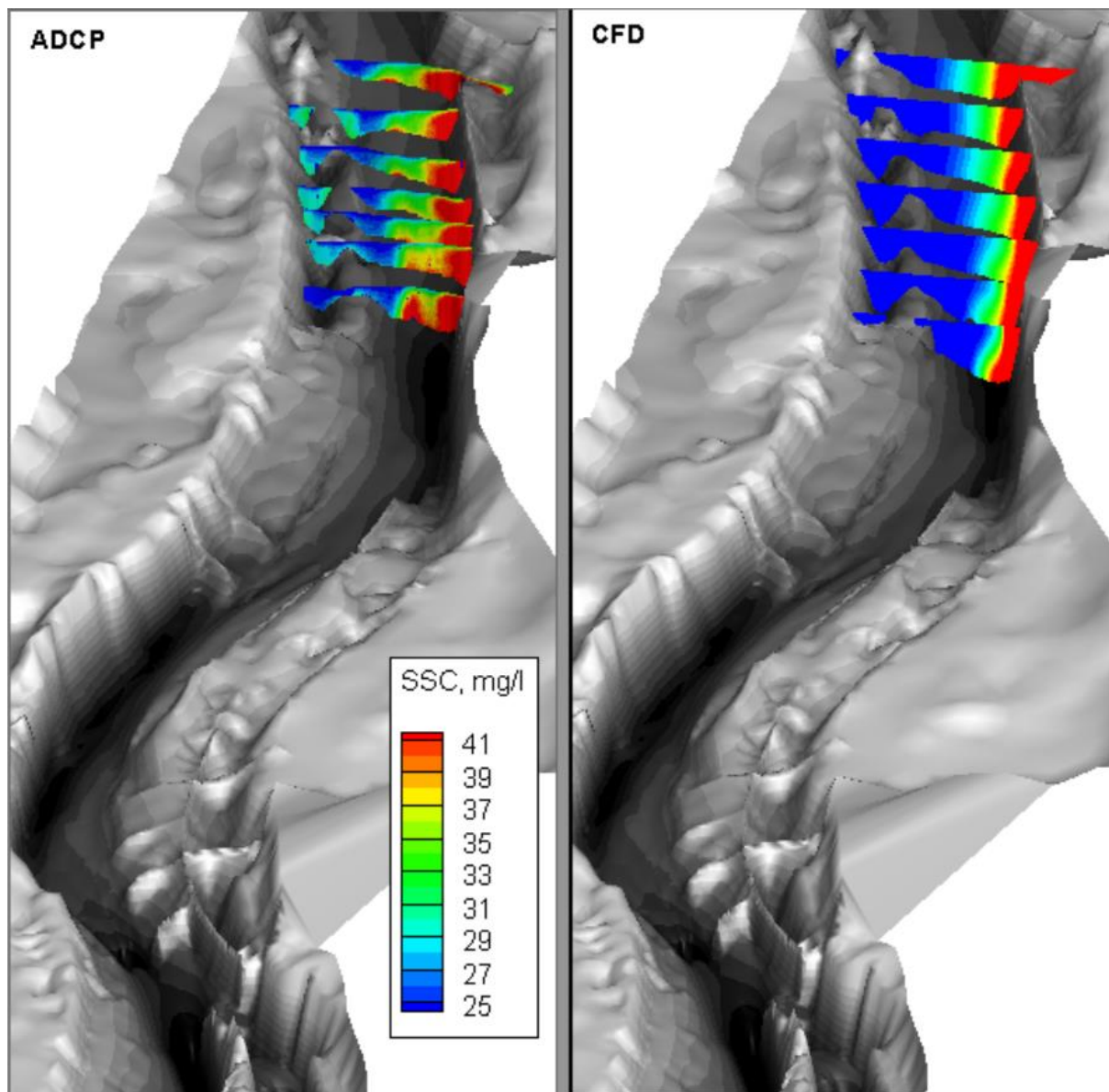


35. ábra Korrigált torz cellák a vizsgálati területen

További nehézséget okoztak még a sarkantyúk, vezetóművek leképezései. Igyekeztem ezeket a műtárgyakat minimum három ponttal leírni oly módon, hogy ahol volt mérési eredményem, ott konstans magasságot definiáltam, ahol pedig nem rendelkeztem adattal, ott az aktuális terepmodellből vettem a magassági értékeket. Azokat a poligonokat, amelyek a vízszállításban nem vesznek részt, kikapcsoltam a későbbiekben. A modell mindkét szélén kellően magas partfalat definiáltam, hogy ne kerülhessenek előntésre a kikapcsolásra szánt cellák. Ez a magassági érték konstans 130,0 mBf. volt. A nagyobb pontosság elérése érdekében létrehoztunk a 2016-os mérési eredményekből egy 5 m x 20 m-es felbontású terepmodellt a Duna medrére SMS és SSIIM1 szoftverek segítségével. A cellakiosztás és terepmodellek elkészültével, nem volt más hátra, mint beállítani az egyes poligonok magassági értékeit, rácsozás típusát (patch), valamint a területhasználati osztályokat. Ezután le tudtam generálni a rácshálót, ami már tartalmazta a magassági adatokat is minden egyes rácsponthoz. A rácshálót elmentettem .2dm fájlformátumba. Továbbiakban az SSIIM2 szoftvert alkalmaztam. A már korábban leírt módon elkészítettem a control, koosurf (kifolyási vízszintet 5 cm/km lejtéssel vettem figyelembe), unstruc fájlokat, lefuttattam a hidrodinamikai modellt, kimentettem az

eredményfájlokat (result, bedres.t, unstruc). Elkészítettem a timei és módosított control fájlkat, majd futtattam a hordaléktranszport modellt.

A modell által kapott eredményeim bizakodásra adnak okot. A következő ábrán (36. ábra) egy összehasonlítást láthatunk egy ADCP-vel mért (ennek részletei lásd: Pomázi et al., 2018) és az általam modellezett lebegtetett hordalékeloszlás több keresztaszelvény menti eloszlásáról.



36. ábra Terepi mérés (bal) és modellezett eredmény (jobb) összehasonlítása (áramlási irány lentől fel)

A kép alján éppen látható a Mosoni-Duna betorkollása. A víz, ha a képet nézzük, a torkolattól, a megjelenített szelvények felé folyik. A második megjelenített szelvény az a szelvény, amelyben a jövőben a monitoring állomást tervezik létesíteni. Látható a képen, hogy térben igen összetett hordalékeloszlás alakult ki. A korábbi fejezetben bemutatott eredmények alapján nem meglepő, hogy a hordalékban gazdag hozzáfolyásból érkező csóva a jobb parthoz szorulva

jelenik meg a vizsgált zónában. A mérési adatok ezt jól alátámasztják, sőt a bal parti sarkantyúk hordalékcsapdázó hatása is megjelenik a lokálisan magasabb töménység értékekkel. A szimulációs eredmény jól mutatja a csóva hasonló viselkedését. A jobb parthoz szorulva érkezik a jövőbeli monitoringállomás szelvényéhez, csekély keresztirányú elkeveredést mutatva. A kezdeti magas töménységértékek (Mosoni-Duna felől 1000 mg/l) jóllehet jelentősen lecsökkentek a Duna hatására, de ez a térbeli eloszláson kevésbé mutatkozik meg, amit döntően a lokális 3D áramlási struktúrák eredményeznek. A modell a bal parton megnövekvő értékeket nem reprodukálja, ami annak köszönhető, hogy nem jut arra a területre finom hordalék. Kérdéses, hogy a terepi mérés megbízható-e ezen a területen, és ha igen, a Dunából érkező hordalék csapdázódik-e. Ennek a kérdésnek a megválaszolása további helyszíni méréseket tesz szükségessé.

9 Eredmények összefoglaló értékelése

Az egyszerűsített geometriájú tesztszatórnákon végzett szimulációk eredményeiből jól látszott mely beállításokra érzékeny és kevésbé érzékeny az alkalmazott numerikus eszköz. Nem célravezető, ha a számítási kapacitás csökkentése érdekében durvább rácsfelbontást alkalmazunk, mert pontatlanabb eredményeket kaphatunk, ami az áramlási struktúrákat illeti. Másfelől az indokolatlanul nagy rácsfelbontással olyan területeket írhatunk le nagy pontossággal, amik nem igazán relevánsak a kutatás szempontjából. Egy Duna méretű folyó esetében a korábbi és az itt szerzett tapasztalatok alapján célszerűen hosszirányban átlagosan 20 m, keresztirányban átlagosan 5 m cellaméretben gondolkodni, a hullámtér leírása lehet durvább is, pl. 10-15 m x 20 m. A modelleredmények igazolták, hogy körültekintően kell eljárni a turbulenciamodellel és advekciónak sémá megválasztásánál. Bonyolultabb turbulencia-modellek, mint pl. az itt tesztelt $k-\varepsilon$ modell, magasabb számítási igényt támaszt a több keresett ismeretlen miatt az algebrai modellekhez képest, bár utóbbi jelentősen eltérő eredményt produkált éppen az örvényviszkózitás kevésbé pontos becslése miatt. Magasabb rendű advekciónak sémák (itt másodrendűt teszteltünk) a másodlagos áramlási struktúrákat, vagy a visszaforgó áramlásokat pontosabban le tudják írni, de a modellek instabillá is válnak. A számítási cellák minél szabályosabb kialakításával az instabilitás csökkenthető. A modelleredményekből látszott az is, hogy a torkolati geometria, jelen esetben a torkolat szintkülönbséggel való beépítése, magasabb örvényviszkózitást eredményez, ami a hordalékcsova intenzívebb elkeveredését okozza. Láthattuk, hogy a becsatlakozás szögének is hatása van az elkeveredésre, ezért egy esetleges torkolati átalakítás során ez szempont lehet. Fontos eredménynek tartom, hogy sikerült az összes csatorna esetében bebizonyítani, hogy az áramlási viszonyok miatt „tapad” a jobb parthoz a hordalékcsova, amit a valós műholdfelvételeken is láthattunk, vagyis az áramlási jellemzők pontos számítása elengedhetetlen az elkeveredés megfelelő szimulációjához.

A dunai esettanulmányon elvégzett szimuláció alapján a modellt alkalmasnak találtam az elkeveredési viszonyok szimulációjára, de rámutatott több kérdésre is, amik a jövőben vizsgálandók. Az eredmények alapján az alábbi következtetéseket vontam le:

- A terepi méréskor jellemző vízjárási állapotban reprodukálható volt, hogy a hordalékcsova a Duna jobb partjához közel terjed és csekély keresztirányú elkeveredés jellemzi.
- A megfelelő modellparaméterezés miatt kiemelten fontos, hogy egyidejű mérési adatokkal rendelkezünk a Duna, Mosoni-Duna és a Rába áramlási és hordalékviszonyairól.

- A modellezés pontosításához további terepi hordalékmérések szükségesek. Kis és nagyvíz idején egyaránt.
- Mivel a folyószabályozási művek fontos szerepet játszanak az áramlás alakulásában, szükséges azok geometriájának pontos bemérése a torkolat feletti szakaszon.
- A szelvényben, ahova a monitoring állomást terveznek telepíteni, meglehetősen összetett lebegtetett hordalékeloszlás és áramlási viszonyok jellemzők. Szükséges tovább fejleszteni a felépített 3D modellt, hogy alaposabban megérthessük a hordalék vándorlását ezen területen, következtetéseket tudjunk levonni a majdani monitoring állomás üzemeltetésére.
- A numerikus modellt valós mérésekből származó bemeneti adatokkal is futtatni kell, hogy ne csak az áramlás jellegét tudjuk kimutatni, hanem a tényleges hordalékháztartás is reprodukálható legyen.
- További vizsgálatokat kell végezni az alkalmazott turbulencia modelleket illetően.

Összességében elmondható, hogy az itt bemutatott 3D numerikus modellesztek mind a sematikus csatornára, mind a Dunára fontos eredményeket közöltek, amik jövőbeli vizsgálatoknál figyelembe veendőek. Hosszabb távon a kiválasztott modell alkalmas lehet a fent ismertetett lebegtetett hordalékmonitoring állomás geometriai, műszerezettségi és üzemeltetési feltételeinek megválasztására és közvetett módon pedig a dunai hordalékháztartás kvantitatív vizsgálataihoz is megfelelő eszközt szolgáltat.

10 Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani **Dr. Baranya Sándornak** és **Dr. Török Gergely Tihamérnek**, hogy szakértelmükkel támogatták a munkámat, vezették a témámat és mindig rendelkezésemre álltak, bármilyen problémám adódott.

Köszönettel tartozok **Pomázi Flórának**, aki kérdéseimre mindig készségesen válaszolt és fáradhatatlan munkájával járult hozzá dolgozatom haladásához.

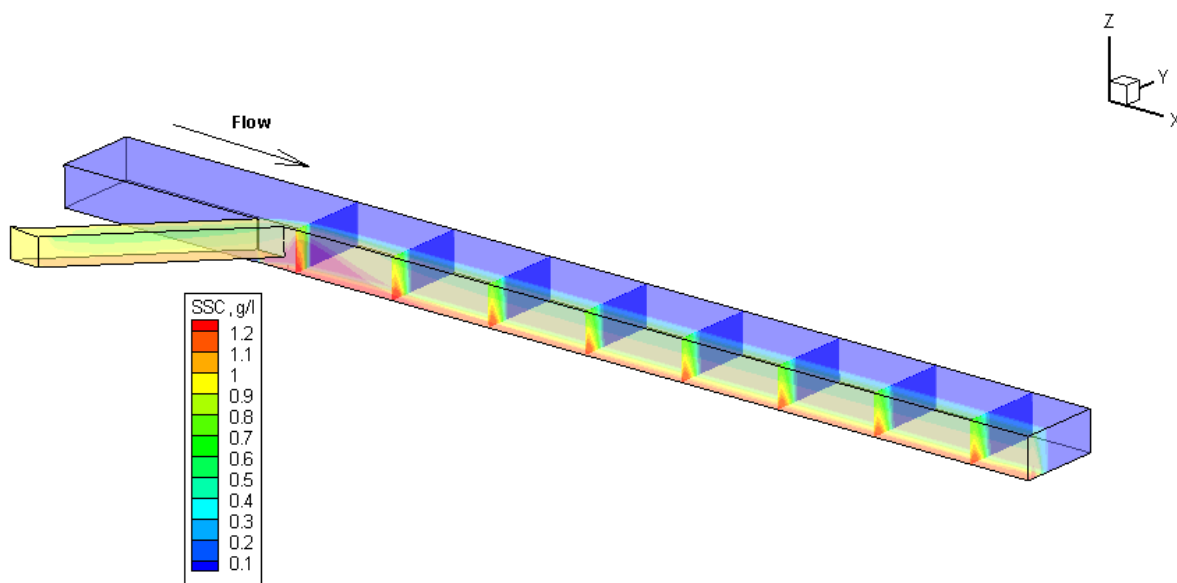
Köszönöm a **családomnak** és **Fischer Klaudia Mirtillnek**, akik végig buzdítottak és támogattam munkám során.

11 Irodalomjegyzék

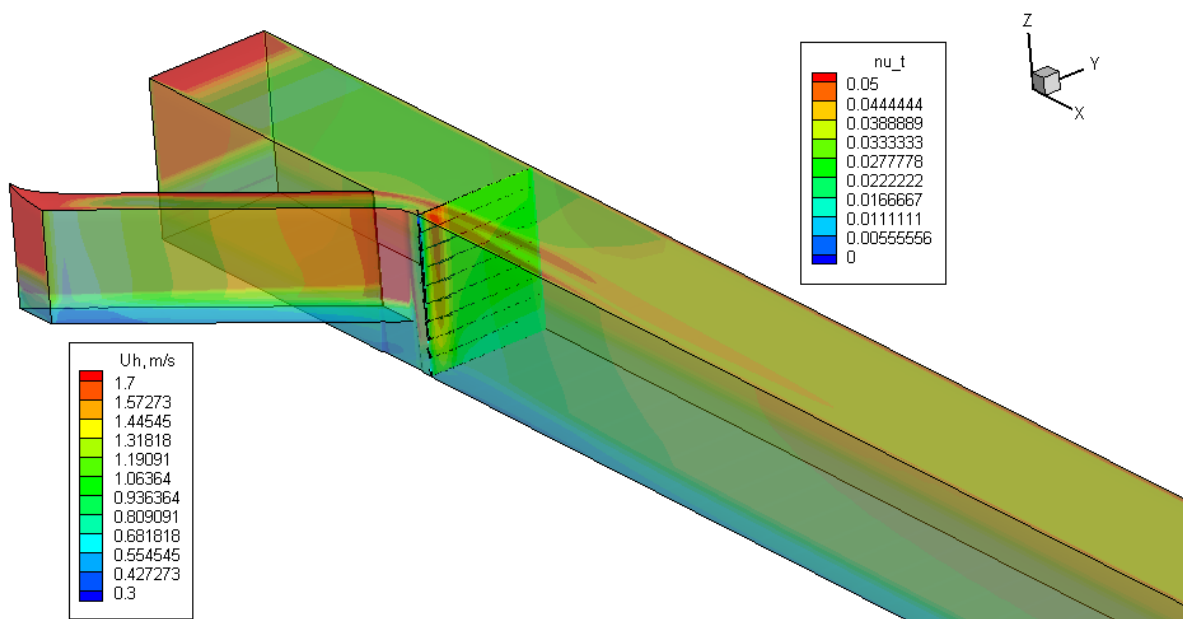
- [1.] Goda, L., Kalocsa, B., Tamás, E.A. (2007): River bed erosion on the Hungarian section of the Danube. *J. Environ. Sci. Sustain. Soc.* 1, 47–54.
- [2.] Habersack et al. (2016): Challenges of river basin management: Current status of, and prospects for, the River Danube from a river engineering perspective; In *Science of the Total Environment* 543, pp. 828-845.
- [3.] Holubová, K., Capeková, Z., Szolgay, J. (2004): Impact of hydropower schemes on bed load regime and channel morphology of the Danube river. In: Greco, M., Carravetta, Della Morte (Eds.), *Proceeding of the 2nd International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2004*. Taylor & Francis Group, Naples (Italy), pp. 135–142 (pub.).
- [4.] Nagyvízi Mederkezelési Terv 01.NMT.02. (Egyeztetési terv) Duna 1809.76 – 1786.00 fkm (2014) (<http://extranet.eduvizig.hu/nmkt/01.NMT.02.Duna.Gyorzamoly-Acs/01.NMT02.%201-3.%20fejezet%20Nagyv%C3%ADzi%20mederkezel%C3%A9si%20terv.pdf>)
- [5.] Nagyvízi Mederkezelési Terv 01.NMT.06. (Egyeztetési terv) Mosoni-Duna 118.36 fkm - Duna 1793.65 fkm (2014) (<http://extranet.eduvizig.hu/nmkt/01.NMT.06.Mosoni-Duna/01.NMT.06.%200-4.pdf>)
- [6.] Nagyvízi Mederkezelési Terv 01.NMT.09. (Egyeztetési terv) Rába 54.67 fkm - Mosoni-Duna 14.75 fkm (2014) (<http://extranet.eduvizig.hu/nmkt/01.NMT.09.Raba.Vag-Gyor/1-3.%20fejezet%20Nagyv%C3%ADzi%20mederkezel%C3%A9si%20terv.pdf>)
- [7.] Rákóczi L. (2000): A Duna meder sorsa Szap és Szob között, *Vízügyi Közlemények*, LXXXII. évfolyam, 2000. évi 2. füzet.
- [8.] Szombati Dóra Csilla (2016): A Szap-Gönyű közötti Duna-szakasz hidromorfológiai vizsgálata. BSc Diplomamunka. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék. Budapest.
- [9.] Varga-Lehofer, D. (2014): A felső-magyarországi Duna morfológiai változásainak elemzése. BSc Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék. Budapest.

- [10.] Zugor Péter (2017): A Duna lebegtetett hordalékadatainak elemzése. BSc Diplomamunka. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék. Budapest.
- [11.] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2004): Hidraulika I. HEFOP.
- [12.] Biron et al. (2004): Three-Dimensional Numerical Modelling of Mixing at River Confluences.
- [13.] Dordevic et al. (2006): Numerical simulation of the three-dimensional flow at the confluence of the Sava and Danube rivers.
- [14.] Baranya et al. (2013): Flow analysis a river confluence with field measurements and RANS model with nested grid approach.
- [15.] N. R. B. Olsen (2012): Numerical modelling and hydraulics, 3rd edition.
- [16.] N. R. B. Olsen (2011): A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multibloc koption. Version 1 and 2. User's Manual.
- [17.] Kutai Rebeka Debóra (2015): Lebegtetett hordaléktranszport terepi és számítógépes vizsgálata. Tudományos diákköri konferencia.
- [18.] Dr. Somlyódy László (1985): Szennyezőanyagok terjedésének meghatározása vízfolyásokban. Vízügyi Közlemények, LXVII. évfolyam.
- [19.] Dr. Clement Adrienne (2007): Vízminőség szabályozás felkészülési segédanyag.
- [20.] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2004): Hidraulika II. HEFOP.
- [21.] Yakhot et al. (1992) Development of turbulence Models for Shear Flows by Double Expansion Technique Physics of Fluids A, 4, 1510-1520.
- [22.] Pomázi et al. (2018): Mapping of suspended sediment mixing at a confluence zone to improve sediment monitoring of a large river.

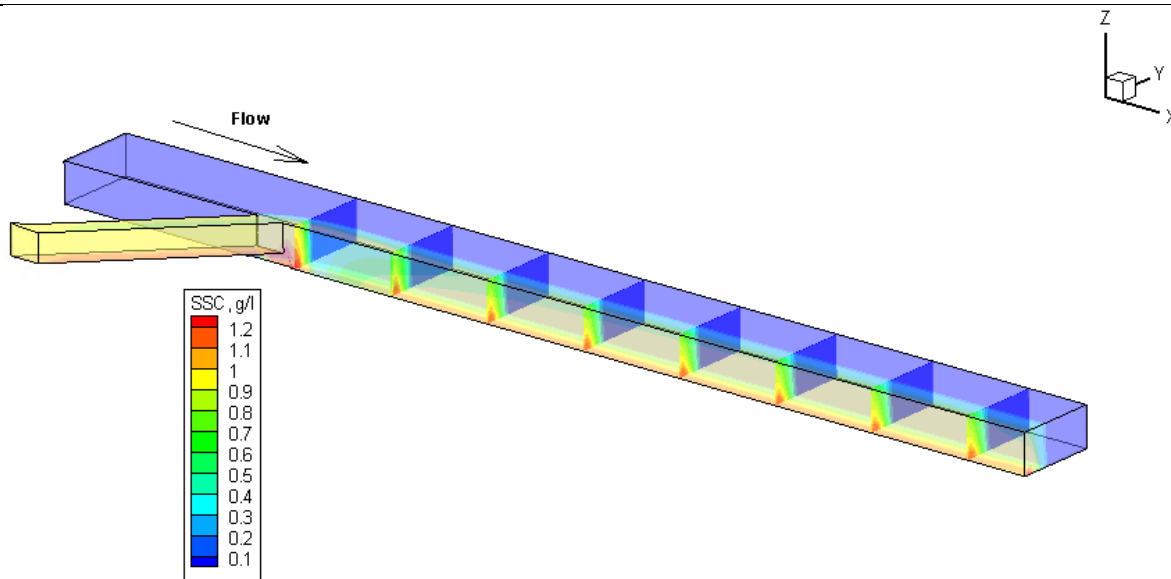
12 Függelék



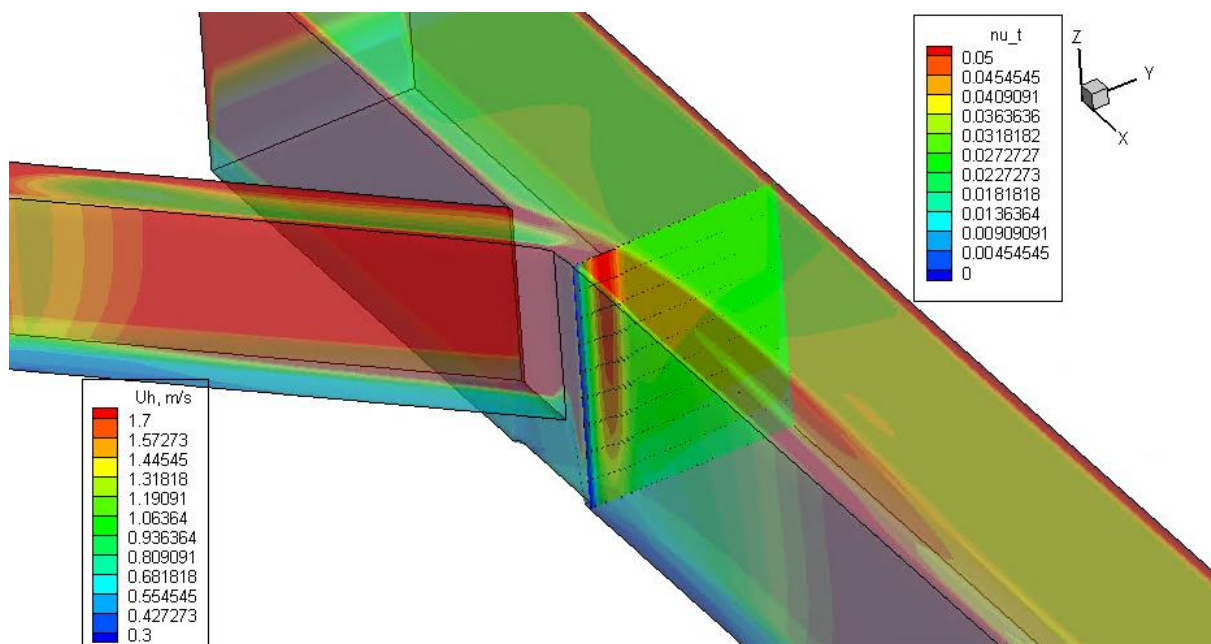
37. ábra Hordalékeloszlás alakulása 10 m x 5 m cellakiosztás esetén



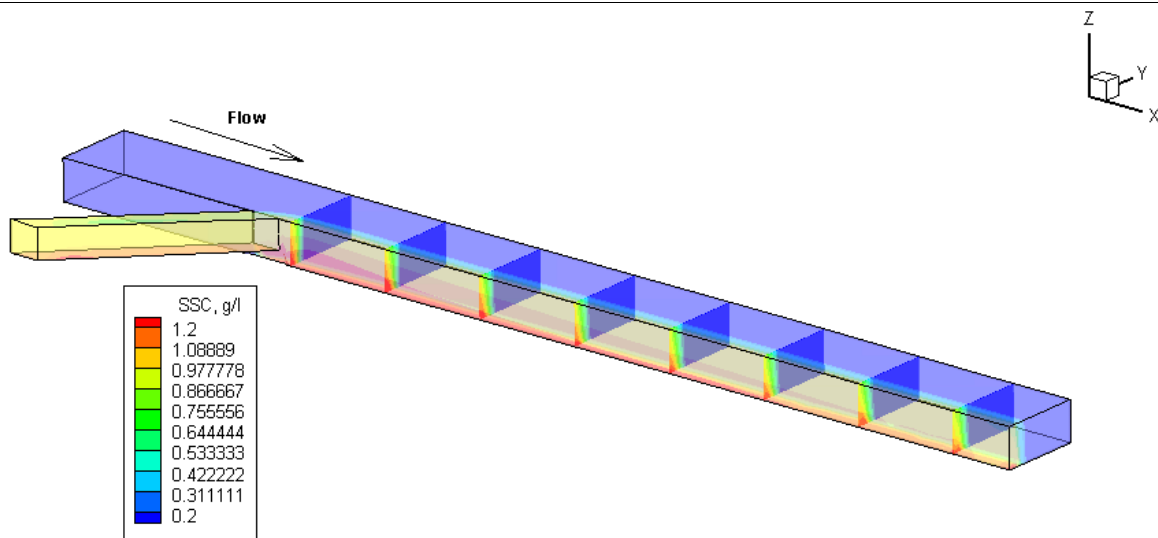
38. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlások alakulása 10 m x 5 m cellakiosztás esetén



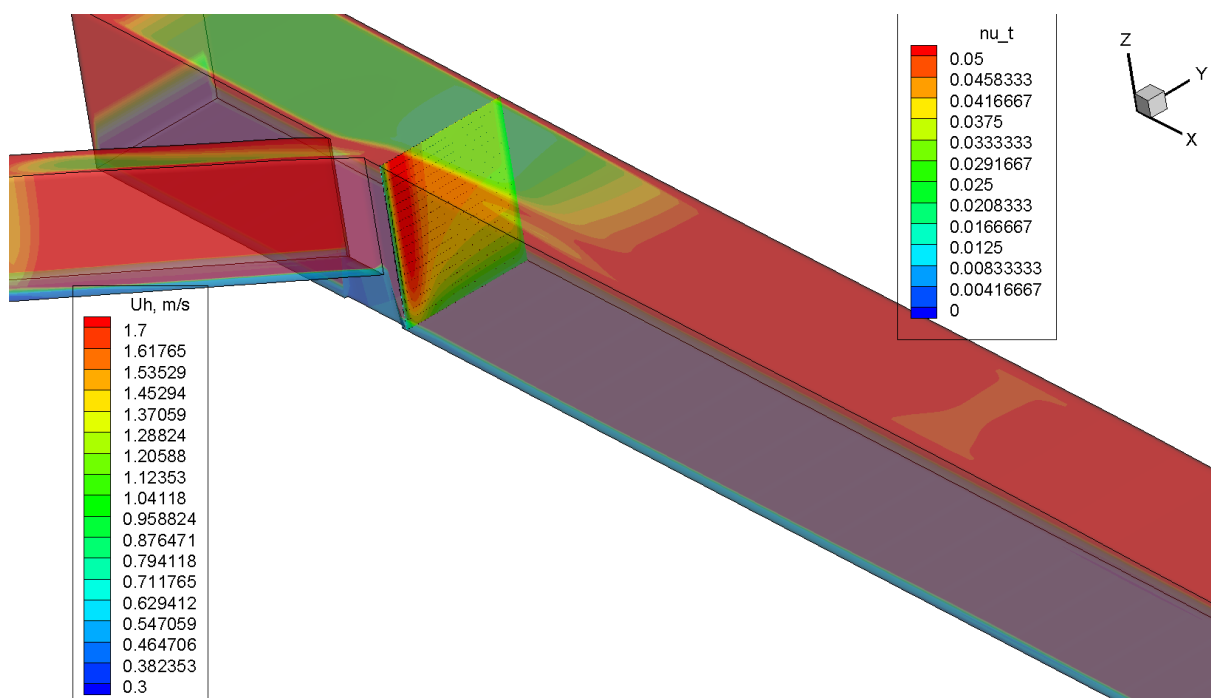
39. ábra Hordalékeloszlás alakulása másodrendű advekción séma esetén



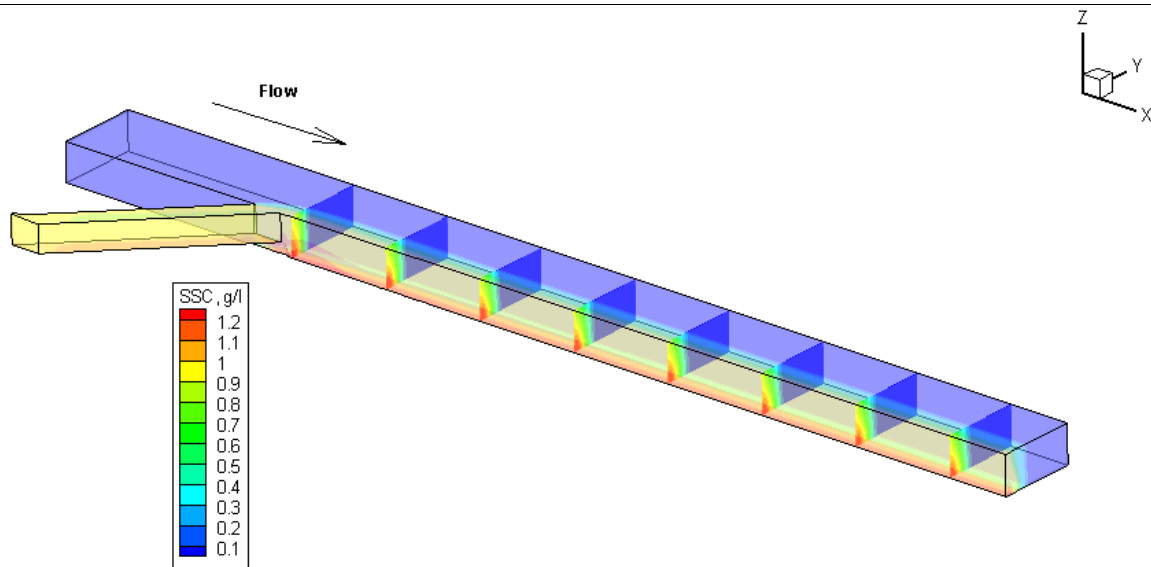
40. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlások alakulása másodrendű advekción séma esetén



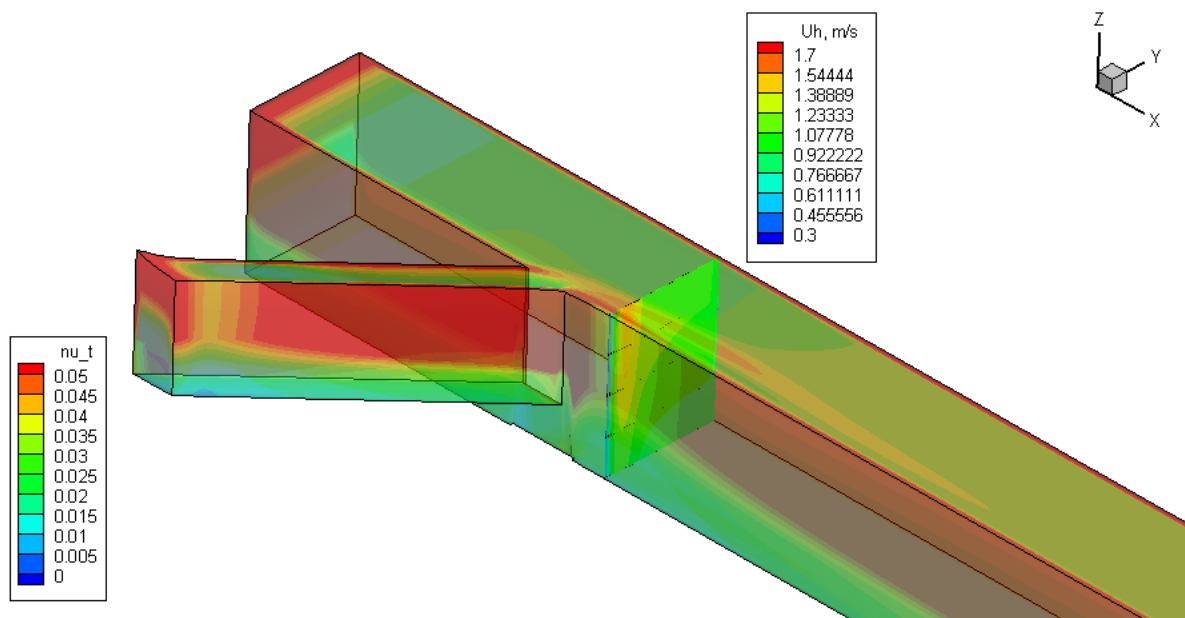
41. ábra Hordalékeloszlás alakulása 20 függőleges réteg esetén



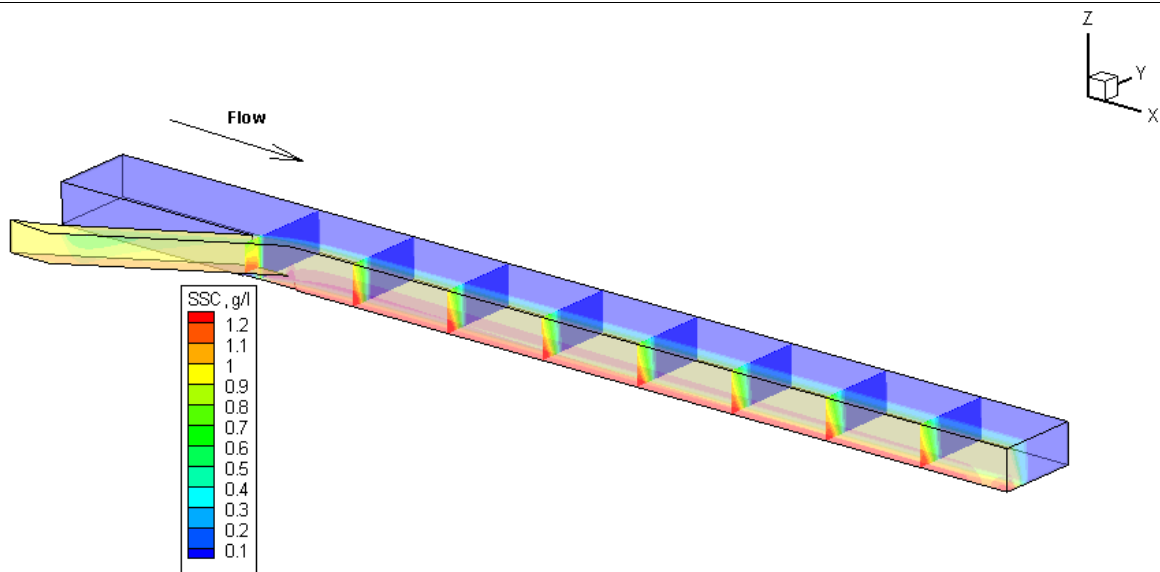
42. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlások alakulása 20 függőleges réteg esetén



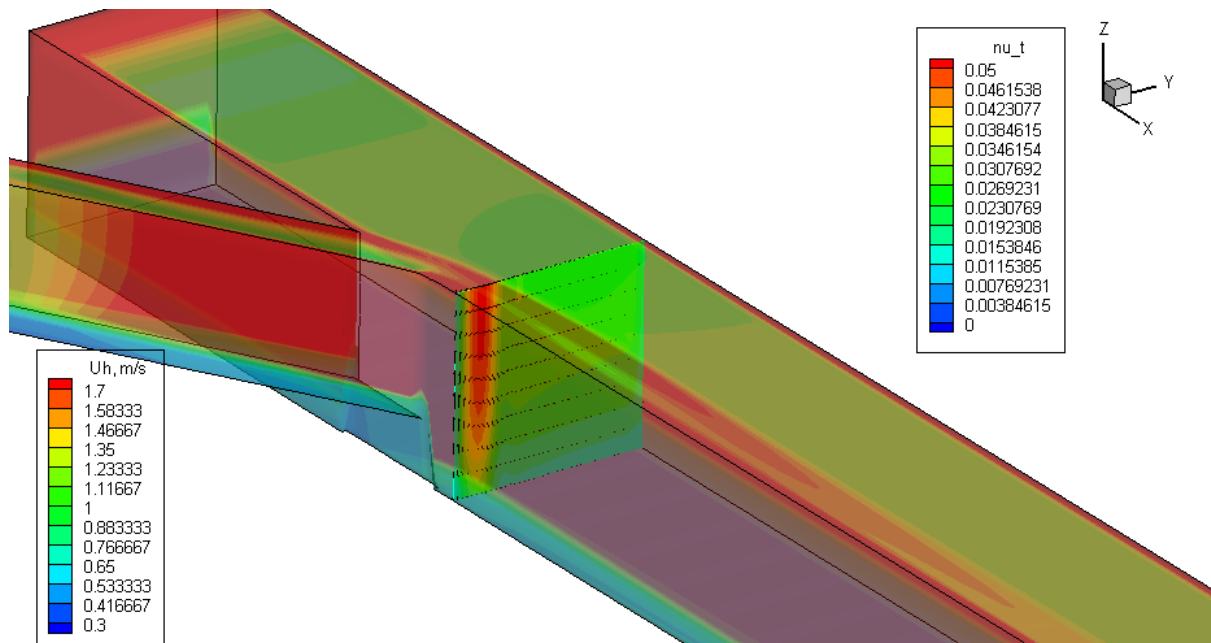
43. ábra Hordalékeloszlás alakulása 5 függőleges réteg esetén



44. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlások alakulása 5 függőleges réteg esetén



45. ábra Hordalékeloszlás alakulása 30°-os betorkollás esetén



46. ábra Örvényviszkozitás és horizontális sebességeloszlások alakulása 30°-os betorkollás esetén