



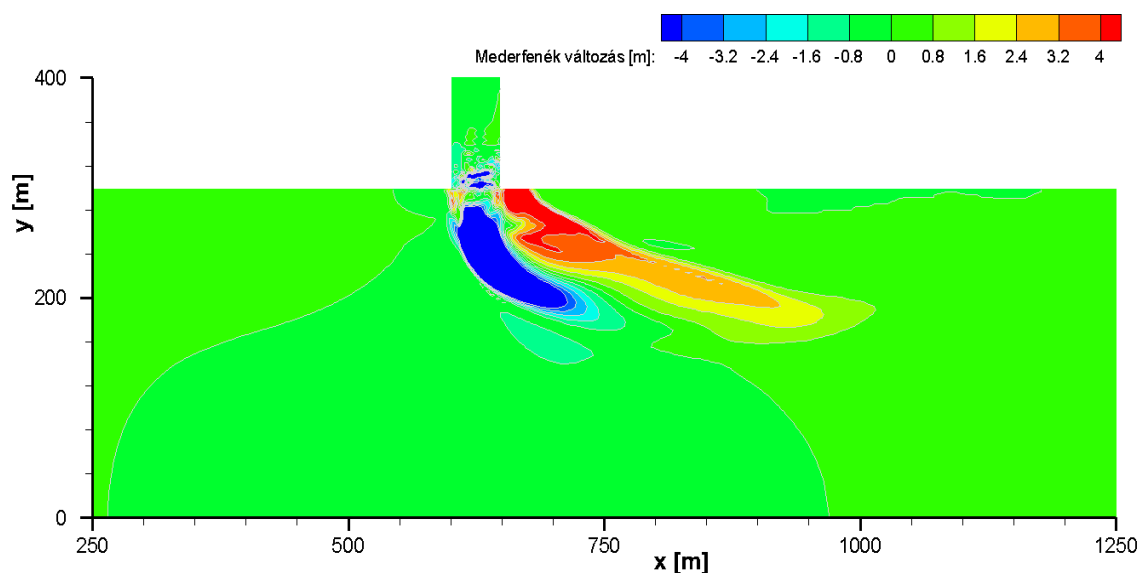
M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia 2012

Folyótorkolatok numerikus morfordinamikai vizsgálata

Tóth Alexandra



Konzulensek:

Dr. Baranya Sándor, tudományos munkatárs

Török Gergely Tihamér, tudományos segédmunkatárs

Tartalmi összefoglaló

A folyók összefolyásánál összetett áramlási- és hordalékvándorlási folyamatok alakulnak ki, melyek hatására a találkozó folyómedrek morfológiai viszonyai lokálisan megváltozhatnak. Ezen folyamatok ismerete építőmérnöki szempontból is jelentős. Amennyiben kellő pontossággal modellezni tudjuk az itt lejátszódó eseményeket, lehetőségünk nyílik megbecsülni vízmérnöki beavatkozásaink hatását ezen összetett hidraulikai viszonyokkal rendelkező szelvényekben.

A korábban elterjedt laboratóriumi kisminta modellek alkalmazása mellett mára számítógépes módszerek is megjelentek, amelyek egy-, két- ill. háromdimenziós leírások alkalmazásával vizsgálják az áramlási viszonyokat.

A folyók találkozásával foglalkozó tanulmányok többsége a helyi áramlási- és elkeveredési viszonyokat elemzi, mivel ezekhez a vizsgálatokhoz rendelkezünk elegendő számú mérési adattal, amelyek a numerikus modellek ellenőrzéséhez is szükségesek. A tudományos szempontból érdekesnek tekinthető hordalékvándorlási folyamatok leírására eddig kevesebb figyelem irányult, ami részben a korlátozottan rendelkezésre álló mérési adatoknak köszönhető. Ebből következően ez még egy nagyrészt kiaknázatlan kutatási terület.

Ebben a TDK dolgozatban egy háromdimenziós számítógépes modellel leegyszerűsített geometriai elrendezésben (két egyenes tengelyű, kezdetben téglalap szelvényű csatorna találkozásánál) vizsgálom a találkozó folyók medermorfológiai (lokális kimélyülések, feltöltődések) alakulását. A tanulmányban különböző paraméterek hatását elemzem úgy, mint a csatornák csatlakozási szöge, csatornákon szállított vízhozamok aránya, csatornák mederfenék anyaga, szállított hordalék jellege. A numerikus vizsgálatok során a folyók találkozásánál lejátszódó morfodinamikai jelenségeket, és a fenti jellemzők morfodinamikai folyamatokra gyakorolt hatását elemzem.

A dolgozat célja, hogy a számítógépes modellvizsgálatok eredményeiből levont következtetések és megállapítások megalapozzák valós folyótorkolatok vizsgálatát és segítséget nyújtsanak az ott lejátszódó folyamatok jobb megértéséhez.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	1
2. Irodalomkutatás	1
2.1. Dejana Đorđević kutatása a 3D modellek összefolyásoknál történő alkalmazhatóságáról (Dejana Đorđević, 2012).....	2
2.2. Áramlási struktúrák vizsgálata folyók összefolyásánál (K. F. Bradbrook, S. N. Lane, K. S. Richards, 2000).....	4
2.3. Összefolyásoknál kialakuló elkeveredési folyamatok vizsgálata (Pascale M. Biron, Amruthur S. Ramamurthy, Sangsoo Han, 2004)	8
2.4. Mélységátlagolt áramlási modell használata folyótálalkozások esetén (S. B. Weerakoon, N. Tamai, Y. Kawahara, 2003)	12
2.5. Folyótorkolati áramlás struktúrák vizsgálata helyszíni részletes felmérések és numerikus modell segítségével (Baranya, S., Józsa, J., 2007)	15
3. Az alkalmazott 3D numerikus hidrodinamikai modell bemutatása	17
3.1. Alapegyenletek.....	17
3.2. A k- ϵ turbulencia modell	18
3.3. A faltörvény	19
4. Az numerikus hordaléktranszport modell bemutatása.....	20
4.1. Lebegtetett hordaléktranszport számítása	20
4.2. Görgetett hordaléktranszport számítása	21
4.3. Kritikus csúsztatófeszültség számítása	21
5. A hidrodinamikai modell igazolása.....	23
5.1. A laboratóriumi kisminta bemutatása.....	23
5.2. A mért és modellezett értékek összehasonlítása.....	23
6. Modell felépítése.....	27
6.1. Geometria kialakítása.....	27
6.2. Peremfeltétek megadása	28
6.3. Mederanyag jellemzők megadása.....	28
7. Eredmények bemutatása	29
7.1. Áramlásmodellek eredményei	29
7.2. Hordalékmodell eredmények.....	36
8. Összefoglalás	51
9. Irodalomjegyzék	52

1. Bevezetés

Az utóbbi években megnövekedett az igény a folyók összefolyásánál lejátszódó hidrodinamikai és morfodinamikai folyamatokat megismerésére. Ez az igény építőmérnöki szempontból is megalapozott. Ha kellő pontossággal tudjuk reprodukálni az itt lejátszódó folyamatokat, az segítségével szolgálhat a tervezett beavatkozások vízfolyásokra gyakorolt hatásának megbecsléséhez, ezáltal megkönnyítve a tervezés folyamatát.

A folyók találkozásánál összetett áramlási- és hordalékvándorlási folyamatok játszódnak le. Az előrejelzés pontosságát a folyamatokat leíró modell minősége határozza meg. Ahhoz, hogy pontos képet kapjunk az itt kialakuló áramlási viszonyokról, azoknak a tér minden irányába eső komponensét vizsgálnunk kell, így a vizsgálatra a háromdimenziós modellek a legalkalmasabbak. Ilyen jellegű vizsgálatok már az 1990-es évek közepétől folynak laboratóriumi- és helyszíni körülmények között egyaránt.

Annak ellenére, hogy a numerikus vizsgálatok már több évtizede megkezdődtek, egységet elmélet még nem született az összefolyásoknál kialakuló hidro- és morfodinamikai jelenségek leírására. Számos kérdés még vita tárgyát képezi. A kutatások döntő többsége a hidrodinamikai folyamatok feltérképezésére irányul, ennek részben oka, hogy ezekhez a vizsgálatokhoz rendelkezünk elegendő mérési adattal, melyek numerikus modelljeink kalibrálásához szükségesek. Mérési adatok hiányában a morfodinamikai vizsgálatok háttérbe szorultak.

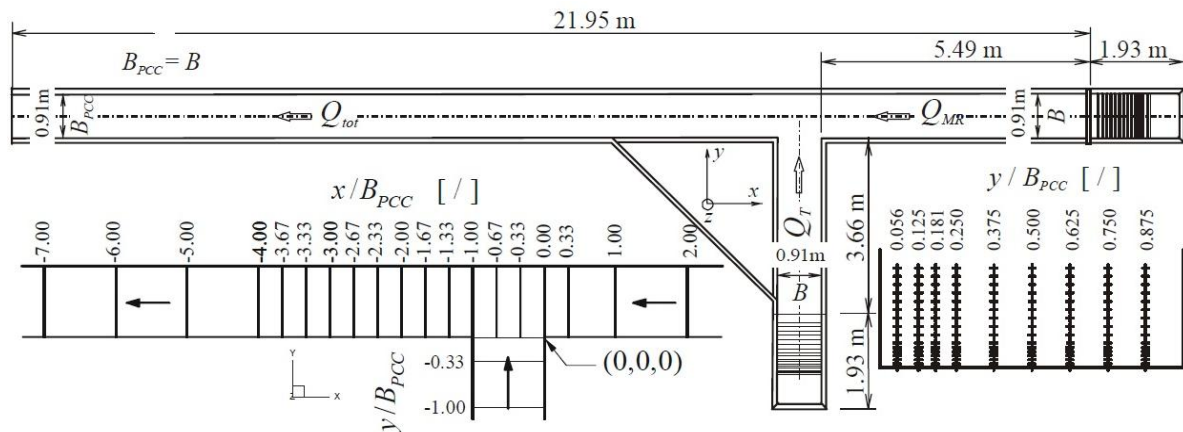
A dolgozat első felében bemutatok néhány kiemelkedőbb kutatást és azok eredményeit, hogy ezáltal áttekintő képet kapjunk az lejátszódó hidrodinamikai folyamatok jellegéről, majd ezt követően saját modell segítségével az összefolyásoknál kialakuló morfodinamikai viszonyokat fogom vizsgálni.

2. Irodalomkutatás

Az alábbi fejezetben négy, folyók összefolyási szakaszának vizsgálatával foglalkozó kutatás eredményét mutatom be. Az első cikkben a szerző a 3D modellek torkolati szakaszoknál történő alkalmazhatóságát vizsgálja. Az ezt követő kutatások tárgya az összefolyásoknál kialakuló áramlási struktúrák és az ott lejátszódó elkeveredési folyamatok 3D numerikus modellel történő megbízható leképezésének vizsgálata. Következőként egy 2D, mélységátlagolt modell összefolyási szakaszán történő alkalmazhatóságával foglalkozó cikket mutatok be. Végül egy hazai példával illusztrálok az összefolyások vizsgálati lehetőségeit, ahol terepi mérésekkel és numerikus modellekkel tárták fel az összetett áramlási struktúrákat.

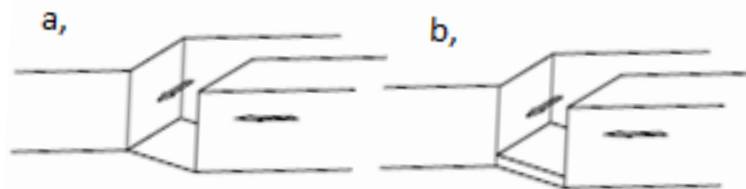
2.1. Dejana Đorđević kutatása a 3D modellek összefolyásoknál történő alkalmazhatóságáról (Dejana Đorđević, 2012)

Dejana Đorđević a Belgrádi Egyetem munkatársa kutatásában a SSIIM2 3D numerikus hidrodinamikai modell folyók összefolyásainál történő alkalmazhatósági megbízhatóságát vizsgálta. A modell megbízhatóságának vizsgálatához a számított hidrodinamikai változók mért értékekkel lettek összevetve különböző geometriai kialakítások esetén. Az első esetben két, egymással 90°-ban találkozó csatornát vizsgált. Az összehasonlítást Shumate kisminta kísérlete alapján végezte, melynek elrendezését az 1. ábra mutatja be.



1. ábra Shumate kisminta modellje

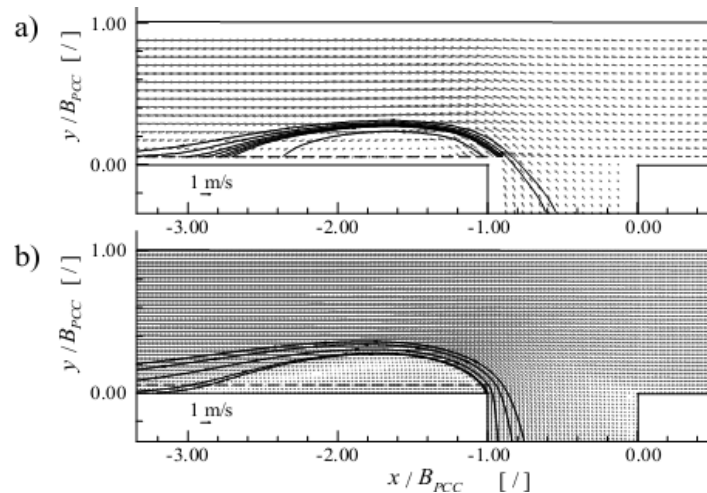
A második geometriai kialakításnál két egyenes tengelyű, egymással 30°-ban találkozó csatorna került kialakításra (2. ábra). Az első esetben a főmeder és a mellékág egy szintben találtak egymással, míg a másodikban a mellékág fenékszintje 0,03 m-rel a főág fenékszintje fölött volt.



2. ábra Szintben megegyező (a) és szintben eltérő (b) torkolatok

A szerző a cikkben a SSIIM2 (*Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option*) modellt alkalmazta. Ez az áramlásmódel a hidrodinamikai jellemzőket a Navier-Stokes egyenletek Reynolds-átlagolt alakjának közelítő megoldásával (RANS) becsli. A turbulencia figyelembe vételére a $\kappa\text{-}\epsilon$ modellt használja.

Az első elrendezés esetén a találkozási zónában mért és számított horizontális sebességek nagyságai és irányai a mederfenék közeli rétegben kielégítő egyezést mutattak (3. ábra).



3. ábra Mért (a) és modellezett (b) sebességvektor mezők

Azonban a mederfenéktől távolodva az eltérések növekedtek. A 0,6h magasságig terjedő tartományban a különbségek mértéke kevesebb, mint 5% volt. A magasabb rétegekben viszont akár 20%-os eltérés is tapasztalható volt a főág tengelyével párhuzamos sebességkomponensek (v) nagyságaiban. A modellezett függőleges irányú sebességkomponens (w) értékei következetesen alábbak lettek becsülve, azonban a vektorok eloszlása jó egyezést mutatott.

Az összehasonlítás alapján a visszaáramlási zóna struktúrája jó egyezést mutatott, főleg a mederfenék közeli rétegekben. Azonban a zóna hosszát a modell mintegy 20%-kal alábecsülte. Ez azt mutatja, hogy nagyobb nyírás alakult ki a modellezett áramlás esetén, mint valós viszonyok között.

A második kísérleti elrendezés esetén az összefolyás sarkánál nem alakult ki visszaáramlás. Ez a tapasztalatok szerint a kishajlású találkozási szögnek és az áramlás lassulásának köszönhető. A modellezett eredményekkel ellentétben a kismintában kimutatható volt a visszaáramlási zóna. A numerikus modell által becsült w sebességvektorok értéke rendre alacsonyabbak a mérteknél. Az eltérés mértéke nagyobb, amikor a két meder fenékszintje megegyezik. A sebességprofilok jó egyezést mutatnak a keresztszelvény teljes szélességében és az összefolyás utáni szakasz teljes hosszában is.

Az ismertetett vizsgálatok alapján többek között az a következtetés vonható le, hogy a függőleges irányú sebességkomponensek modellezett értéke következetesen alábecsült. Ezért a szerző javasolja, hogy további vizsgálatok esetén a pontosabb számítási eredmények érdekében ne hidrosztatikus nyomáseloszláson alapuló modell segítségével vizsgálják az összefolyásoknál lejátszódó folyamatokat.

A mellékcsatornáról érkező impulzusok főágra gyakorolt hatását a modell megfelelően reprezentálja. A κ - ϵ modell jól írja le a turbulencia hatását. Ezért a modell jól tükrözi az áramlás leválási zóna mélységét és szélességét, de a hossza következetesen alábecsült.

Összességében megállapítható, hogy az alkalmazott 3D hidrodinamikai modell alkalmas folyótorkolatok esetén lejátszódó hidrodinamikai folyamatok kvalitatív elemzésére, azonban a kvantitatív eredményeket fenntartással kell kezelni.

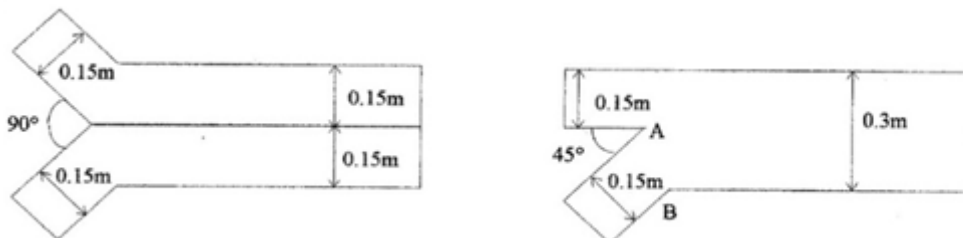
2.2. Áramlási struktúrák vizsgálata folyók összefolyásánál (K. F. Bradbrook, S. N. Lane, K. S. Richards, 2000)

Jelentős számú kutatás ellenére még nem alakult ki egységes elmélet, ami megfelelő megbízhatósággal írná le az összefolyásoknál kialakuló áramlás struktúráját. Ebben a kutatásban a szerzők nem csak a kialakuló időátlagolt áramlási szerkezetek leírását tűzték ki célul, hanem azt is, hogy megmutassák, milyen hatása van a meder topográfiájának, a nyomáseloszlásnak és a két áramlás találkozásánál létrejövő turbulencia változásának a hidrodinamikai jellemzőkre.

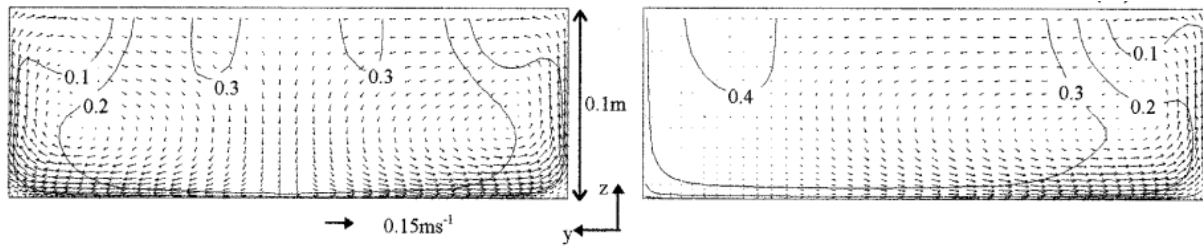
A szerzők a vizsgálatokat 3D numerikus modell segítségével végezték, amely matematikai alapját a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenletek képezik. Az alkalmazott modell a turbulencia figyelembe vételére az RNG-turbulencia modellt használja. A modell a mederfenékkal szomszédos cellák esetén kialakuló sebességek számításánál a fal törvényét használja, továbbá a vízfelszín számítása során szabadfelszínt feltételez.

A szerzők kezdetben egyszerűsített geometriai elrendezések segítségével vizsgálták, hogy milyen módosító hatással van az áramlás szerkezetére a csatornák hajlásszöge, a szélességük- és az érkező vízhozamok aránya. Vizsgálatuk elsődleges célja az volt, hogy leegyszerűsített geometriai modellek segítségével általánosítható áramlási struktúrákra mutassanak rá. Ezt követően a Kaskaskia és a Copper Slough folyók összefolyási szakaszának hidrodinamikai viszonyait vizsgálták.

A vizsgálatoknál használt egyszerűsített modellek geometriáját a 4. ábra mutatja be. A modellfuttatások alapján a kutatók azt találták, hogy a szimmetrikus kialakítás esetén két ellentétes irányú csavaráramlás alakul ki (5. ábra, bal). A jelenség a nyomáseloszlás és a meder áramlást terelő hatásával magyarázható. A szimmetrikus elrendezés esetén a két áramlás a felszín közelében a csatorna középvonala felé konvergál, ennek köszönhetően ebben a sávban megnövekszik a nyomás. Ezzel egy időben a partszéleken kisnyomású zóna alakul ki. A fenéken lévő kisebb impulzusú áramlás gyorsabban reagál a nyomásváltozásra, mint a felszín közelében lévő nagyobb sebességű áramlás. Annak érdekében, hogy az egyensúly a keresztmetszetben továbbra is fennálljon, a mederfenéken lévő víztömeg megindul a part irányába. A folyamat eredményeképpen a keresztmetszetben ellentétes irányú, kettős csavaráramlás figyelhető meg. Ezt nevezik az ún. kétcellás áramlási formának.



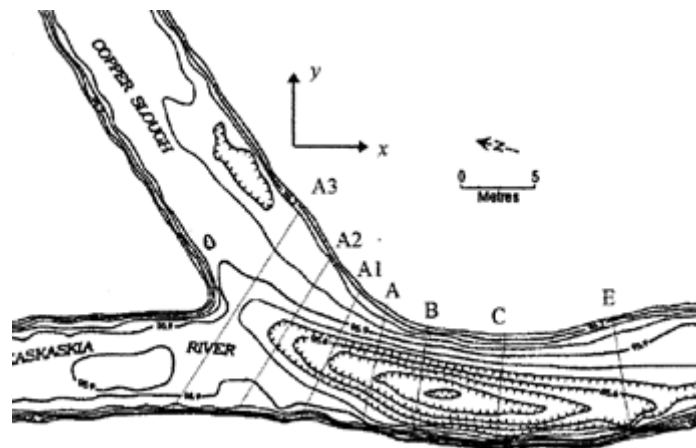
4. ábra Az egyszerűsített modellek geometriái



5. ábra Sebességvektor mező egy szimmetrikus (bal), valamint egy asszimmetrikus (jobb) csatorna keresztmetszetében

Az asszimmetrikus kialakítás esetén az tapasztalható, hogy a kialakuló nagynyomású zóna nem a csatorna közepén alakul ki, hanem eltolódik a hozzáfolyással ellentétes oldal felé. Az is megfigyelhető, hogy a csavaráramlás középpontja közelebb kerül a mederfenékhez. Asszimmetrikus geometriai kialakítás esetében egycellás csavaráramlás alakul ki (5. ábra, jobb).

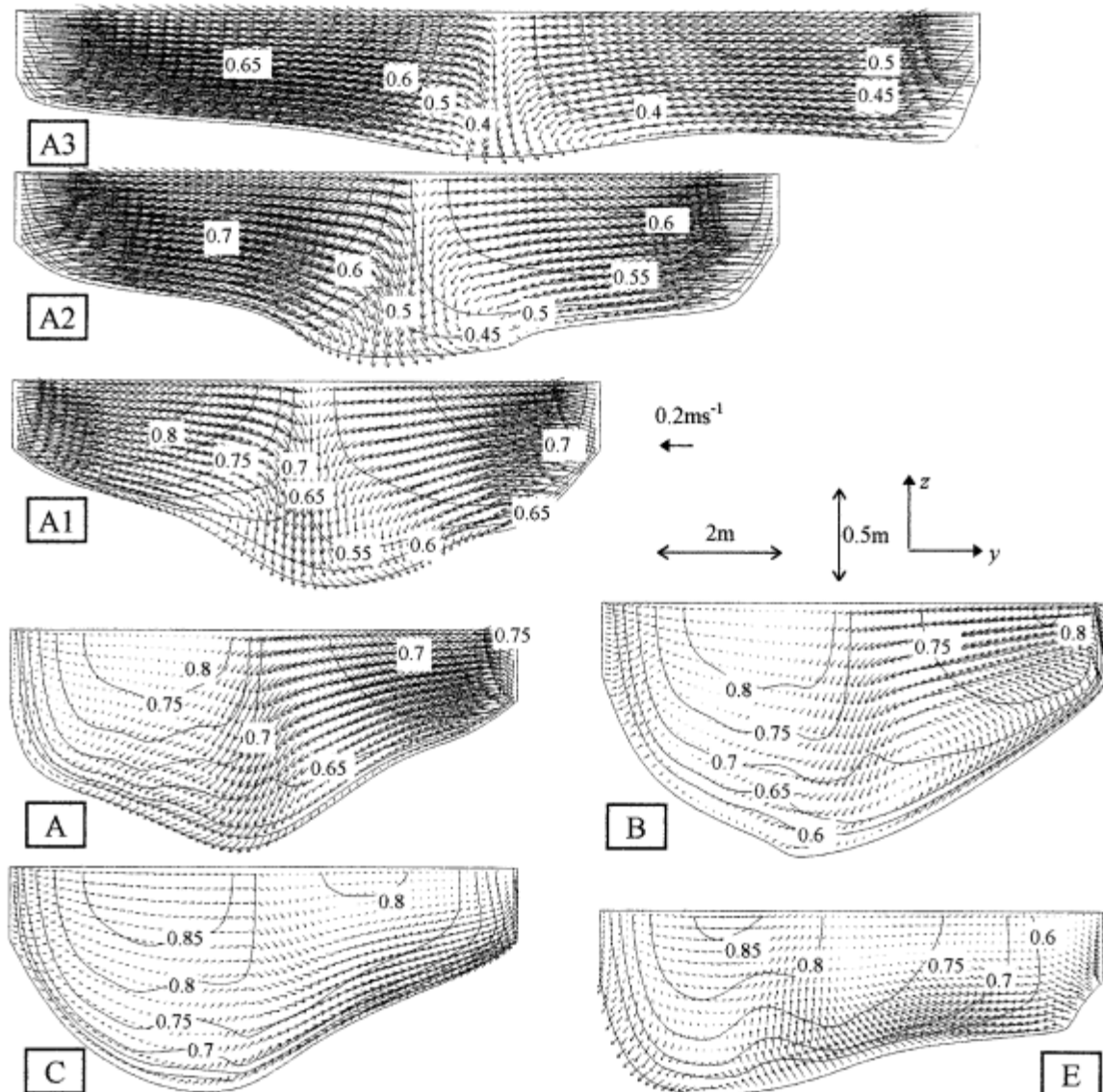
A valós geometriával rendelkező összefolyás (6. ábra) esetén a kijelölt (A3, A2, A1, A, B, C, D) keresztmetszvényekben a kialakuló sebesség viszonyokat és a vízfelszín alakulását vizsgálták. Azt várták, hogy az egyszerűsített geometriájú modellek eredményei alapján egycellás csavaráramlás alakul ki.



6. ábra A Kaskaskia és Cooper Slough folyók összefolyása

Bal part

Jobb part



7. ábra Sebességvektor mezők a jelölt keresztmetszvényekben

Az összefolyáshoz közeli, A3 jelű keresztmetszvényben (7. ábra) a csatorna közepe felé haladva az áramlási sebességek fokozatosan csökkennek. A sebességvektorok alapján a keresztmetszvény közepe felé irányuló áramlás is megfigyelhető. Megfigyelhető, hogy a csatorna közepén kialakuló nyomásnövekedés lefelé irányuló áramlást eredményez. Az összefolyáshoz közeli keresztmetszvényekben még jelentéktelen a part irányú áramlás.

Az A1 és A3 szakaszok között jelentősen nagyobb elkeveredést tapasztaltak, mint a torkolat alsóbb szakaszán. Folyás irányba haladva a lefelé áramlás mértéke fokozatosan nő, valamint megfigyelhető a part irányába mutató áramlás is. Ezen a szakaszon azonban még nem mutatható ki csavaráramlás.

Az A jelű keresztmetszetek áramlási sebességvektorai alapján az látható, hogy kezdetben a meder bal oldalán figyelhető meg az áramlás dominanciája, azonban a mellékfolyó hatására a jobb part irányába tolódik át.

A *B* keresztmetszetben a modell által jelzett áramlási vektorok a jobb part közelében egy kialakuló kezdetleges csavaráramlás megjelenését mutatják, melynek középpontja a mederfenékhez közel helyezkedik el. A *C* keresztmetszetben a másodlagos áramlás jelenléte továbbra is megfigyelhető, azonban középpontja a felszín felé tolódik. Az összefolyástól tovább távolodva az *E* keresztmetszetben már csak egy nagysebességű mag található, valamint a keresztirányú sebesség komponensek csökkenése figyelhető meg.

A szerzők a valós geometriájú modellben kialakuló áramlási viszonyokat úgy próbálták magyarázni, mintha két ellentétes irányú kanyarulat ütközött volna egymásnak. Ily módon az egyszerűsített geometriájú modellek segítségével megismert folyamatokra visszavezetve próbálták leírni és magyarázni az itt kialakuló áramlasképet.

A szerzők az alábbi konklúziókat vonták le. Aszimmetrikus találkozások esetén a vízfelszín emelkedés nem marad a középvonalban. Annak eltolódása a nagyobb centrifugális gyorsulással rendelkező mellékággal ellentétes irányba történik. Mivel a nagy nyomású zóna a vízfelszín emelkedése miatt alakul ki, így az is az előzőekkel megegyező irányba tolódik el. Ezen változások módosító hatással bírnak az áramképre. A két ellentétes irányú áramlás helyett a valós geometriájú vizsgált esetben csak egy egycellás csavaráramlás alakul ki és az összefolyás hasonlóképpen kezd viselkedni, mint egy egyszerű folyókanyarulat. Az egyszerűsített, asszimmetrikus geometriájú modell esetében is hasonló struktúra tapasztalható.

Az áramlást befolyásoló tényezők vizsgálata során nem szabad megfeledkezni arról, hogy a meder egyenlőtlenégei (pl. lokális kimélyedések és feltöltődések) is hatással vannak a kialakuló áramlás struktúrájára, valamint hogy ez a hatás kölcsönös, vagyis az áramlás is hatással van a mederfenék változásaira.

A numerikus vizsgálat során megfigyelhető, hogy a vízfelszín emelkedés a jobb part fele mozdul el. Azonban az erős lefelé áramlási zóna nem követi ezt a változást, hanem továbbra is a helyi kimélyülés által irányított marad. Ez is mutatja, hogy a meder morfológiája nagy módosító hatással bírhat az áramlási folyamatokra.

A modellvizsgálatok alapján megállapítható, hogy valós, összetett geometriájú összefolyások esetén is lehetséges áramlási struktúrák azonosítása. Továbbá az áramlási viszonyokat tekintve hasonlóság fedezhető fel ezek alakulása, és két egymásnak ütköző ellentétes irányú folyószakasz esetén kialakuló áramlási mintázat között. Az áramlási struktúra külső hatásra (pl. a folyó vonal vezetésében bekövetkező változások valamint a mederfenéken található helyi kimélyülések és feltöltődések) könnyedén el tud torzulni. Ez az állítás fordítva is igaz, tehát a kialakuló áramlásszerkezet módosító hatással bír a mederfenékre.

2.3. Összefolyásoknál kialakuló elkeveredési folyamatok vizsgálata (Pascale

M. Biron, Amruthur S. Ramamurthy, Sangsoo Han, 2004)

Folyók találkozásánál tapasztalható elkeveredési folyamatok ismerete nem csak tudományos szempontból érdekes, hanem vízkormányzati szempontból is jelentős. Többek között nagy segítséget nyújthat a lehetséges vízkivételek helyének meghatározásában. Az alábbi elkeveredési vizsgálatokhoz használt 3D numerikus modell az előzőekben ismertetett modellekhez hasonlóan a RANS egyenleteken alapszik, a turbulencia figyelembe vételére a $k-\varepsilon$ modellt használja. A modell szabadfelszínű áramlást számol.

Ebben a cikkben a szerzők különböző kezdeti feltételek esetén vizsgálták a kialakuló elkeveredési folyamatokat, ahol az összehasonlítás alapjául az elektromos vezetőképesség értékei szolgáltak. A teljes elkeveredés után kialakult koncentrációt (C_p) az alábbi egyenlet segítségével határozták meg:

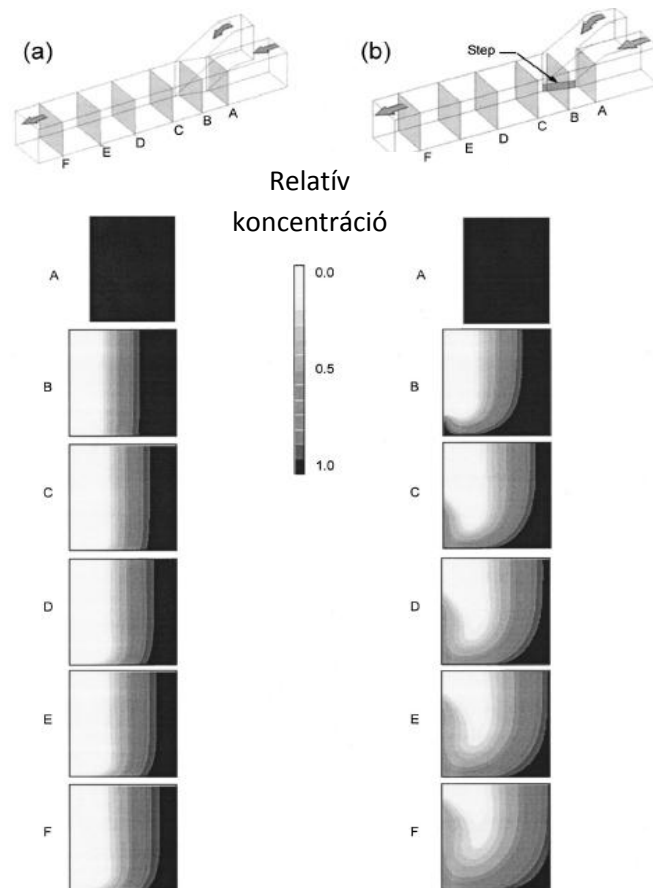
$$C_p = \frac{(C_1 Q_1 + C_2 Q_2)}{Q_3}$$

ahol C_1 és C_2 az egyes mellékágakon mért koncentráció értéke; Q_1 és Q_2 a mellékágak vízhozama; Q_3 az összefolyás utáni vízhozamot jelenti.

A 8. ábra szemlélteti a leegyszerűsített geometriai vizsgálatok esetén kialakuló elkeveredési profilokat. A bal oldalon az egy szintben találkozó csatorna, míg a jobb oldalon a nem szintben találkozó csatornát esetét látjuk. Megfigyelhető, hogy a szintkülönbség jelentős hatással van az elkeveredési viszonyokra. A szintbeli medernél jól látható, hogy az elkeveredési sáv a meder közepére koncentrálódik. Csak az alsóbb szakaszon tapasztalható az elkeveredési felület oldalirányú kiszélesedése.

A második esetben az elkeveredési sáv keresztirányban fokozottabban terjed szét. Bár függőleges értelemben az elkeveredés lassabban megy végbe, mint az előző esetben, összességében megállapítható, hogy a szelvény menti elkeveredés határfoka ebben az esetben magasabb.

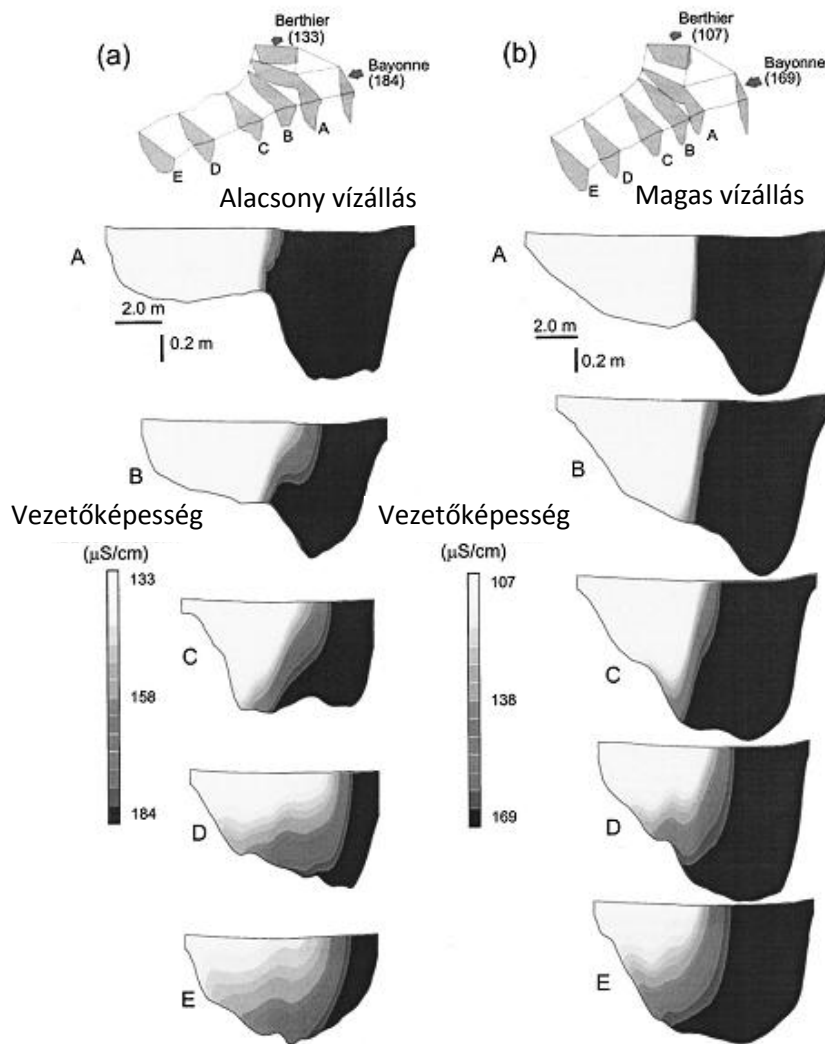
A kutatási eredmények alapján a szerzők megállapították azt is, hogy nagyobb vízhozam arányok ($Q_{\text{mellék}}/Q_{\text{fő}}$) mellett, szintbeli találkozás esetén az elkeveredés kis mértékben felgyorsul.



8. ábra A relatív koncentrációk a jelölt keresztmetszetekben, szintben megegyező (a) és szintben eltérő (b) torkolatoknál

Az egyszerűsített geometriai vizsgálatok után a valós körülmények között kialakuló elkeveredési viszonyokat is tanulmányozták a szerzők. Ilyen esetben a geometria jelentősen összetettebb. Emellett a meder áramlásra gyakorolt hatása is fokozottabban jelentkezik. A mederfenék egyenetlenségeinek hatását különböző vízállású időszakokban vizsgálták. Alacsony vízhozam esetén a mellékág és a főág vízmélységének aránya csökken, ennek köszönhetően a mederfenék hatása jelentősebbé válik. A modellezett vezetőképesség eloszlásokat a 9. ábra mutatja be, kisvíz és nagyvíz esetére.

A kezdeti szakaszon az elkeveredési határfelület egy függőleges, keskeny sávban figyelhető meg. A B keresztmetszetben már jól megfigyelhető a különbség a két vízjárás esetén. A kisebb vízmélység esetén a fenék közelében a találkozási felület eltolódik a bal part felé. Ezzel szemben nagy vízhozam esetén ugyanebben a keresztmetszetben még kvázi függőleges irányú marad az elkeveredési határfelület egészen a C keresztmetszetig.



9. ábra Elektromos vezetőképesség keresztmetszelvények menti eloszlása a Bayonne és Berthier folyók összefolyásánál

Az elkeveredés a folyás irányában egyforma intenzitással játszódik le. Korábban megállapításra került, hogy az összefolyás közelében a legnagyobb az elkeveredés, majd ettől távolodva csökken. Ebben a konkrét esetben azonban az elkeveredés mértéke ismét megnövekszik, köszönhetően az alvízen található mederkanyarulatnak. A vizsgálat során az elkeveredés kis vízhozam esetén 25, míg nagy vízhozam esetén 37 csatornaszélességnek megfelelő hossz után tekinthető teljesnek. A tapasztalatok alapján megállapítható, hogy a kisebb vízhozam esetén az elkeveredés gyorsabban megy végbe, mint a nagyobb vízhozam esetén.

A kutatás tárgyát képezte annak vizsgálata is, hogy az ágak mederszintjeinek eltérése milyen hatással van az elkeveredésre. Megállapítható, hogy nagyobb mértékű elkeveredés tapasztalható a nem szintben találkozó csatornák esetén. Ez az eltérő keresztirányú gradiensekkel magyarázható, ami kapcsolatban áll a sebességgel, a vízhozamok arányával és a függőleges irányú nyomáskomponens nagyságával. A modellvizsgálatok eredményeként az elkeveredés növekedését tapasztalták, amikor növelni kezdték az vízhozamok arányát és a csatornák csatlakozási szögét. Ez is azt mutatja, hogy a keresztirányú nyomás gradiens valóban hatással bír az elkeveredésre.

Azt tapasztalták, hogy laboratóriumi viszonyok között az összefolyástól távolodva az elkeveredés szempontjából a meder hatása csökken, majd jelentéktelenné válik. Természetes viszonyok között azonban a geometria sokkal összetettebb, ami pedig állandó módosító hatást gyakorol az elkeveredésre. Ezek a hatások azonban nem minden esetben jelentkeznek azonos mértékben. A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a másodlagos áramlás nagyobb módosító hatással van az elkeveredésre nagy vízhozam esetén, mint alacsonyabb vízhozamoknál.

Korábbi tanulmányok alapján kutatók arra jutottak, hogy az elkeveredés mértéke csökken a szélesség és a mélység arányának növekedésével. Jelen tanulmány azonban pont az ellenkezőjére mutatott rá. A longitudinális elkeveredés sokkal nagyobb mértékű kis vízhozamok esetében. Ez pedig összefüggésben áll a vízmélység és vízfelszín szélességének arányával. Azonban nem szintben található medrek és kis vízhozamok esetén az tapasztalható, hogy a folyómeder módosító hatása még mindig jelentősebb, mint a fentebb említett arányok változásának hatása.

2.4. Mélységátlagolt áramlási modell használata folyótalálkozások esetén

(S. B. Weerakoon, N. Tamai, Y. Kawahara, 2003)

Korábbi kutatási munkák alapján megállapítható, hogy a folyók összefolyásánál lejátszódó összetett folyamatok vizsgálatára a 3D modellek a legalkalmasabbak. Jelen kutatás tárgya annak vizsgálata, hogy milyen megbízhatósággal alkalmazható alacsonyabb dimenziójú modell hasonló jellegű folyószakaszok hidrodinamikai jellemzőinek leírására.

A következőkben Weerakoon, Tamai és Kawahara tanulmányát ismertetem, amiben a szerzők egy 2D mélységátlagolt modell alkalmazhatóságát vizsgálták sekélyvízű, változatos összefolyási geometriával rendelkező vízfolyások esetén. A megbízhatóbb modelleredmények érdekében a szerzők a korábbi modellekben szereplő nyomáskorrekciót mélységkorrekcióval helyettesítették, majd a továbbiakban ennek alkalmazhatóságát vizsgálták egyszerű geometriájú laboratóriumi vizsgálatok, valamint terepi mérésekkel való összehasonlíthatóság segítségével.

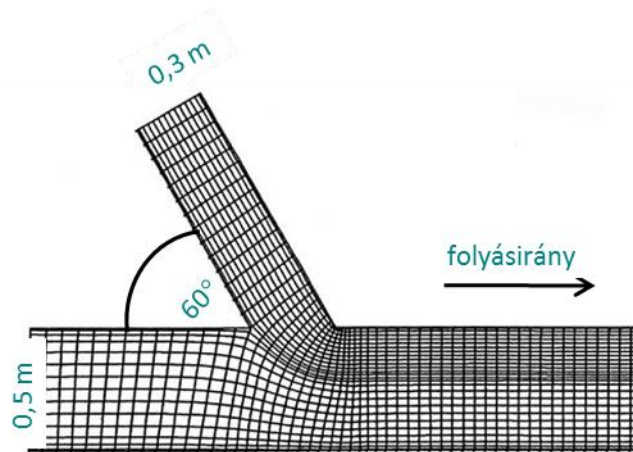
A vizsgálatot az a feltételezés alapozta meg, hogy a megbízhatóbb 3D modellekkel szemben, a mélységátlagolt modellek számítási igénye jóval kisebb és kielégítő információkat szolgáltathatnak a sekély vízfolyások összefolyásánál kialakuló sebességviszonyok és vízmélységek alakulásáról.

A mélységátlagolt számítási modellben az impulzus egyenlet és a folytonossági egyenlet felírása során azt feltételezték, hogy a víz függőleges sebessége a gravitációs gyorsulással szemben elhanyagolható. Továbbá a kialakuló másodlagos áramlások esetén megjelenő diszperzió hatását közvetlenül nem veszik figyelembe, ezt az effektív viszkozitás (ε) magában foglalja.

A fenéksúrlódási együttható és az effektív viszkozitás értékének megválasztása jelentős hatással van a számított eredményekre. Azonban meg kell jegyezni, hogy ezek meghatározása összetett áramlások esetén nem egyszerű feladat. Kimutatták, hogy ha n Manning-féle simasági együttható és az ε effektív viszkozitás értéke növekszik, a vízmélység is növekedni kezd, továbbá a sebességeloszlás egyenletesebbé válik. Tapasztalatok szerint alacsony vízállású folyók esetén a fenéksúrlódási együtthatóra sokkal inkább érzékenyebb a modell, mint az effektív viszkozításra. A különböző terepi viszonyokra vonatkozó Manning-féle simasági együttható értéke a szakirodalomban megtalálható, azonban a modell kalibrálása során előfordulhat, hogy el kell térni ezektől az értékektől.

Az effektív viszkozitás értékének megválasztásakor nagy körültekintéssel kell lenni, mivel az együttható magában foglalja a diszperzió, a másodlagos áramlások és a nem homogén sebességkomponensek hatását. Sekély vízű folyók esetén a másodlagos áramlások elsősorban a lokális kimélyüléseknél alakulnak ki. Bár a másodlagos áramlások felerősítik a diszperzió mértékét, azonban ebben a tanulmányban ezt a hatást külön nem vették figyelembe. ε értékének meghatározása a csúsztatósebesség és a mélység kapcsolatán alapszik.

A modell alkalmazhatóságát először egyszerűsített geometriai kialakításon tesztelték. A vizsgálat során két egyenes tengelyű, négyszög keresztmetszetű, egymással 60° -ban találkozó csatornát alakítottak ki, ahol a főcsatorna szélessége 0,5 m míg a mellékcsatorna szélessége 0,3 m volt (10. ábra).

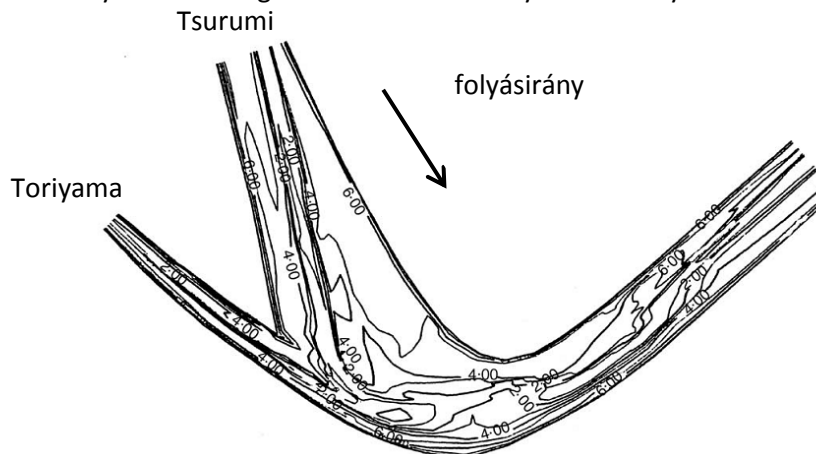


10. ábra Az egyszerűsített geometriájú modell számítási rácshálójá

A vizsgálatot különböző effektív viszkozitás ($\varepsilon_1 = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ és $\varepsilon_2 = 3 \text{ cm}^2/\text{s}$) értékek kiválasztása esetén végezték el. A mért adatokkal való összehasonlítás után a második modell esetében tapasztaltak jobb egyezést. Az effektív viszkozitás értékének változtatása hatással volt a visszaáramlási zóna kiterjedésére; nagyobb ε esetén a zóna hossza csökken.

A modell igazolásához a kialakuló sebességeket és vízszintemelkedéseket hasonlították össze. Az eredmények jó egyezést mutattak, de meg kell jegyezni, hogy a visszaáramlási zóna mérete 20%-kal alábecsült, azonban az itt kialakuló sebességek értéke nagyobbak, mint a mért értékek. A mért és a számított vízszint emelkedések mértéke és jellege jó egyezést mutatott.

Miután a laboratóriumi vizsgálatok kedvező eredményeket mutattak, a szerzők a modell gyakorlati használhatóságát indokoltak vélték. A vizsgálat tárgyát a Tsurumi és a Toriyama folyók összefolyása képezte. A mellékfolyó 50° -os szögben csatlakozik a kanyarodó főfolyás konkáv oldalához (11. ábra).



11. ábra Tsurumi és a Toriyama folyók összefolyásának szintvonalas térképe

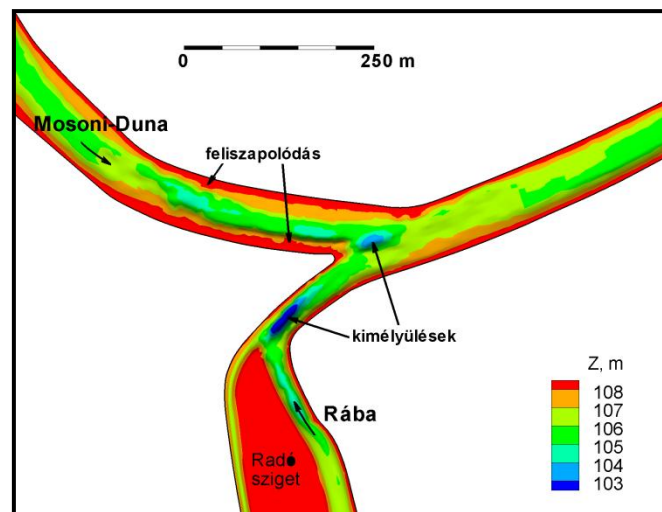
A szimulált áradás során a főfolyás vízhozama $667 \text{ m}^3/\text{s}$, míg a mellékfolyó vízhozama $69 \text{ m}^3/\text{s}$ volt. Kifolyási feltételként a két parton mért vízszintet használták.

A modelleredmények alapján a vízfelszín kilendülését elsősorban a főág jelentős kanyarodásának tudták be. Azt tapasztalták, hogy a vízfelszín kevésbé érzékeny a helyi kimélyülésekre.

A számított és modellezett értékek összehasonlítása alapján a kutatók arra jutottak, hogy n és ε paraméterek gondos megválasztása esetén a mélységátlagolt modell kielégítő eredményeket szolgáltat az összefolyások esetén kialakuló sebességekről és a felvíz szintjének alakulásáról. További előnyt jelent, hogy számítási igénye jóval kisebb, mint a 3D modelleké. Az eredményeket összegezve elmondható, hogy a mélységátlagolt modell fenntartások mellett alkalmas lehet folyók találkozásának vizsgálatára.

2.5. Folyótorkolati áramlás struktúrák vizsgálata helyszíni részletes felmérések és numerikus modell segítségével (Baranya, S., Józsa, J., Napoli, E. 2007)

Az eddig bemutatott tanulmányok esetében a numerikus modellek kalibrálása során kisminta kísérletek adatsorait használták fel. Ezt követően alkalmazták a modelleket valós problémák vizsgálatára. Azonban elmondható, hogy a kapott eredmények ellenőrzéséhez nem igazán rendelkeztek elegendő helyszíni méréssel. Ebből kifolyólag a most bemutatásra kerülő tanulmány egyik nagy jelentősége, hogy a szerzők elegendő terepi mérési adattal rendelkeztek ahhoz, hogy a modell által számított eredmények ellenőrizhetővé váljanak.



12. ábra Mosoni-Duna és Rába összefolyása, Győr

A vizsgálat tárgyát a Mosoni-Duna és a Rába összefolyásánál (12. ábra) kialakuló áramlási struktúrák képezték. Mindkét vízfolyás évi közepes vízhozama kb. $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

A komplex áramlási struktúrák feltérképezésére két különböző mérést hajtottak végre. Az első esetben rögzített hajós-, míg a második esetben mozgóhajós ADCP-s (Acoustic Doppler Current Profile) eljárást alkalmaztak. A mérés célja az volt, hogy az itt lejátszódó összetett hidraulikai viszonyok a lehető legpontosabban kerüljenek rögzítésre.

A numerikus vizsgálatokat kétféle eljárással hajtották végre. Egyik esetben egy RANS egyenleteken alapuló 3D modellt alkalmaztak, amiben a turbulencia jellemzőit a $k-\varepsilon$ turbulencia modellel közelítették. A másik esetben pedig a nagyobb számítási igényű, de az örvényeket megbízhatóbban leképező, ún. Nagy-örvény szimulációs (LES – Large Eddy Simulation) turbulencia modellt használták.

A kutatás egyik fő célja az volt, hogy numerikus modellek segítségével minél pontosabban reprodukálják a kialakuló áramlási viszonyokat, valamint a helyszíni mérések alapján bővítsék ismereteinket a természetes összefolyásnál kialakuló folyamatokról.

A Mosoni – Duna és a Rába összefolyása erősen aszimmetrikus, továbbá mindkét ág felvéze esetében még az összefolyás előtt megfigyelhetők a kialakult másodlagos áramlások. A főmeder esetén ez a

mederkanyarulatnak, míg a mellékág esetén a Radó-sziget utáni összefolyásnak köszönhető. A terepi mérések elvégzésekor a Rábán nagyobb vízhozam érkezett, mint a Mosoni-Dunán, ezek aránya 1,8 volt.

A vizsgálatok alapján elmondható volt, hogy a számított térbeli sebességeloszlások jó egyezést mutatnak a mozgóhajós ADCP vizsgálatok eredményeivel, azonban a Mosoni-Duna esetében a sebesség néhol alábecsült.

A LES szimuláció esetén olyan vektormezők is megfigyelhetők, amik számítására az első vizsgálati modell nem alkalmas. A kirajzolt elkeveredési struktúrák jól egyeznek az általános elkeveredési formákkal, a geometria összetettsége ellenére is.

A különböző vizsgálatok lehetőséget teremtettek a lokális áramlási viszonyok pontosabb megismerésére, továbbá az eredmények összehasonlítására. A vizsgálatok alapján elmondható, hogy a 3D RANS egyenleteken alapuló modell megfelelő pontossággal képi le a valós viszonyok között kialakuló áramlási struktúrákat.

3. Az alkalmazott 3D numerikus hidrodinamikai modell bemutatása

A numerikus vizsgálatok során a Norvég Műszaki Egyetem által fejlesztett, a RANS egyenletek közelítő megoldását a $k-\varepsilon$ turbulencia modellel számító, SSIIM (*Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option*) modellt használtam, amit az elmúlt években sikeresen alkalmaztak hazai problémák (Mosonmagyaróvári Duzzasztó felveze, Mosoni-Duna és Rába győri belterületi szakasza) vizsgálatához.

3.1. Alapegyenletek

A háromdimenziós modell a folyadéktest térfogat- és impulzus-megmaradásán alapszik, amelyeket a Navier-Stokes egyenletek segítségével ír le. A térfogat-megmaradást egy, az impulzus-megmaradást három egyenlet segítségével közelíthető. Az egyenletekben ismeretlenként a nyomás és a sebesség háromirányú (x,y,z) komponense szerepel. Az egyenletrendszer direkt megoldása ebben a formában nem lehetséges, ezért a modellt a Navier-Stokes egyenletek Reynolds-átlagolt alakját használja, ami az összenyomhatatlan turbulens állapot esetén a következő alakban írható fel:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

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

ahol U = időátlagolt sebesség; u = pulzációs sebesség összetevői; P = nyomás; x_j = Descartes-féle koordináták; δ_{ij} = Kronecker-delta.

A második egyenlet valójában magában foglalja a tér mindhárom irányában felírt impulzus-egyenleteket, ezt a fajta tömörített felírást Einstein-féle összegzésnek nevezzük. Az egyenlet bal oldalán található a lokális tag, amely a sebességkomponens időbeli változását írja le; a második tag a konvekciót becsülő tag. Míg a jobb oldal első tagja a nyomás térbeli megváltozását írja le; a második pedig az időátlagolásból származó ún. Reynolds-tag, ami a turbulens pótfeszültségeket fejezi ki.

A modell a turbulens pótfeszültségeket az egyenletben a Boussinesq-közelítés segítségével veszi figyelembe:

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

ahol ν_T = örvényviszkózitási együttható; k = turbulens kinetikai energia.

Az egyenlet jobb oldalán található első tag határozza meg a diffúzió mértékét. A második tag általában elhanyagolható (az általam használt modellben alapértelmezés szerint elhanyagolásra kerül, azonban külön kérhető a figyelembevétel), míg a harmadik szintén nagyon kis jelentőségű tag a Navier-Stokes egyenlet nyomás tagjával együtt kerül megoldásra. (Hanczár, 2009)

Ezek alapján a Navier-Stokes egyenlet a következő formában írható fel:

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

Az egyenlet első és második tagja a lokális, illetve az advektív gyorsulást írja le. Az egyenlet jobb oldalán szereplő tagok a nyomást, a kinetikus energia térbeli megváltozását, az impulzusediffúziót és feszültséget becsülő összefüggések.

3.2. A k - ε turbulencia modell

A fentebb ismertetett tömeg- és impulzus-megmaradást leíró egyenleteket egzakt megoldása még nem ismert. Szükségünk van még egy konstitutív egyenletre, vagyis egy olyan egyenlet bevezetésére, ami a határozatlan egyenletrendszer határozottá teszi. A probléma megoldásául a turbulencia modell alkalmazása szolgál.

A turbulens hatások (szabálytalan-, pulzáló áramlási jelenségek) pontos figyelembe vételére a modell csak nagyon finom rácsháló kiosztás mellett lenne képes, ez azonban a számítási igényt oly mértékben megnövelné, hogy a mai számítógép kapacitások ismeretében a számítás gyakorlatilag kivitelezhetetlen lenne. Ezért a modell ezen hatások figyelembe vételére a fentebb bemutatott Boussinesq-közelítést használja. A benne szereplő örvényviszkózitás értékére a k - ε turbulencia modell ad közelítő megoldást, ami a következő formában írható fel:

$$v_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

ahol ε = turbulens kinetikai energia disszipációs rátája; c_μ = konstans.

Az itt megjelenő két új ismeretlen meghatározásához további egyenletek bevezetésére van szükségünk:

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

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

Az egyenletben szereplő P_k a kinetikai energiát jelenti, ami a következő alakban írható fel:

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

Ezek felhasználásával a kiindulási egyenletrendszer határozottá válik, így megoldható.

Fontos figyelembe venni, hogy a k - ε modell segítségével meghatározott örvényviszkózitás *izotróp*. Laboratóriumi körülmények között azonban igazolták, hogy az örvényviszkózitás értéke az áramlás irányában akár nagyságrendekkel nagyobb lehet, mint keresztirányban. Ez a megállapítás korlátozhatja a modell alkalmazási lehetőségeit.

3.3. A faltörvény

Az áramlást határoló szilárd felületek környezetében a sebességgradiens értéke nagyon gyorsan változhat, amelyek stabilitási problémákhoz vezethetnek. Azok kiküszöböléséhez sokkal finomabb kiosztású rácshálóra lenne szükségünk, ami a számítási igényeket nagymértékben megnövelné. A futtatási idő növekedésének elkerülése érdekében a modell az ún. faltörvényt alkalmazza, ami a szilárd felületek mellett kialakuló sebességeket egy empirikus képlet segítségével határozza meg:

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

ahol, u_* = fenék-csúsztatósebesség, κ = Kármán állandó, y = a faltól mért távolság, k_s = a mederanyag szemösszetételre jellemző ún. Nikuradze-féle érdességmagasság.

A program más algoritmusok alapján is képes figyelembe venni a faltörvényt, ezek megadása külső állomány segítségével történik. Vizsgálataim során az előre beépített algoritmust használtam.

4. Az numerikus hordaléktranszport modell bemutatása

A hordaléktranszport vizsgálatokor megkülönböztetünk lebegtetett, illetve görgetett hordalékot. Az előbbi a víztérben úszva, míg az utóbb a mederfenéken gördülve illetve ugrálva halad az áramlással. Az vizsgált szemcse mozgásának jellegét elsősorban a mérete, illetve a turbulencia határozza meg. A kialakuló mozgás jellegére a Hunter-Rouse (z) szám enged következtetni, amit a következő alakban írhatunk fel:

$$z = \frac{w}{\kappa u_*},$$

ahol, w = hordalékszemcse ülepedési sebessége.

Amennyiben z értéke egynél nagyobb, akkor a szemcse görgetett, ellenkező esetben lebegtetett hordalékmozgást végez.

Az ülepedési sebesség meghatározása Stokes törvény alapján történik:

$$w = \frac{gd^2(\rho_h - \rho_v)}{18\mu},$$

ahol d = szemcseátmérő; μ = a víz dinamikai viszkozitása.

4.1. Lebegtetett hordaléktranszport számítása

A modell a lebegtetett hordalék tér- és időbeli változásának számítására alábbi advekciós-diffúziós egyenletet oldja meg:

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

ahol a c = koncentráció; U_j = az áramlás sebessége a tér mindhárom irányában, Γ_T = turbulens diffúzió.

A hordalék kiülepedése konvekció jellegű folyamat. A turbulens diffúziós értékét turbulencia modellből kapott örvény-viszkozitás és a Schmidt szám segítségével határozhatjuk meg:

$$\Gamma_T = \frac{v_T}{Sc}.$$

Az alapértelmezett beállítása a Schmidt számra vonatkozólag 1,0 azonban a program lehetőséget nyújt ettől eltérő értékek megadására is.

A mederfenékhez közeli cellákban a kiülepedés, illetve a felkeveredés számítása a van Rijn formula alapján történik. Az empirikus összefüggés a dimenzió nélküli fenék-csúsztatófeszültség és a szemátmérő között teremt kapcsolatot. Ez alapján az egyensúlyi koncentráció értéke a következő alakban írható fel:

$$c_{med} = 0,015 \frac{d^{0,3} \left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1,5}}{a \left[\frac{(\rho_h - \rho_v)g}{\rho_v v^2} \right]^{0,1}},$$

ahol τ = fenékcúsztató feszültség; τ_c = kritikus fenékcúsztató feszültség; ρ_h = hordalék sűrűsége; ρ_v = víz sűrűség.

Az egyensúlyi koncentráció egy viszonyszám. Amennyiben a mederfenék közeli cellára számított koncentráció meghaladja ezt az értéket kiülepedés, ellenkező esetben felkeveredés megy végbe.

4.2. Görgetett hordaléktranszport számítása

A kutatásomban alkalmazott modell a görgetett hordaléktranszportot van Rijn (1987) összefüggése alapján becsli:

$$\frac{q_b}{D_{50}^{1,5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w}}} = 0,053 \frac{\left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{2,1}}{D_{50}^{0,3} \left[\left(\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right) \right]^{0,1}}$$

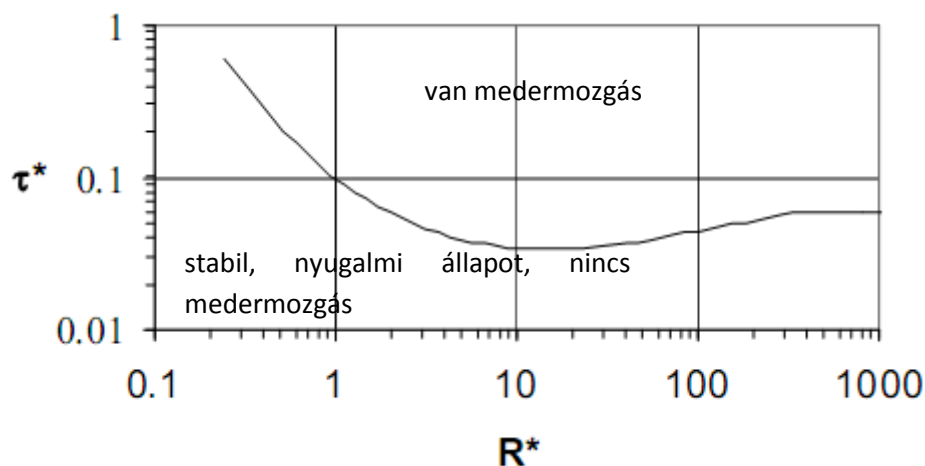
ahol D_{50} = a szemeloszlási görbe 50%-hoz tartozó szemcseátmérő.

Ezt az összefüggést homogén szemösszetételű mederanyagú medrek hordaléktranszportjának becslésére fejlesztették ki. Ezért fontos megjegyezni, hogy az így számított hordaléktranszport fenntartásokkal értelmezendő.

4.3. Kritikus csúsztatófeszültség számítása

A kritikus fenék-cúsztatófeszültség az a feszültség, aminél az áramlás a vizsgált szemcsét épp elragadja. Ameddig a fenék-cúsztatófeszültség nem éri el ezt az értéket, addig a szemcse nyugalomban marad a mederfenéken. A kritikus fenék-cúsztatófeszültség becslésére több eljárás található a szakirodalomban. Az általam alkalmazott hordaléktranszport modell Shields által kidolgozott eljárást alkalmazza, amit homogén szemösszetételű mederanyagra dolgozott ki.

A kutató az alábbi görbét állította föl a kritikus fenék-cúsztatófeszültség becslésére:



13. ábra Shields görbe

A vízszintes tengelyen az ún. részecske Reynolds szám (R^*) található:

$$R^* = \frac{d \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}}{\nu}$$

A függőleges tengelyen a dimenziómentes csúsztatófeszültség (τ^*), más néven dimenziómentes Shields-féle szám szerepel:

$$\tau^* = \frac{\tau_c}{g(\rho_s - \rho_w)d}$$

A Shields görbe azt mutatja meg, hogy mekkora a vizsgált szemcsére jellemző kritikus fenékcsúsztatófeszültség az átmérőjének függvényében.

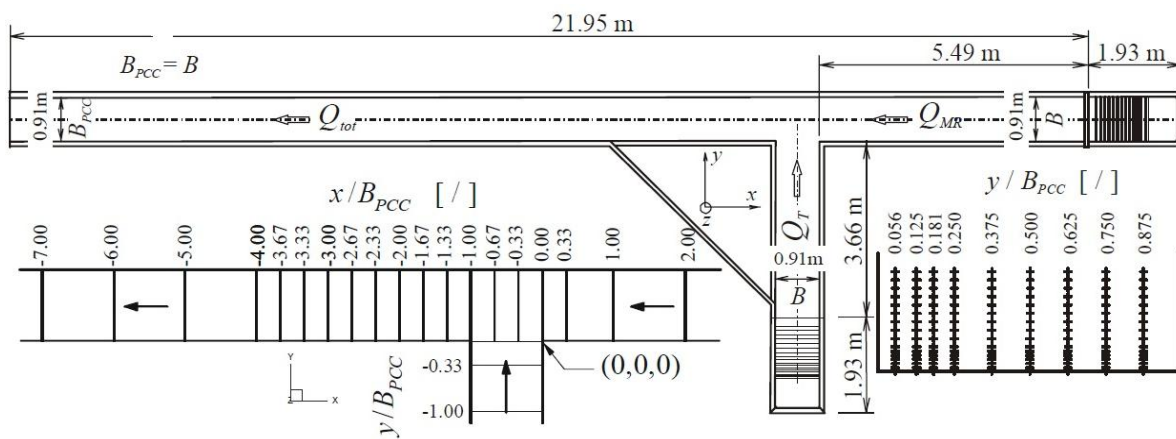
5. A hidrodinamikai modell igazolása

Numerikus modellek alkalmazása előtt igazolni kell azok megbízhatóságát. Ehhez a modell által számított eredményeket megbízható mérések eredményeivel kell összehasonlítani. Arra kell rámutatni, hogy a modell az áramlást leíró változókat a vizsgálat célja szempontjából megfelelő pontossággal számítja.

Az alkalmazott hidrodinamikai modell igazolásához az lowai egyetem laborméréseinek eredményeit használtam fel (Weber et al., 2001).

5.1. A laboratóriumi kisminta bemutatása

A kisminta kísérletek során két egyenes tengelyű, azonos szélességű, egymással 90°-ban és azonos fenékszintben találkozó csatornák esetét vizsgálták. A tesztcsatorna geometriai kialakítása az irodalomkutatás fejezetben, az 1. ábra által bemutatottal megegyező.



14. ábra A laboratóriumi kisminta geometriai kialakítása

A vizsgálat során alkalmazott koordináta rendszer x -tengelyének pozitív iránya a főcsatorna folyásirányával ellentétes irányú, az y -tengely pozitív iránya a mellécsatorna folyásirányával megegyező irányú, míg a z -tengely pozitív iránya a mederfenékről a vízfelszín irányába mutat. A mérés során a távolságokat a csatornaszélesség ($W = 0,914 \text{ m}$), míg a sebességeket az átlagsebességgel ($V_a = 0,628 \text{ m/s}$) normálták. Ezeket a dimenziómentes értékeket *-gal jelölték. Továbbá q^* jelenti a mellécsatorna és a főcsatorna vízhozamának arányát.

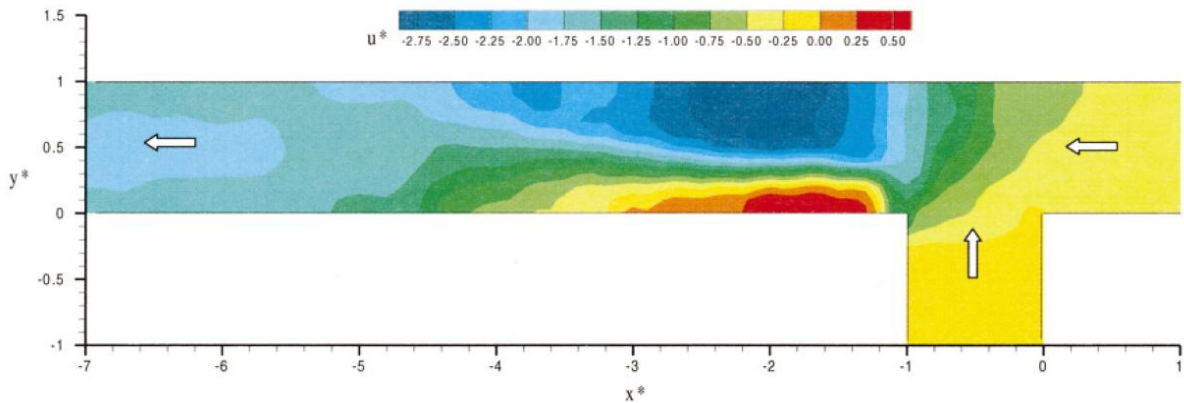
A sebességek és a turbulencia mérésére háromdimenziós akusztikus Doppler sebességmérőt (ADV) használtak. A közel 2 850 mérési pont elhelyezkedését szintén az 14. ábra mutatja. A mérés minden mintavételi helyen 60 másodpercig tartott, az így kapott idősorok alapján határozták meg az időátlagolt sebesség és a turbulencia értékét.

5.2. A mért és modellezett értékek összehasonlítása

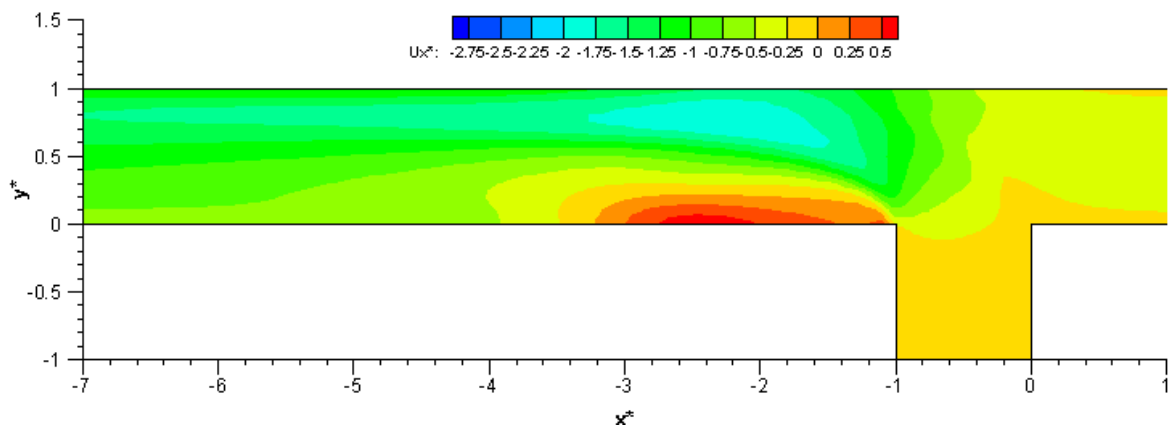
A kisminta kísérletet különböző vízhozam arányokkal végezték el. Az igazoláshoz én a $q^* = 0,250$ esettel foglalkozom, ahol a főcsatorna vízhozama $Q_f = 0,042 \text{ m}^3/\text{s}$, a mellécsatorna vízhozama pedig

$Q_m = 0,127 \text{ m}^3/\text{s}$. Az itt kapott mérési eredményeket hasonlítom össze a modell által számított értékekkel.

Első lépésként $z^* = 0,278$, felszínközeli magasságban hasonlítottam össze a sebesség profilokat. A 15. ábra mutatja a kisminta kísérlet alapján meghatározott sebességeloszlást, míg a 16. ábra a numerikus modell által meghatározott u^* sebességeket szemlélteti.



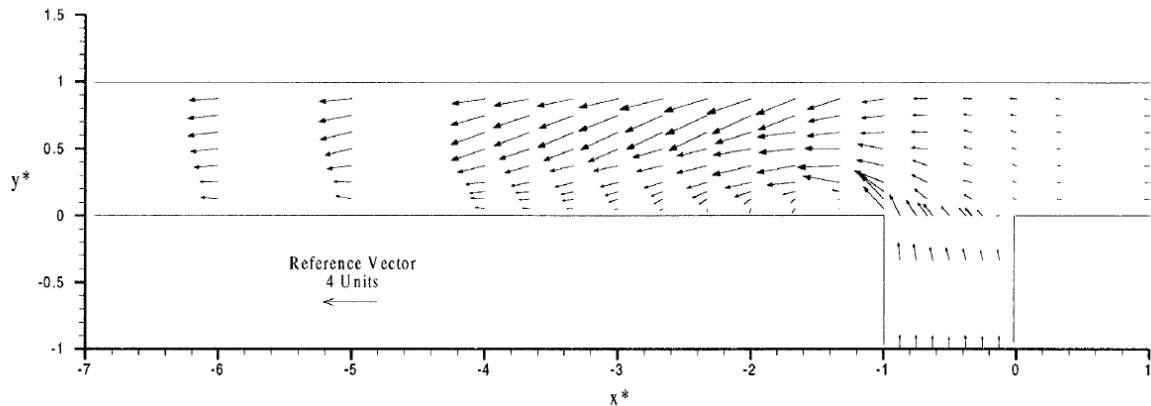
15. ábra Kisminta kísérlet által meghatározott u^* sebességprofil $z^* = 0,278$ magasságban és $q^* = 0,250$ vízhozam arány esetén



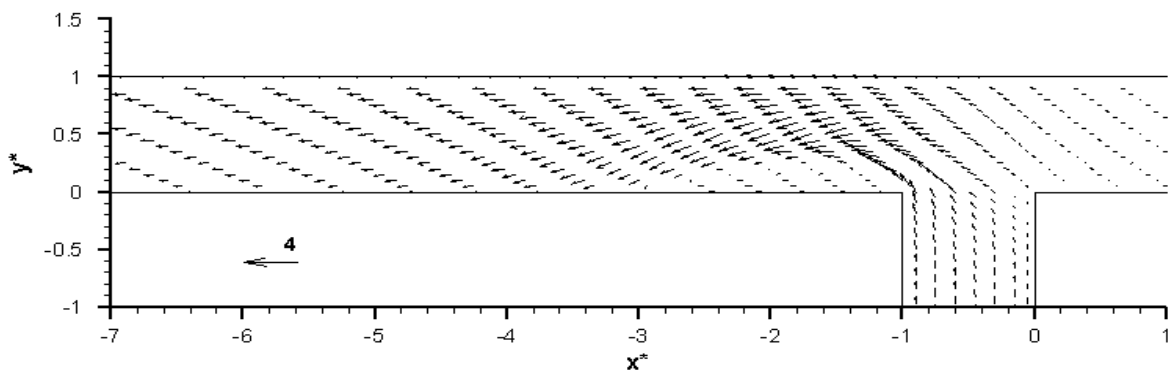
16. ábra Numerikus modell által meghatározott u^* sebességprofil $z^* = 0,278$ magasságban és $q^* = 0,250$ vízhozam arány esetén

A két dimenziómentes sebességmezőt összehasonlítva megállapítható, hogy a numerikus modell eredményei jól tükrözik a kisminta vizsgálat alapján meghatározott sebességeloszlás jellegét. A modell eredményeken is megjelenik a találkozás után közvetlenül kialakuló visszaáramlási zóna (piros színnel festett zóna), melynek elhelyezkedése és geometriai jellemzői (hossz, szélesség) jól egyeznek a kísérleti eredményekkel. Az itt látható pozitív sebességek azt mutatják, hogy a zónában visszaáramlás alakul ki. A kialakuló sebességek értékeit vizsgálva azt látjuk, hogy a program rendre alulbecsli azokat.

A 17. ábra és a 18. ábra szemlélteti az $u^* - v^*$ sebességek által meghatározott vektormezőket a fenékszíntől mért $z^* = 0,014$ dimenzió nélküli, mederfenék közeli magasságban. A sebességek nagyságai közötti különbségek ebben az esetben is megmutatkoznak. A vektorok irányában az egyezés viszont kielégítő.



17. ábra u^*-v^* sebességek által meghatározott vektormező a kisminta kísérlet alapján, $q^* = 0,250$ vízhozam arány és $z^* = 0,014$ magasság esetén



18. ábra u^*-v^* sebességek által meghatározott vektormező a numerikus modell alapján, $q^* = 0,250$ vízhozam arány és $z^* = 0,014$ magasság esetén

A mellékcsatorna felől jelentősen nagyobb hozamú víz érkezik, mint a főágból. Ez azt eredményezi, hogy a főágban alacsonyabb sebességek adódnak és a torkolatnál kialakuló áramlási viszonyokat elsősorban a mellékágból érkező víz határozza meg.

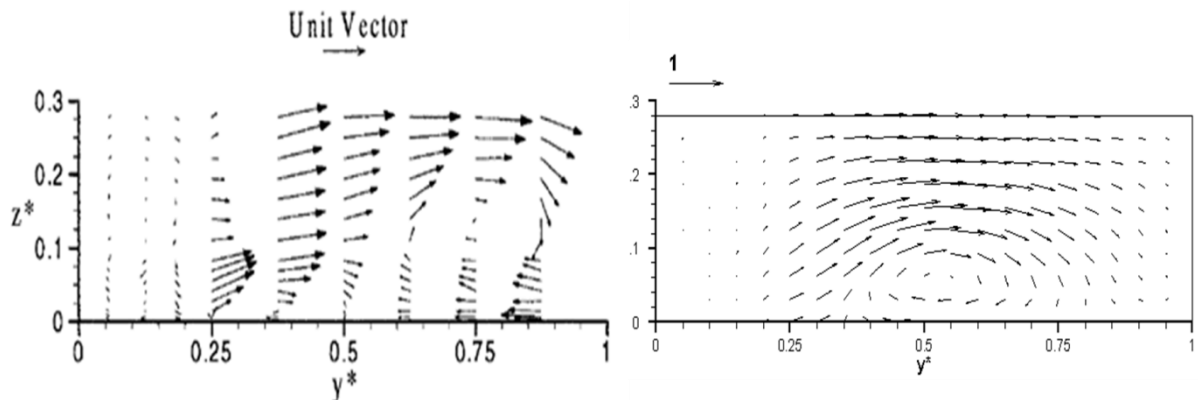
A vektorok mindkét esetben jól jelzik a kialakuló leválási zónát. A modell eredmények által jelzett szakasz hossza és szélessége közel megegyezik a mérési eredmények esetén tapasztaltakkal. Bár a becsatlakozástól távolodva a modellezett esetben hamarabb párhuzamossá válnak a sebességvektorok, az alvízi vektor irányjaiban is kielégítő egyezést tapasztaltam.

Végezetül a főcsatorna $x^* = -1,33$ távolságában lévő keresztmetszet a v^*-w^* sebességvektor mezőit hasonlítottam össze. Az eredményeket a 19. ábra mutatja. Mind a mérési- és a számítási eredmények egy gyenge és domináns csavaráramlás kialakulását jelezték. A kialakuló egycellás csavaráramlást a numerikus modell a szelvény közepe és a mederfenék felé eltolva becsli. Feltételezhetjük, hogy ezek az eltérések a különböző sebességviszonyok miatt lehetségesek.

A keresztmetszet bal oldali felső kétharmadában is kialakul egy jelentősen kisebb és gyengébb csavaráramlás. Azt láthatjuk, hogy a visszaáramlási zónában függőleges értelemben is kialakul csavaráramlás. A modelleredmények ennek a csavaráramlásnak az elhelyezkedését jól jelezték.

A keresztmetszetben tehát egy egycellás csavaráramlás alakul ki. A fő és mellékág vízhozam arányának tükrében ez a kialakult áramlási struktúra összhangban áll Bradbrook, Lane és Richards (2.3 fejezet) kutatási eredményeivel. Miszerint aszimmetrikus geometriájú és jelentősen eltérő

hozamú összefolyásoknál egycellás csavaráramlás alakul ki, ami a nagyobb hozamú ággal átellenes part felé tolódik el.



19. ábra Kísérleti eredmények által meghatározott (bal) és a modellezett (jobb) v^*-w^* vektormező

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a numerikus modell által meghatározott sebességek általában alacsonyabbak a tesztcsatornában kialakultaknál. Ebből kifolyólag a kapott eredményeket megfelelő fenntartással kell kezelni. Azonban a modell kellő pontossággal írja le a kialakuló áramlások jellegét, ezért az áramlás során kialakuló struktúrák vizsgálatára alkalmas.

6. Modell felépítése

Vizsgálataim során leegyszerűsített geometriájú csatornák segítségével vizsgáltam, hogy különböző paraméterek változtatása milyen hatással van a találkozó folyók medermorfológiai (lokális kimélyülések, feltöltődések) alakulására.

6.1. Geometria kialakítása

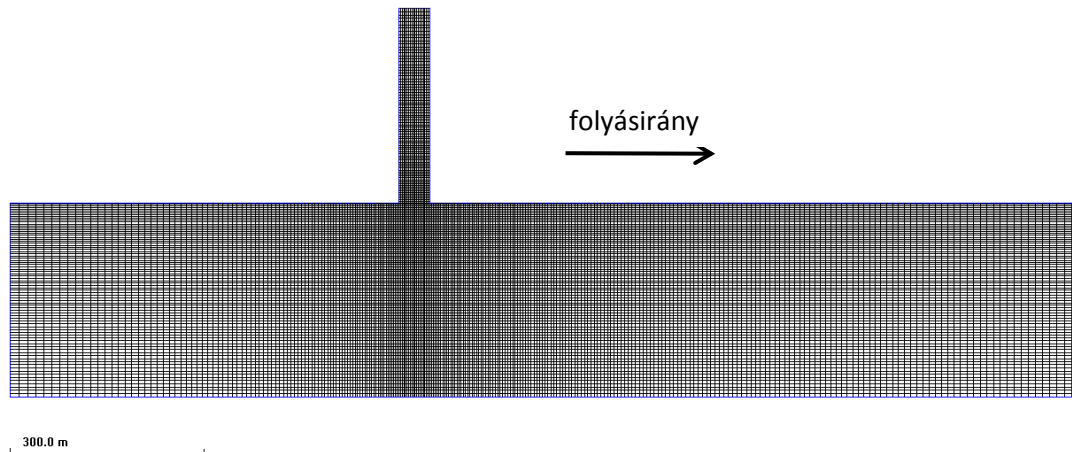
A tesztmodellek egyszerű geometriája mellett a gyakorlati hasznót is szem előtt tartva törekedtem valós összefolyás leegyszerűsített modelljének kialakítására.



20. ábra Garam torkolata

A Garam torkolata a Duna 1716 fkm-nél található (20. ábra). A két folyó eltérő mederanyaga, hordaléka, léptéke, jellemző vízhozama stb. eredményezi a szakasz egyedi áramlási és morfológiai viszonyait. A tesztmodellek geometriájának kialakításánál és hidrodinamikai változók megválasztásánál a Garam torkolati szakaszának jellemzőiből indultam ki.

A főcsatorna szélességét 300 méternek határoztam meg, ami megközelítőleg a Duna átlagos szélessége, míg a mellékfolyó szélességét a Garam szélessége alapján 50 méternek vettem fel. A mellékág a főmeder bal partjához csatlakozik, mint ahogyan az a valós szakaszon is megfigyelhető. A két vízfolyás fenékszintjét azonosnak tekintettem. Az így kialakított geometriát egyblokkos 161x291x11-es számítási rácshálóval fedtem le. A számítási rácshálóból kizártam a száraz cellákat a számítási igény csökkentése céljából. Az így elkészített alapeometria rácsháló kiosztását a 21. ábra mutatja be.



21. ábra Az alapeometria számítási rácshálója

A tanulmányban több geometriai változatot vizsgáltam. Az kiindulási paraméterek, mint a csatornák hossza, szélessége és az alkalmazott rácsháló kiosztása változatlan maradt. Azonban a csatornák találkozási szöge megváltozott (30°, 60°, 90°). Továbbá olyan esetet is vizsgáltam, amikor a találkozásnál a folyók fenékszintje nem volt egy szintben, a mellékág fenékszintje 4 méterrel meghaladta a főágét.

6.2. Peremfeltétek megadása

A peremfeltételek meghatározása során továbbra is a Duna-Garam torkolati szakaszt vettem alapul. A vízhozamok nagyságát tekintve két különböző eset került vizsgálatra. Az első esetben a főcsatorna vízhozama $Q_f = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$, míg a mellékcsatorna vízhozama $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ volt, valamint a kifolyási szelvényben a vízszint magassága $h_{kif} = 6$ méter. Ezek az adatok azt az állapotot tükrözik, amikor a Dunán és a Garamon is egyaránt kisvíz folyik.

A második esetben a főcsatorna vízhozama változatlan maradt, azonban a mellékcsatornáról nagyvíz érkezett, $Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Ekkor a kifolyási szelvényben a vízszint magassága $h_{kif} = 6,72$ méter volt.

6.3. Mederanyag jellemzők megadása

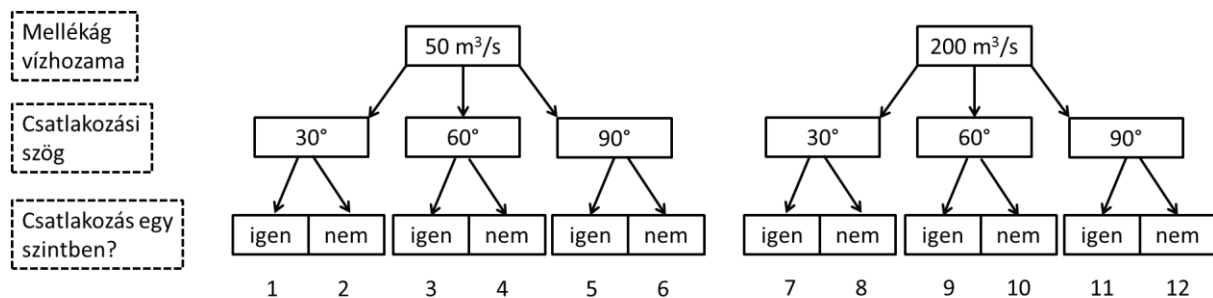
A morfodinamikai vizsgálat során, a meder anyagát tekintve két különböző állapotot vizsgáltam. Először azt feltételeztem, hogy a főmeder és a mellékág mederanyaga azonos szemösszetételű. Vizsgálatom során itt mindenütt 1 mm-es szemátmérőjű anyagot helyeztem el. Másodjára azonban azt az esetet vizsgáltam, amikor a mellékág durvább mederanyaggal rendelkezik, mint a főcsatorna. Ebben az esetben a főág mederanyaga változatlan marad (1 mm), azonban a mellékág mederanyagát 1mm-ről 5 mm-re emeltem.

7. Eredmények bemutatása

Az előző fejezetben ismertetett modellváltozatok futtatásához szükségem volt az adott változat kezdeti pillanatában kialakult permanens áramlásmezőre. Erre azért volt szükség, mert egy adott változat esetén, az áramlási modell kezdeti lépéseiben valószerűtlen sebességviszonyok alakulhatnak ki, amelyek hatással lehetnek a mederváltozásokra, ezáltal valószerűtlen mederváltozásokat eredményezhetett volna. Ezért minden geometriai változat esetén a hordaléktranszport modellek futtatását permanens hidrodinamikai modell futtatása előzte meg. A hordaléktranszport modelleket a permanens áramlásmezőket felhasználva indítottam.

7.1. Áramlásmodellek eredményei

A permanens áramképet 12 változatra határoztam meg. Változó paraméter az összefolyások találkozási szöge (30° , 60° , 90°), a becsatlakozás magassági kialakítása (szintbeli vagy nem szintbeli összefolyás) valamint a mellékágról érkező vízhozamok voltak ($50 \text{ m}^3/\text{s}$, vagy $200 \text{ m}^3/\text{s}$). Így összesen 12 hidrodinamikai modellt futtattam (22. ábra).



22. ábra Futtatott hidrodinamikai modellváltozatok

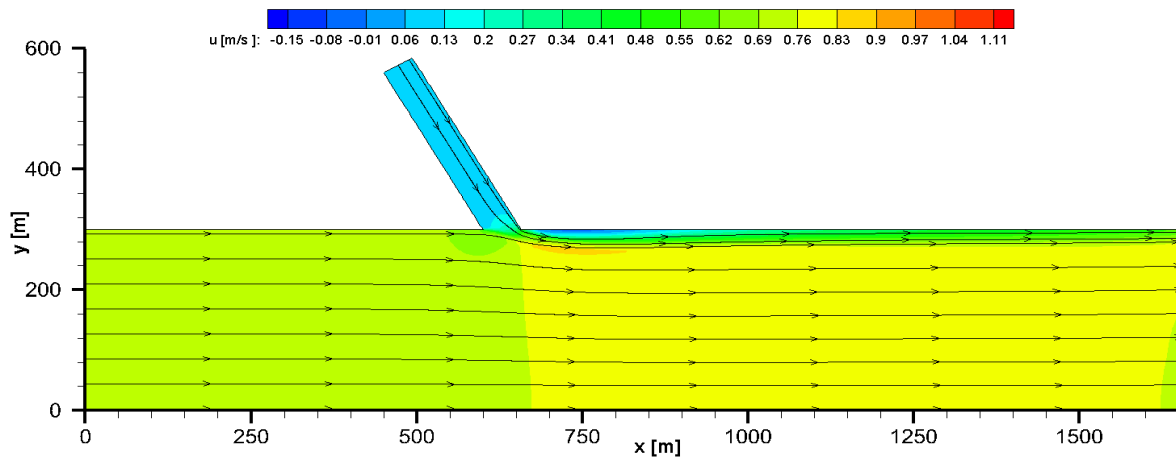
A következőkben az így kapott eredményeket ismertetem. A fontosabb jellemzőket ugyanazon négy változat segítségével szemléltetem.

A 23. ábra, 24. ábra, 25. ábra és a 26. ábra a végső, permanens állapot vízfelszín közeli sebességmezőjét mutatják a 3-as és 4-es, illetve a 6-os és 12-es futtatásokból. Kis vízhozamok esetén $z = 5,9 \text{ m}$, míg nagy vízhozam esetén $z = 6,6 \text{ m}$ abszolút magasságban ábrázoltam azokat.

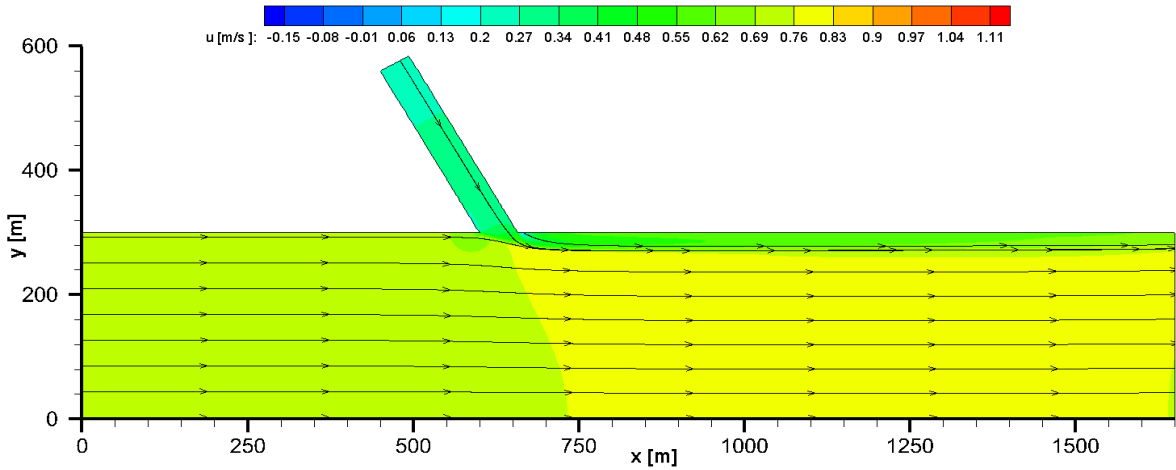
Vizsgálataim során 4 m-es szintkülönbséget alkalmaztam a nem szintbeli találkozás vizsgálatára. A 23. ábra és a 24. ábra összehasonlításából látható, hogy ez a változtatás a mellékág sebességének növekedéséhez vezet.

A számítási eredmények alapján elmondható, hogy növekszik a mellékágról érkező vízhozam áramlást módosító hatása, amennyiben a találkozás szöge közelíti a 90° -ot. Ezt a hatást erősíti a mellékágról érkező vízhozam növekedése. Minél nagyobb hozammal rendelkezik a becsatlakozó vízhozam, annál nagyobb ívben lép be a főcsatornába, a torkolati áramképre így egyre nagyobb hatást gyakorol (25. ábra, 26. ábra).

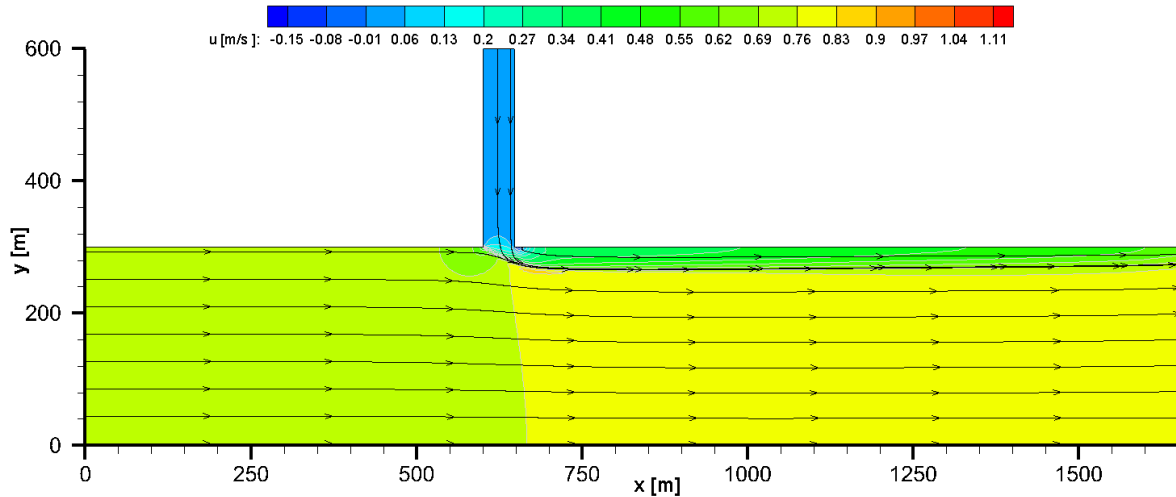
Az ábrákról az is leolvasható, hogy ha a mellékág vízhozama nagyobb ívben lép be a főágba, akkor az áramlás eltérülés később következik be. Ez azt eredményezi, hogy a torkolat alatti, bal parti holtter kiterjedése megnő. A zónában lévő negatív sebességek visszaáramlás kialakulását jelzik, továbbá a felszín közeli áramvonalak is ezt jelzik.



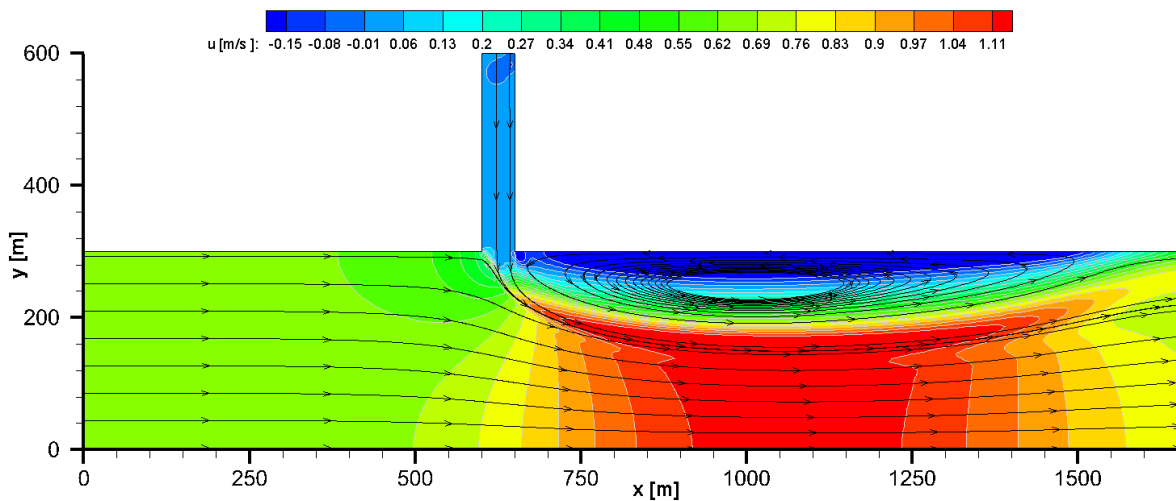
23. ábra: Vízfelszín közeli sebességek $z = 5,6$ m, $Q_m = 50$ m³/s, 60°-os találkozási szög, valamint szintbeli becsatlakozás esetén



24. ábra: Vízfelszín közeli sebességek $z = 5,6$ m, $Q_m = 50$ m³/s, 60°-os találkozási szög, valamint nem szintbeli becsatlakozás esetén

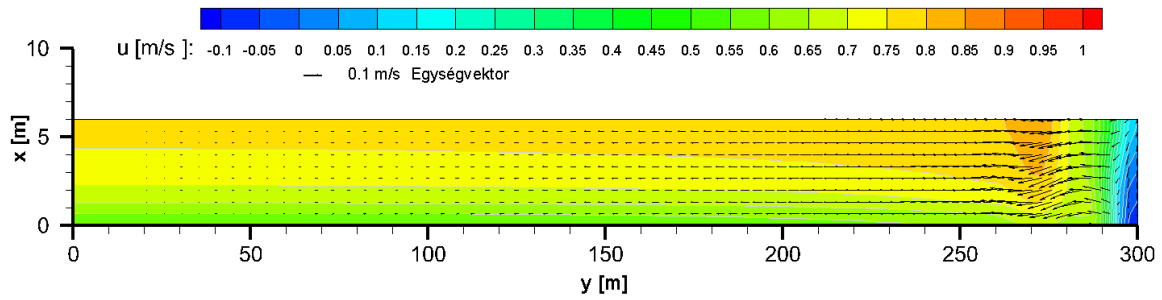


25. ábra: Vízfelszín közeli sebességek $z = 5,6$ m, $Q_m = 50$ m³/s, 90°-os találkozási szög, valamint nem szintbeli becsatlakozás esetén

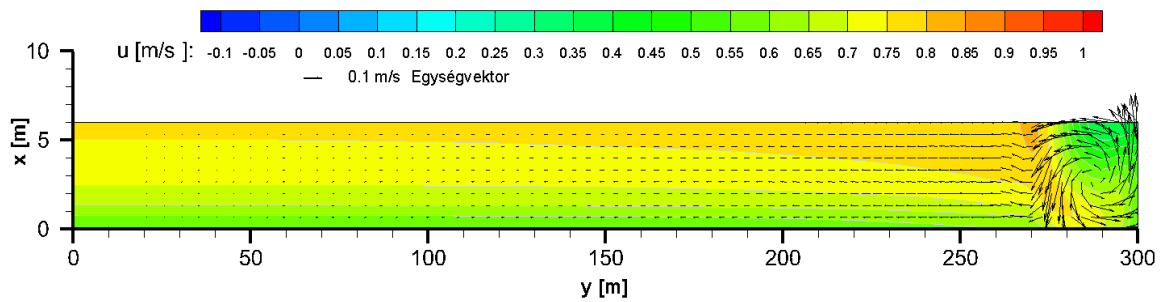


26. ábra: Vízfelszín közeli sebességek $z = 6,6$ m, $Q_m = 200$ m³/s, 90°-os találkozási szög, valamint nem szintbeli becsatlakozás esetén

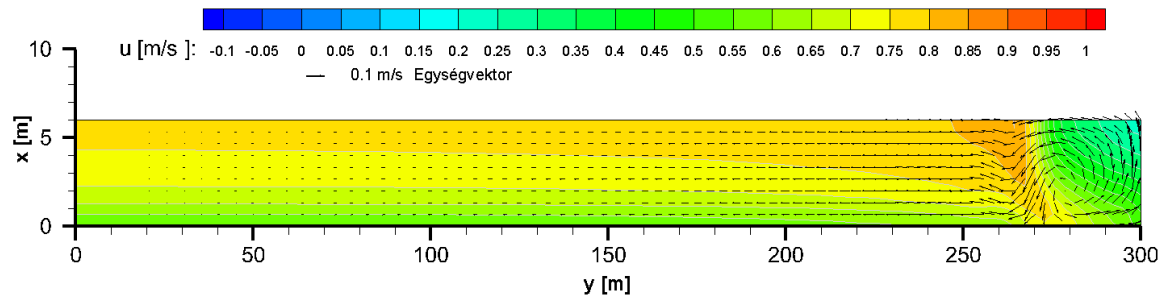
Az alvízen kialakuló áramlás vizsgálatának érdekében a keresztirányú sebesség viszonyokat is vizsgáltam. Az alább bemutatott keresztmetszvények az összefolyások alatt 25 m-re helyezkednek el. A 27. ábra a 3-as, a 28. ábra a 4-es, a 29. ábra a 6-os és a 30. ábra a 12-es futtatás végső állapotát mutatja be.



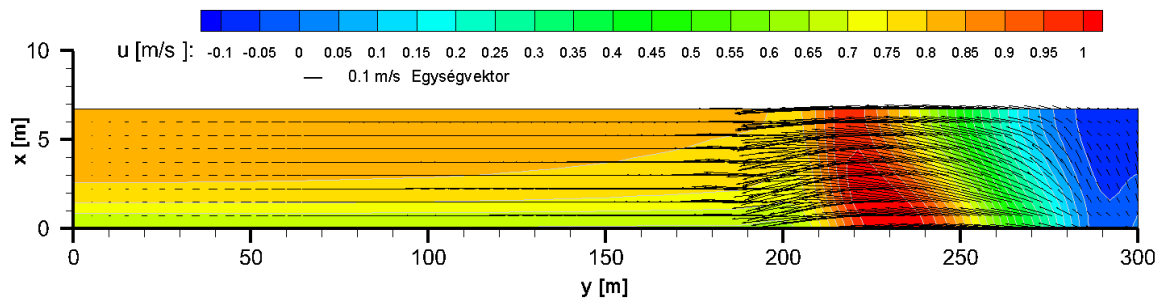
27. ábra: $x = 675,0$ m távolságra lévő keresztmetszetben kialakuló sebességviszonyok $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, 60° -os találkozási szög, valamint szintbeli becsatlakozás esetén



28. ábra: $x = 675,0$ m távolságra lévő keresztmetszetben kialakuló sebességviszonyok $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, 60° -os találkozási szög, valamint nem szintbeli becsatlakozás esetén



29. ábra: $x = 678,5$ m távolságra lévő keresztmetszetben kialakuló sebességviszonyok $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, 90° -os találkozási szög, valamint nem szintbeli becsatlakozás esetén



30. ábra: $x = 678,5$ m távolságra lévő keresztmetszetben kialakuló sebességviszonyok $Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$, 90° -os találkozási szög, valamint nem szintbeli becsatlakozás esetén

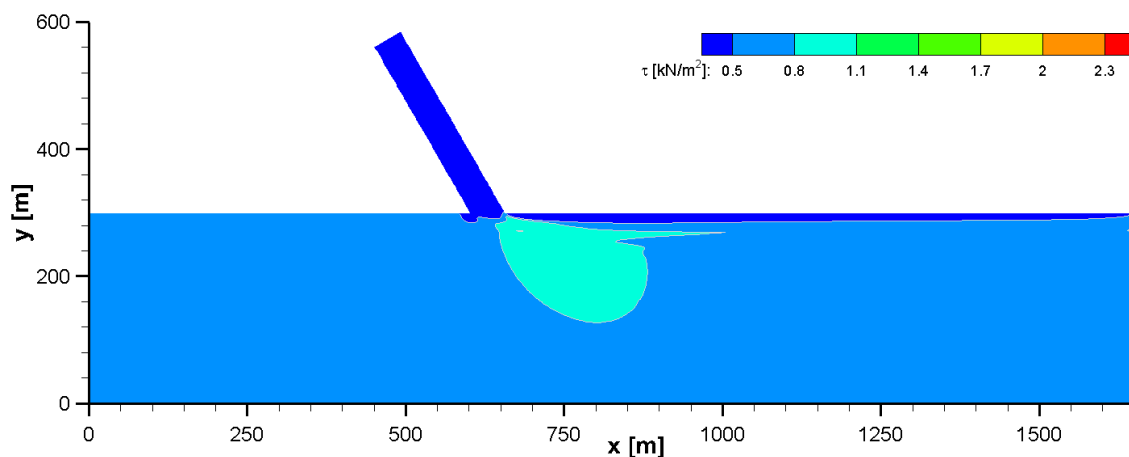
A 27. ábra azt az esetet mutatja, amikor a találkozás egy szintben, kis vízhozam esetén történik. A mellékágról érkező vízhozam nem rendelkezik erős áramlást módosító hatással, kismértékű lefele bukás azonban megfigyelhető.

A geometria változásával, azaz jelen esetben az alkalmazott 4 m-es szintkülönbség hatására egy egycellás csavaráramlás alakul ki (28. ábra). A 28. ábra és 29. ábra által bemutatott sebességvektor mezők alapján arra következtethetünk, hogy a csavaráramlás a találkozási szög növekedésével az oldalággal átellenes part felé tolódik el.

A 30. ábra azt mutatja, hogy a mellékág vízhozamának növekedése nagyobb keresztirányú sebességeket idéz elő a főágban. Ebben a távolságban már nem mutatható ki egycellás csavaráramlás. Az ábra kifestések alapján kimutatható, hogy a legnagyobb kiterjedésű kőröző áramlás az utolsó, nagy vízhozamú esetben alakul ki.

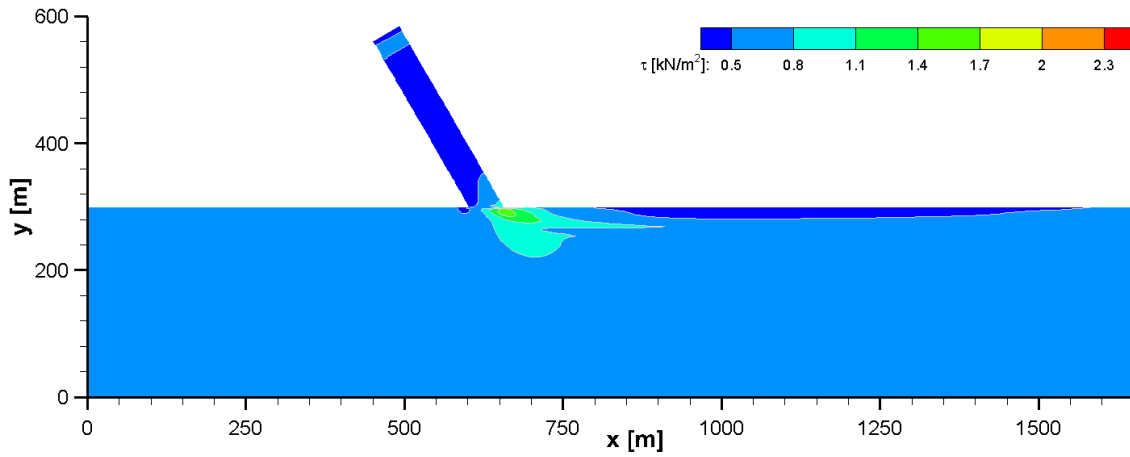
A fenék-csúsztatófeszültség nagy hatással van a morfodinamikai változásokra. Jellegének ismerete számunkra azért is fontos, mert szoros kapcsolatban áll a mederfenéken kialakuló változásokkal, így fontos információval bír morfodinamikai vizsgálatoknál.

A 31. ábra a 3-as futtatás végső állapotából származó fenék-csúsztatófeszültség mezőjét mutatja be. Látható, hogy az ismertetett körülmények mellett a vizsgált szakasz egész területén mederváltoztató hatás szempontjából alacsonynak mondható feszültségek jelentkeznek. Legnagyobb értékek a közvetlen összefolyásnál adódnak, 1,1 kN/m² körüli értékek.

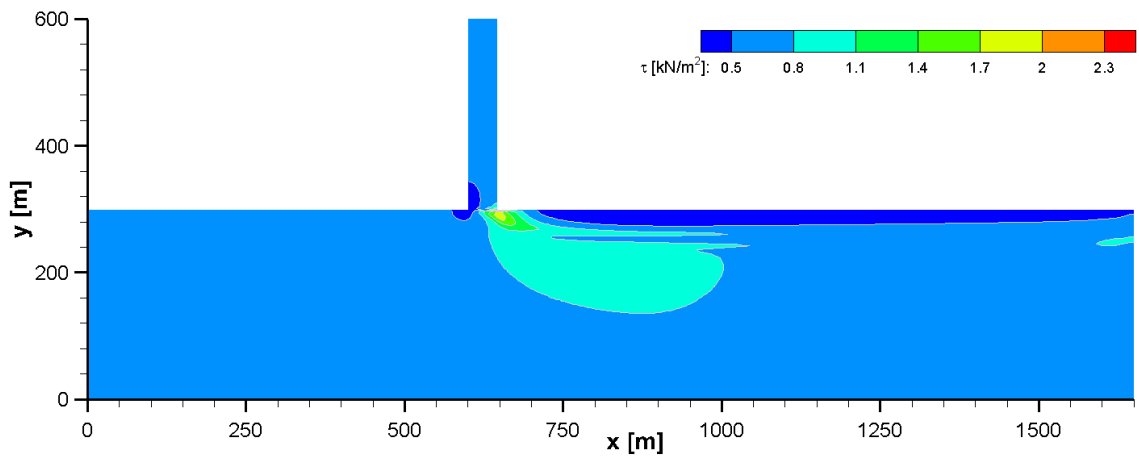


31. ábra: Fenékcúsztató feszültség értéke $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, 60° -os találkozási szög, valamint szintbeli becsatlakozás esetén

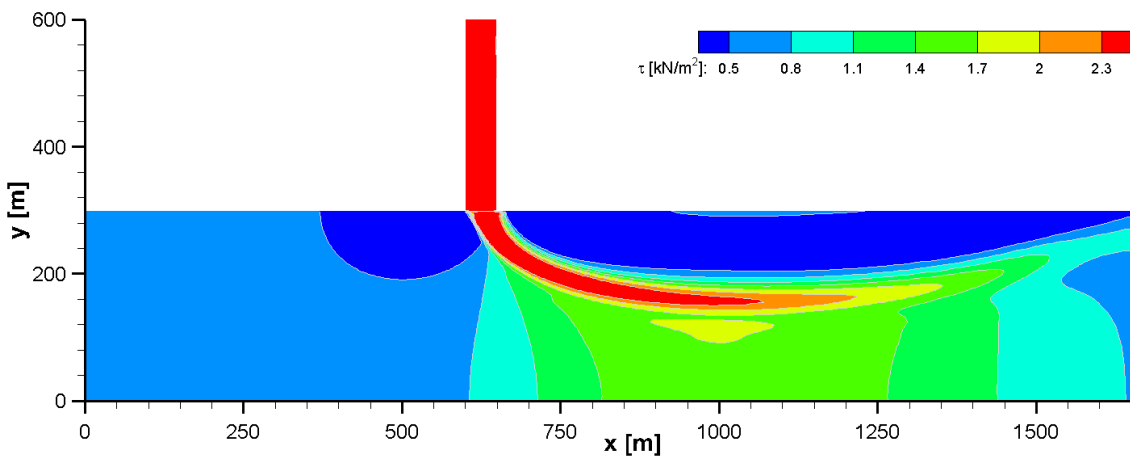
A 32. ábra alapján megállapítható, hogy a szintben eltérő csatlakozás a torkolat közvetlen környezetében nagyobb feszültségeket eredményez.



32. ábra: Fenékcúszató feszültség értéke $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, 60° -os találkozási szög, valamint nem szintbeli becsatlakozás esetén



33. ábra: Fenékcúszató feszültség értéke $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, 90° -os találkozási szög, valamint nem szintbeli becsatlakozás esetén



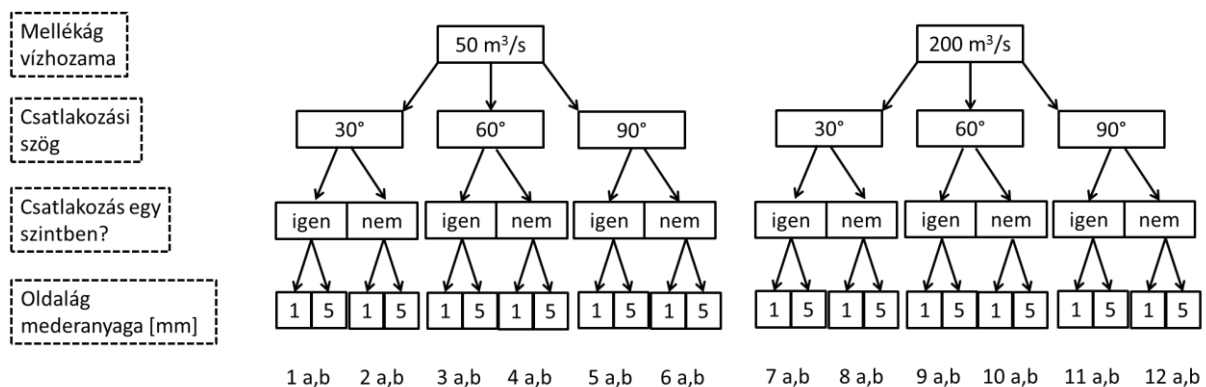
34. ábra: Fenékcúszató feszültség értéke $Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$, 90° -os találkozási szög, valamint nem szintbeli becsatlakozás esetén

Végül az oldalág vízhozamának a fenék-csúsztatófeszültség mezőre gyakorolt hatását vizsgáltam. A 34. ábra alapján arra a megállapításra jutottam, hogy az oldalág vízhozamának jelentős növekedése már nemcsak a torkolat közvetlen környezetében okoz jelentős feszültségnövekedést. A piros folt jól mutatja a mellékág sodorvonalát. Erre a viselkedésre a 26. ábra besűrűsödő áramvonalai is utalnak. Legnagyobb, $2,3 \text{ kN/m}^2$ -t meghaladó feszültségek ebben a sávban adódnak. A főág bal partja mentén, a torkolat alatti kőröző áramlásnál, valamint a torkolat feletti szakaszon a kék foltoknál adódnak a legalacsonyabb feszültség. Jelentősebb kiüledés elsősorban ezeken a helyeken várható.

7.2. Hordalékmodell eredmények

A numerikus modell segítségével a nagy számítási igény és a nagyszámú modellváltozat miatt a hordaléktranszport modellekkel relatíve rövid, egy hónapos időszak alatt bekövetkező mederváltozásokat vizsgáltam. Ez az időszak túl rövidnek bizonyult ahhoz, hogy a mederváltozások elérjenek egy ún. dinamikus egyensúlyi állapotot. Arra azonban, hogy rámutassak a legnagyobb kimélyülések és feltöltődések helyére, a mederváltozás tendenciájára és a különböző paraméterek morfodinamikai hatására ez a modellezési idő elegendőnek adódott.

Változó paraméterek a mellékágról érkező vízhozam ($50 \text{ m}^3/\text{s}$, vagy $200 \text{ m}^3/\text{s}$), az összefolyások találkozási szöge (30° , 60° , 90°), a becsatlakozás magassági kialakítása (szintbeli vagy nem szintbeli összefolyás), valamint az oldalág mederanyaga voltak. A futtatott, 24 modellváltozat paramétereit az alábbi ábra mutatja be.

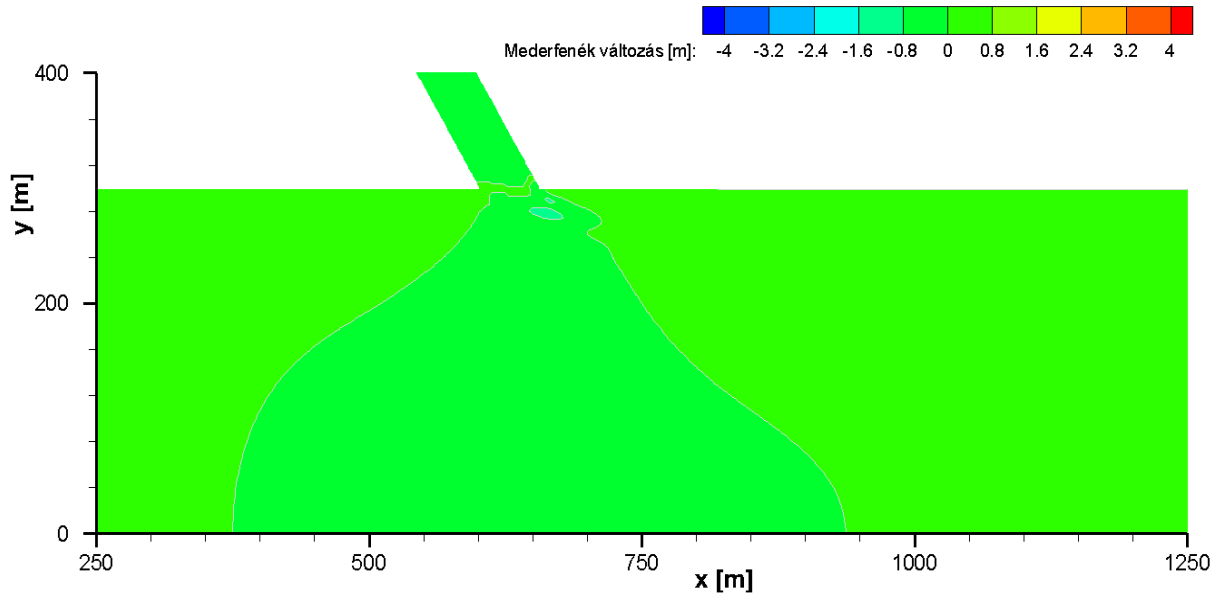


35. ábra Futtatott hordaléktranszport modellváltozatok

A továbbiakban néhány kiemelt példa segítségével szemléltetem a numerikus vizsgálatok fontosabb eredményeit.

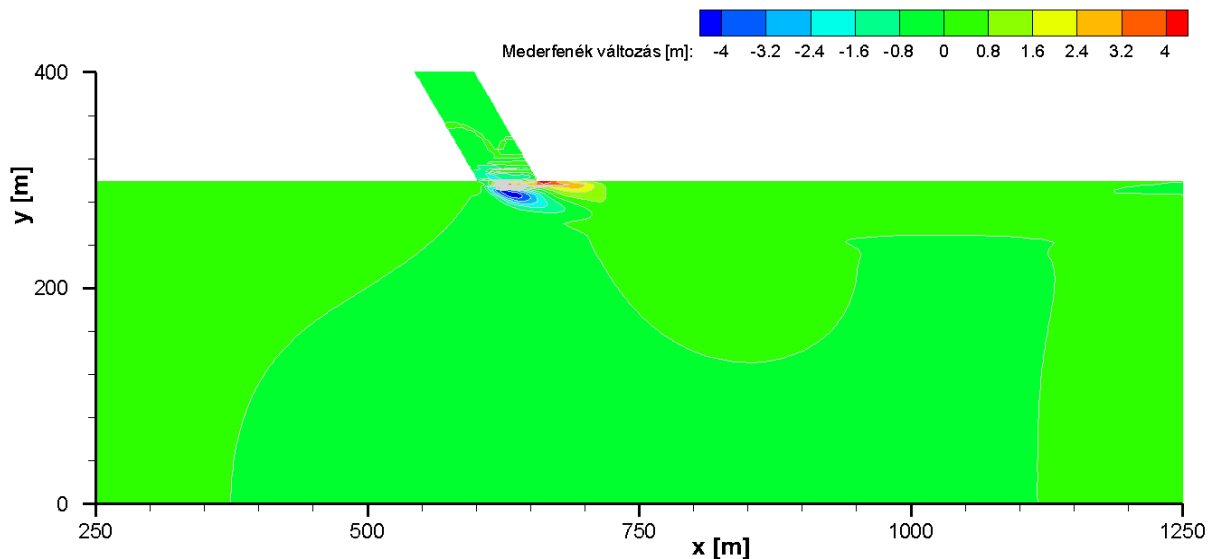
A morfodinamikai vizsgálatok során a kiindulási állapotot mindig az a változat jelentette, amikor a fő- és mellékág egymással 90° -ban, valamint azonos fenékszinttel találkozik. Ebben az esetben mindkét mederfenéken azonos mederanyag (1 mm) található, valamint a mellékág felől kisvíz ($Q_m=50 \text{ m}^3/\text{s}$) érkezik (5a jelű modellváltozat).

Az 36. ábra modellváltozata a kiindulási állapottól csak a csatornák csatlakozási szögében különbözik (3a). A vizsgálati eredmények azt mutatják, hogy a hozzáfolyás hatására a főág teljes keresztmetszeti szélességén enyhe kimosódás alakul ki. A torkolat közvetlen közelében egy kisebb kiterjedésű, de jelentős mértékű kimosódás figyelhető meg.



36. ábra: Mederfenék változása $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozam, 60° -os találkozási szög, azonos mederanyag és szintbeli becsatlakozás esetén

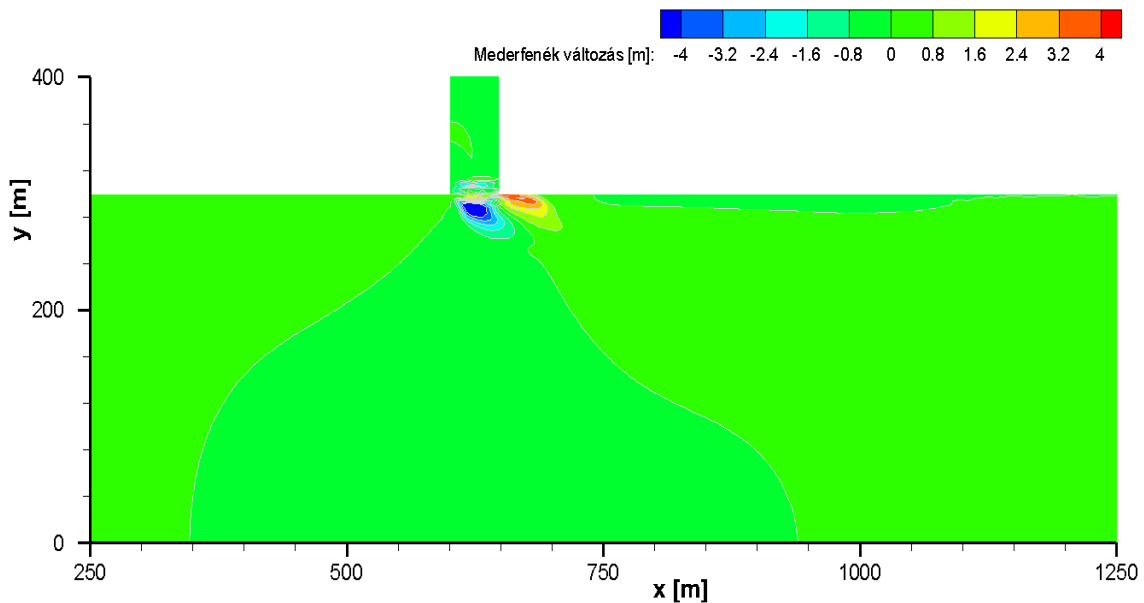
Az egyes paraméterek hatásának vizsgálata céljából a következő bemutatásra kerülő változatokban egyszerre mindig csak egy paraméter érték változtattam.



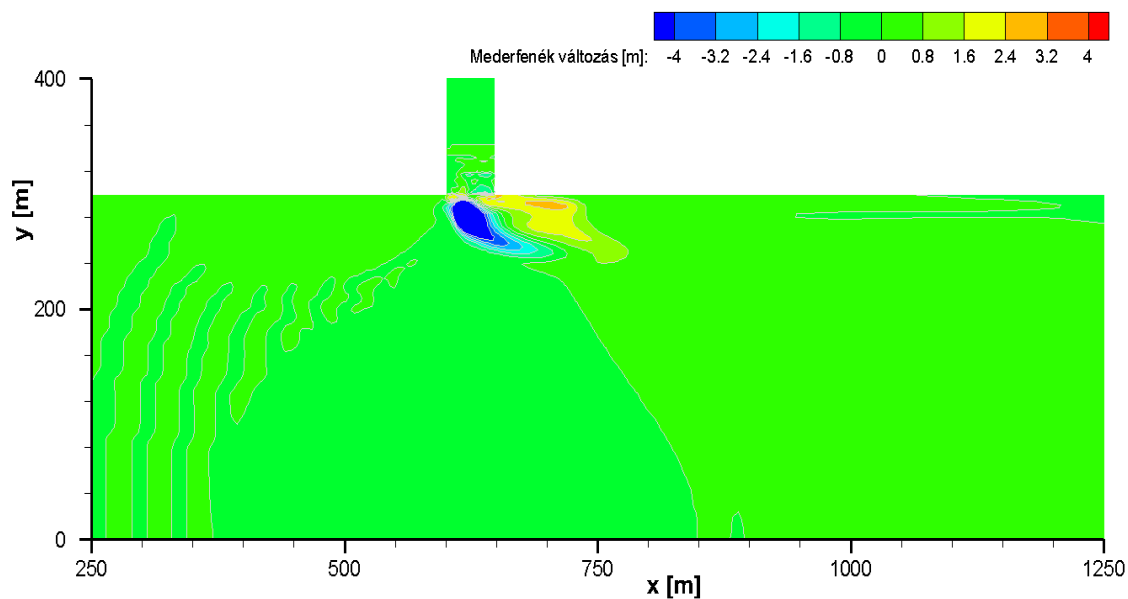
37. ábra: Mederfenék változása $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozam, 60° -os találkozási szög, azonos mederanyag és nem szintbeli becsatlakozás esetén

A 37. ábra modellváltozata az előzőtől annyiban tér el, hogy itt a főcsatorna és hozzáfolyás fenékszintje között 4 méteres szintkülönbség van (4a). Ennek hatására az összefolyásnál már jelentősebb kimélyülés tapasztalható, valamint a találkozás csúcsánál számottevő hordalék kiüledés is megfigyelhető. Jelentős mederváltozás ebben az esetben is csak a torkolat közvetlen környezetében figyelhető meg.

A következő változatban (38. ábra) a csatlakozási szöget 60° -ról 90° -ra emeltem ($6a$, kiindulási állapot). Azt tapasztaltam, hogy a csatlakozási szög növelésével a kimélyülés és lerakódás kiterjedése kismértékben növekedett, a mederváltozás mértéke viszont jelentősen nem változott.

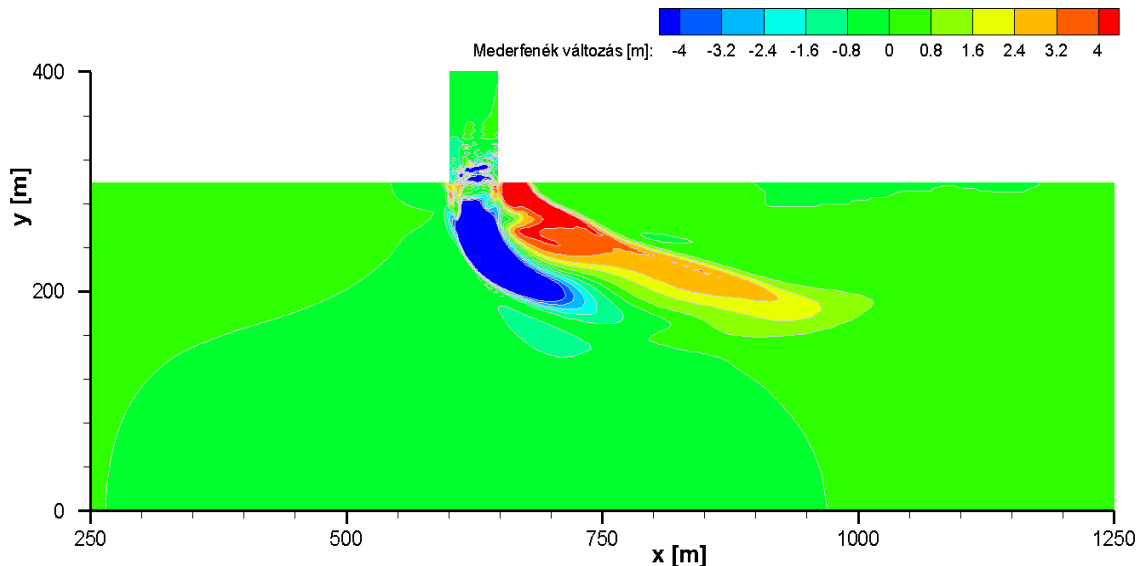


38. ábra: Mederfenék változása $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozam, 90° -os találkozási szög, azonos mederanyag és nem szintbeli becsatlakozás esetén



39. ábra: Mederfenék változása $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozam, 90° -os találkozási szög, eltérő mederanyag és nem szintbeli becsatlakozás esetén

A következő esetben a mellékág mederanyagának szemétméretjét 1 mm-ről 5 mm-re emeltem. Ennek hatását szemlélteti a 39. ábra (6b). Ez alapján elmondható, hogy a mellékág mederanyagának durvulásával a torkolat közvetlen környezetében jelentősen megnőtt a mederváltozások kiterjedése és mértéke. Azt tapasztaltam, hogy a főág mederváltozása érzékeny a mellékág mederanyagára.

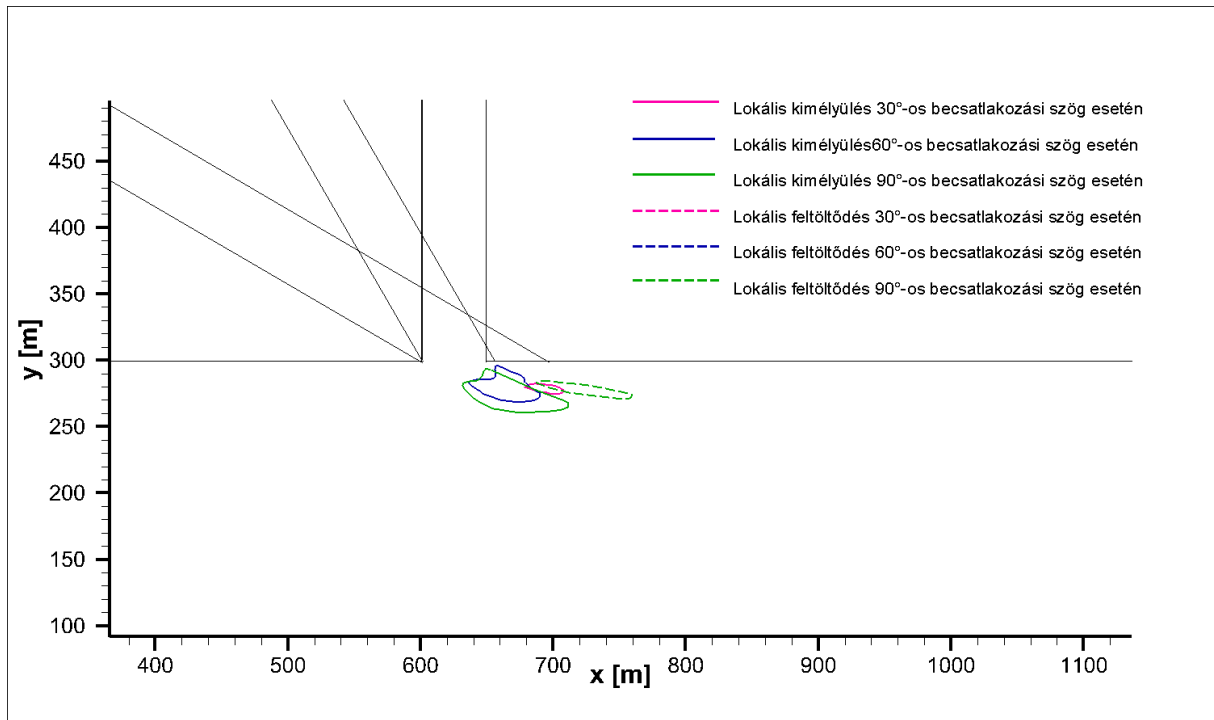


40. ábra: Mederfenék változása $Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozam, 90° -os találkozási szög, eltérő mederanyag és nem szintbeli becsatlakozás esetén

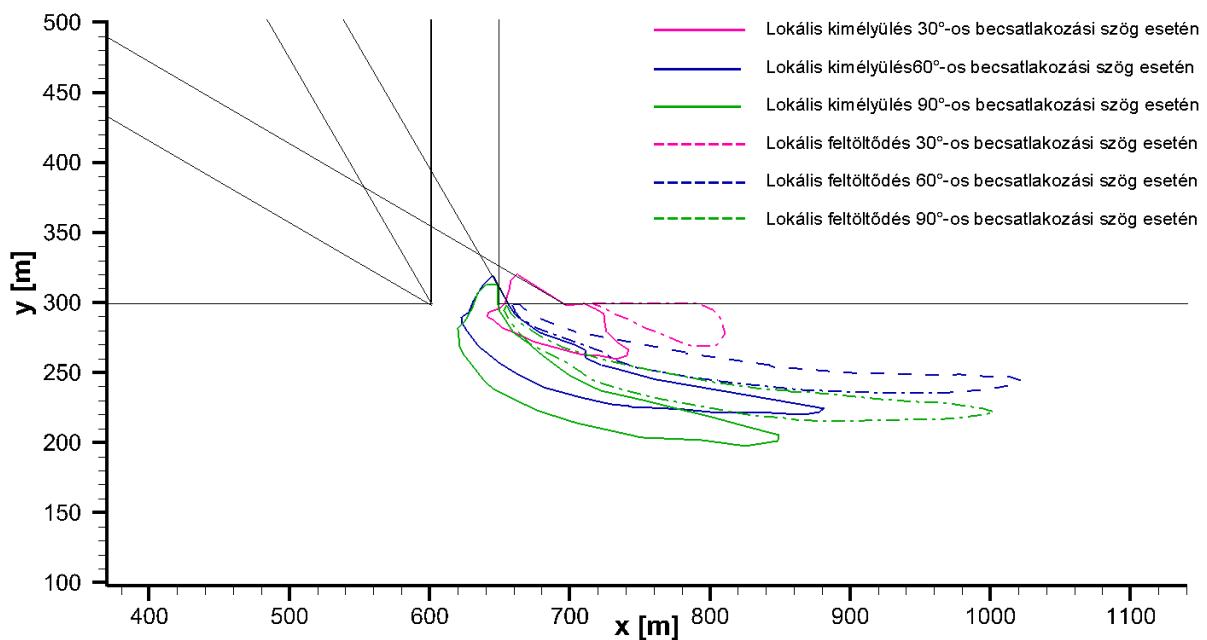
A 40. ábra azt mutatja, hogy az oldalág megnövekedett vízhozamának hatására még jelentősebb mederváltozás jön létre (12b). A főágban a jelentősebb medermélyülések jól követik a mellékág sodorvonalát. Lerakódás főleg az alacsony sebességű, kőröző áramlás zónájában jelentkezik. Az ábra alapján az is látható, hogy a vizsgált esetben a mellékágban is tapasztalható mederváltozás.

Az alábbi ábrák segítségével a paraméterek mederváltozás elhelyezkedésére gyakorolt hatását vizsgáltam. A könnyebb összehasonlítás érdekében minden változatra elkészítettem a mederváltozás mezőt, majd ezek segítségével lehatároltam a jelentősebb lokális kimélyüléseket és feltöltődéseket. Az egy ábrán feltüntetett modellváltozatok csak a csatlakozási szögben különböznek.

A 41. ábra mutatja az $1a$, $3a$, valamint az $5a$ modellváltozatoknál kialakuló mederváltozások kiterjedését. A legkisebb kimélyülés a 30° -ban találkozó csatornáknál tapasztalható. Számottevő hordalék lerakódás ebben az esetben még nem figyelhető meg. Megfigyelhető, hogy a legnagyobb változások a 90° -ban találkozó csatornák esetében alakultak ki, továbbá itt már kismértékű hordalék lerakódása is megfigyelhető volt.



41. ábra: Lokális kimélyülések és feltöltődések elhelyezkedése $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, szintbeli találkozás valamint homogén mederanyag esete



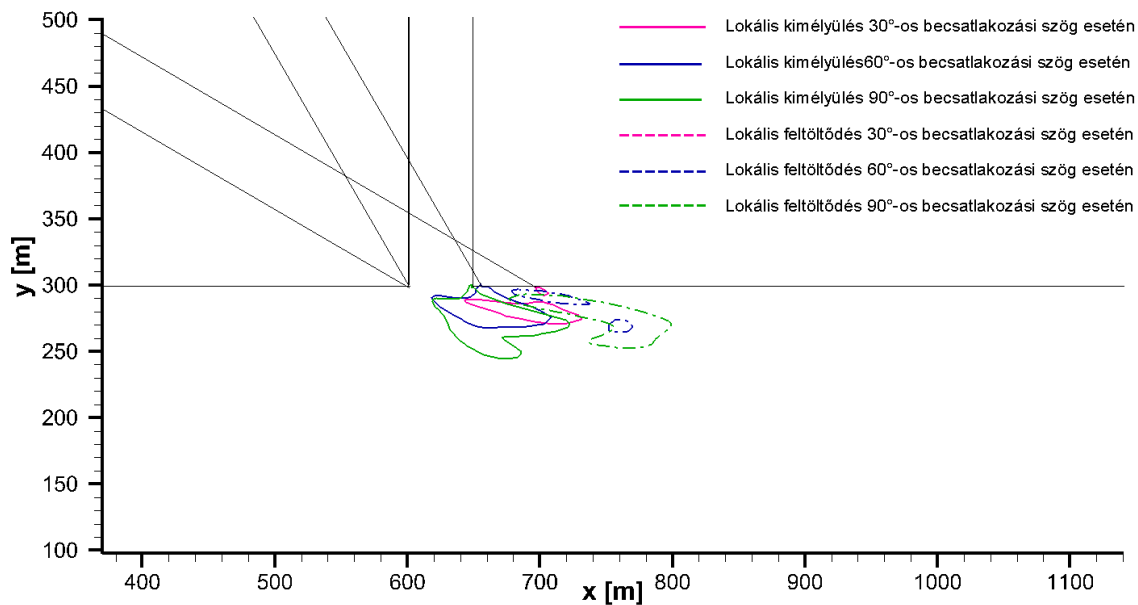
42. ábra: Lokális kimélyülések és feltöltődések elhelyezkedése $Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$, szintbeli találkozás valamint homogén mederanyag esete

A 42. ábra által bemutatott változatok az előzőektől az oldalág vízhozamában különböznek, azt $50 \text{ m}^3/\text{s}$ -ról $200 \text{ m}^3/\text{s}$ -ra növeltem (7a, 9a, 11a). Az előző ábrán bemutatott változatokat alapul véve arra számítottam, hogy nagyobb vízhozam hatására jelentősebb nagyobb kiterjedésű mederváltozások alakulnak ki. Ez a feltételezésem valóban be is következett. A vízhozamok növekedésével a mederváltozások kiterjedése jelentősen növekedett. Továbbá azt vártam, hogy a legkisebb mértékű mederváltozás a 30° -os esetben alakuljon ki, míg a legnagyobb változás az előzőekhez hasonló

analógia szerint a 90° -os találkozásnál. Ez utóbbi feltételezés már nem annyira egyértelműen valósult meg, mivel a vizsgálati eredmények közel azonos kiterjedésű mederváltozást mutatnak a 60° és 90° -os esetekben.

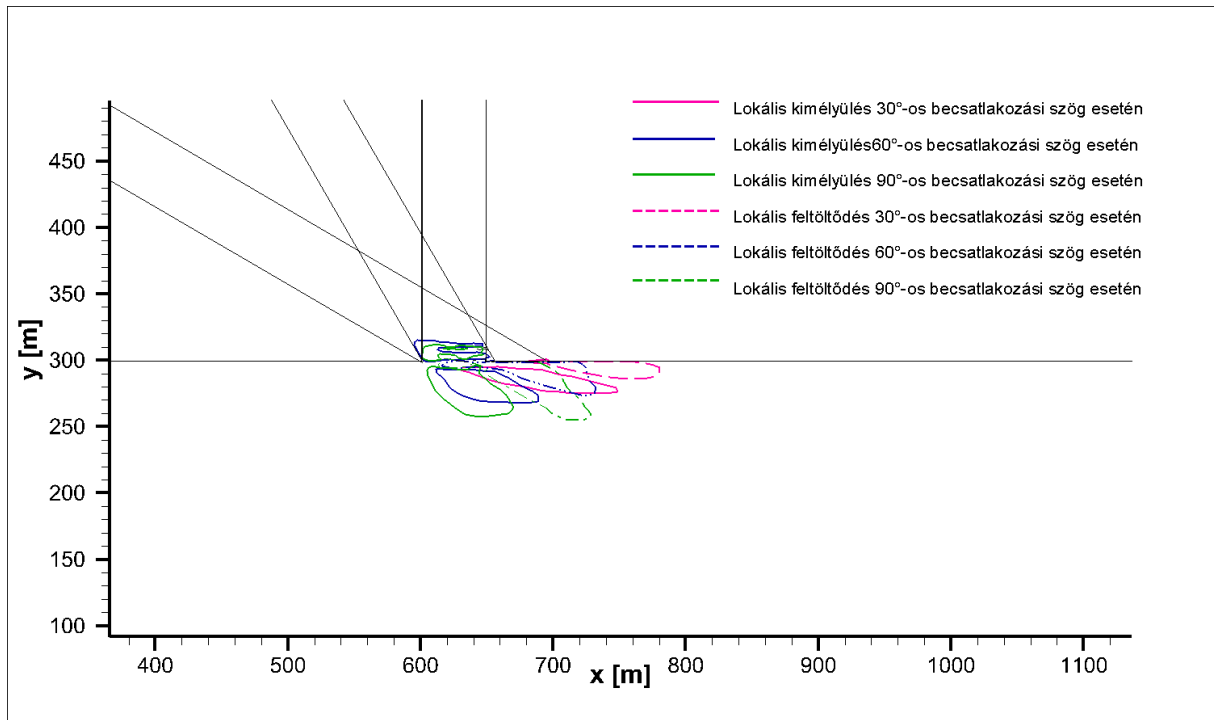
A kialakuló mederváltozások elhelyezkedését tekintve hasonlóság figyelhető meg a kisvízi és nagyvízi változatok között. Mindkét esetben a 90° -os változat hozza létre a csatorna bal partjától legtávolabb kialakuló mederváltozásokat. A parthoz legközelebb eső mederváltozások mindkét esetben a 30° -os esetben figyelhetők meg.

A kisvízi változatok esetében a mederváltozások alakja kúpszerű felületek. Ezzel ellentétben, a nagyvízi változatoknál a mederváltozások csóvaszerűen jelennek meg, tükrözve a mellékág áramlásának eltérülés irányát.



43. ábra Lokális kimélyülések és feltöltődések elhelyezkedése $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, szintbeli találkozás valamint inhomogén mederanyag esete

A 43. ábra azt az esetet mutatja, amikor csak a mellékág mederanyaga különbözik a kiindulási állapottól (1b, 3b, 5b). A mederkimélyülések vizsgálatánál itt is megfigyelhető az, amit a kiindulási állapot esetén tapasztaltunk. Miszerint a parttól legtávolabbra lévő és a legnagyobb kimélyülések a 90° -ban becsatlakozó mellékág esetén, míg a legkisebb kimélyülések a 30° -os csatlakozás esetén alakulnak ki. Azt tapasztaltam, hogy a mellékág mederanyagának durvulásával a mederváltozások kiterjedése növekszik. Lokális feltöltődés mindhárom csatlakozási szög esetében kimutatható.



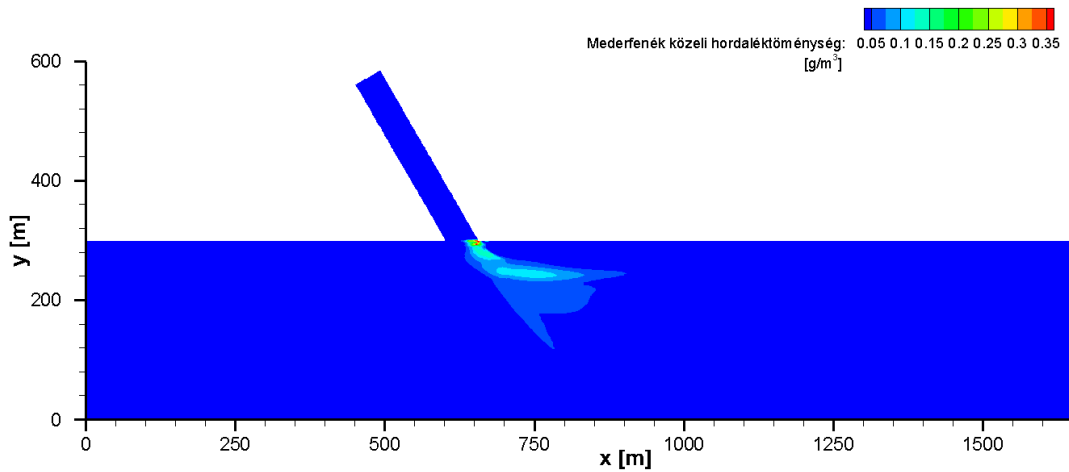
44. ábra: Lokális kimélyülések és feltöltődések elhelyezkedése $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, nem szintbeli találkozás valamint homogén mederanyag esete

Az utolsó vizsgálati esetben a mellékág nem szintben csatlakozik a főághoz (2a, 4a, 6a). A mederváltozások elhelyezkedését tekintve itt is megfigyelhető, hogy a 90° -os csatlakozási szög esetén alakulnak ki a parttól legtávolabbi mederváltozások, míg a 30° -os esetben a parthoz legközelebbieket. Azonban ha a kialakult formulák méreteit hasonlítjuk össze, ebben az esetben nem jelenik meg 90° -ban csatlakozó mellékág dominanciája. Mindhárom esetben közel azonos kiterjedésű kimélyedések és feltöltődések alakultak ki. Különbség elsősorban a mederváltozások csóváinak parttal bezárt szögében mutatkozik. Az látható, hogy a csóvák hossz tengelyének iránya jól követi a mellékág tengelyének irányát.

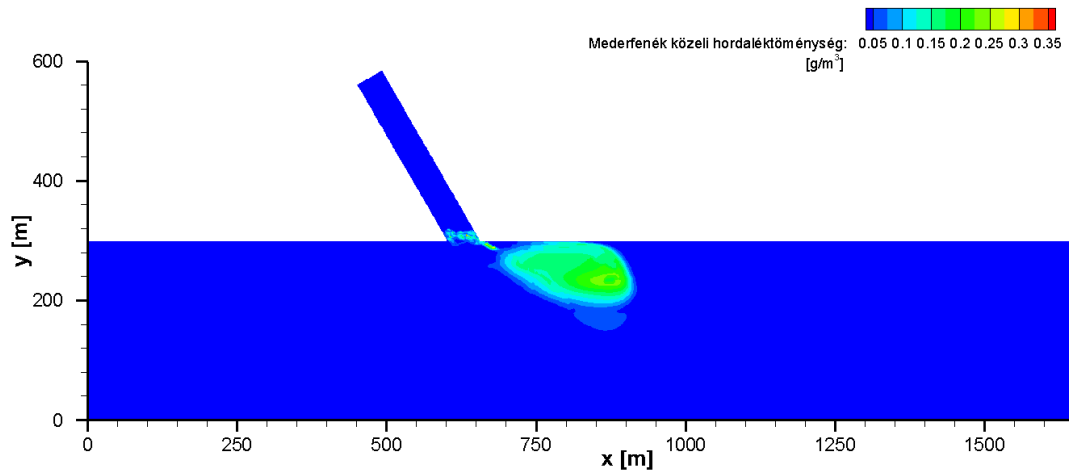
A lokális kimélyülések és feltöltődések helyzetének, méretének változásán kívül érdemes azt is megvizsgálni, hogy a fő- és a mellékágban elhelyezkedő mederanyag hogyan rendeződik át. A következő ábrákon azt láthatjuk, hogy a mellékágból elragadott, majd a főágban lerakódott hordalék hol helyezkedik el. A megnövekedett mederfenék közeli hordaléktöménység a feliszapolódást jelzi.

A 45. ábra és a 46. ábra 60° -os kialakítású modellváltozatokat mutat. A főág és a mellékág mederanyaga különbözik egymástól, valamint a találkozó mederfenékek nincsenek egy szintben. A vizsgálati kialakítások között egyedüli különbséget a becsatlakozó ágról érkező vízhozam nagysága jelentette (4b, 10b).

Az ábrákon látható, hogy a megnövekedett vízhozam hatására nagyobb mértékű felkeveredés történt a mellékcsatornában. Ennek megfelelően a főágban kirakott hordalék mennyisége is jelentősebb volt.

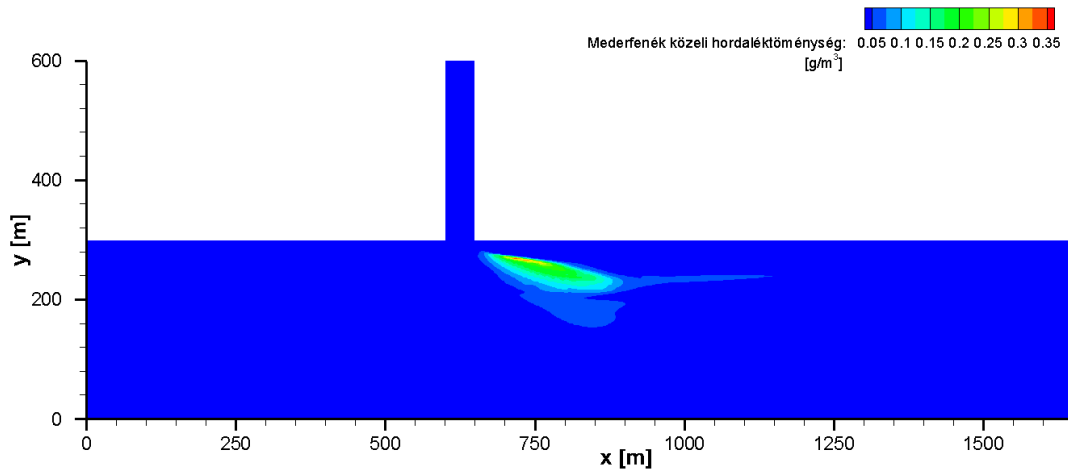


45. ábra: Mederfenék közeli hordaléktöménység eloszlása $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, 60° , nem szintbeli találkozás valamint inhomogén mederanyag esete

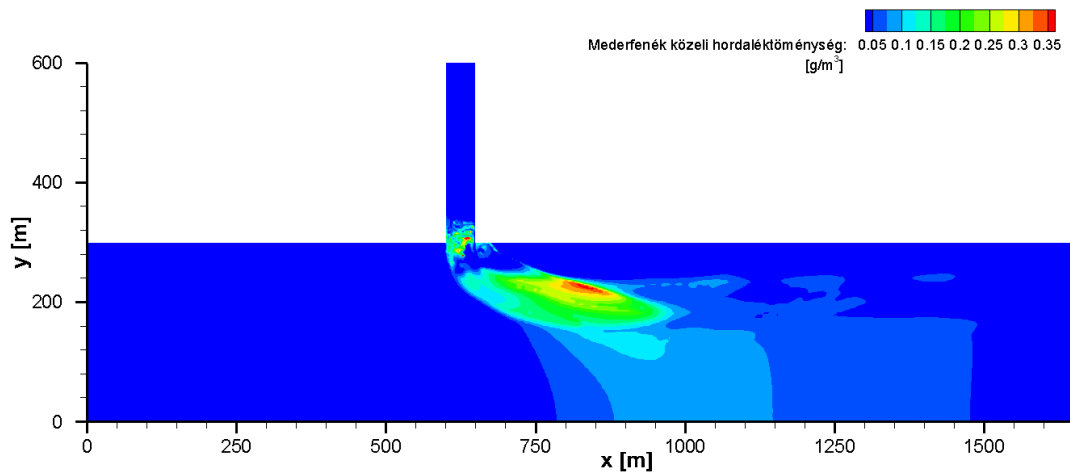


46. ábra: Mederfenék közeli hordaléktöménység eloszlása $Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$, 60° , nem szintbeli találkozás valamint inhomogén mederanyag esete

Végül a mellékág fenékszintjének hatását vizsgáltam. Ehhez két olyan modellváltozat mederfenék közeli hordaléktöménység ábráit hasonlítottam össze, amik csak a mellékág fenékszintjében különböznek (47. ábra és 48. ábra) (11b, 12b). A szintkülönbség hatására jelentősen megnövekedett a hordalék bemosódásának mértéke. Ez azzal magyarázható, hogy az általunk meghatározott nagyon éles becsatlakozásnál a numerikus modell a visszarágódás megjelenését jelzi, ezzel is törekedve a természetesebb mederveviszonyok kialakítására. Az is látható, hogy a szintben eltérő modellváltozat esetén a bemosott hordalékcsóva a teljes keresztmetszetben megjelenik, jóval nagyobb kiterjedésben, mint a szintben megegyező modellváltozat esetén.



47. ábra Medervenék közeli hordaléktöménység eloszlása $Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$, 90° , szintbeli találkozás valamint inhomogén mederanyag esete



48. ábra Medervenék közeli hordaléktöménység eloszlása $Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$, 90° , nem szintbeli találkozás valamint inhomogén mederanyag esete

A numerikus vizsgálat során a morfordinamikai viszonyok alakulását 30 napon át követtem. Az előbbieken bemutatott változatok részletes mederváltozás idősorai az 1. grafikon és a 2. grafikonokon láthatók. Az egyes idősorok azokból a pontokból származnak, amikben a végső állapotban a legnagyobb medermélyülés, illetve lerakódás alakult ki.

A megjelenített idősorok alapján elmondhatjuk, hogy a vizsgált időszak alatt még nem alakult ki a egyensúlyi állapot, azonban a mederváltozások tendenciája alapján feltételezhetjük, hogy már jól közelíti azt. Az egyensúlyi állapot kialakulásának hiányában mennyiségi következtetéseket nem vonhatunk le. Mivel a dolgozat célja az egyes paraméterek hatásának vizsgálata, illetve a mederváltozási trendek, tendenciák kimutatása volt, így ez nem jelent problémát.

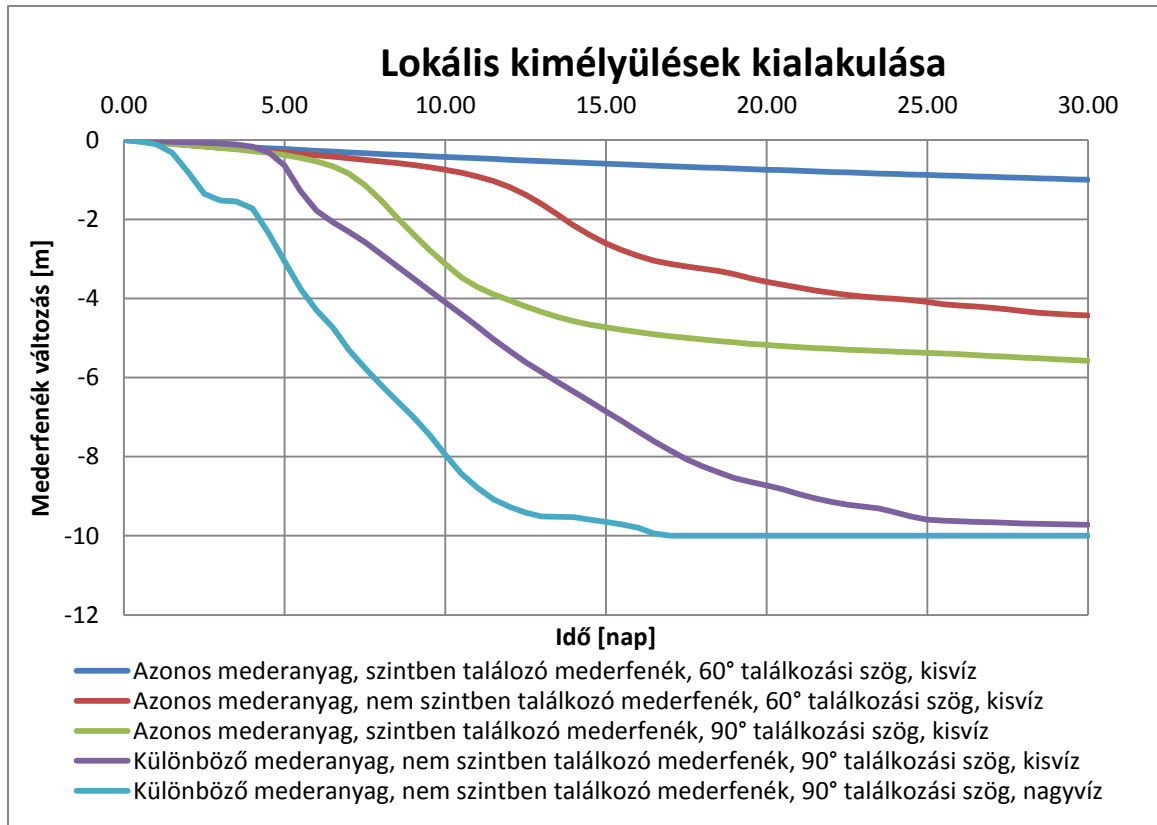
A numerikus vizsgálat kezdeti feltételeként meghatároztuk, hogy az egy hónap alatt bekövetkező mederkimélyülés mértéke 10 m-nél nem lehet nagyobb. A vizsgálatok során azonban azt

tapasztaltuk, hogy voltak olyan modellváltozatok (4b, 6b, 10b, 11b, 12b), amelyekben a medererózió elérte ezt a határt. Mivel ezek minden esetben jól közelítették a permanens állapotot, jellegvizsgálatokra alkalmasnak tartottam őket. Azonban nem tudom, de nem is volt céлом megbecsülni, hogy milyen mértékű mélyülések következtek volna be az egyensúlyi állapot elérésénél.

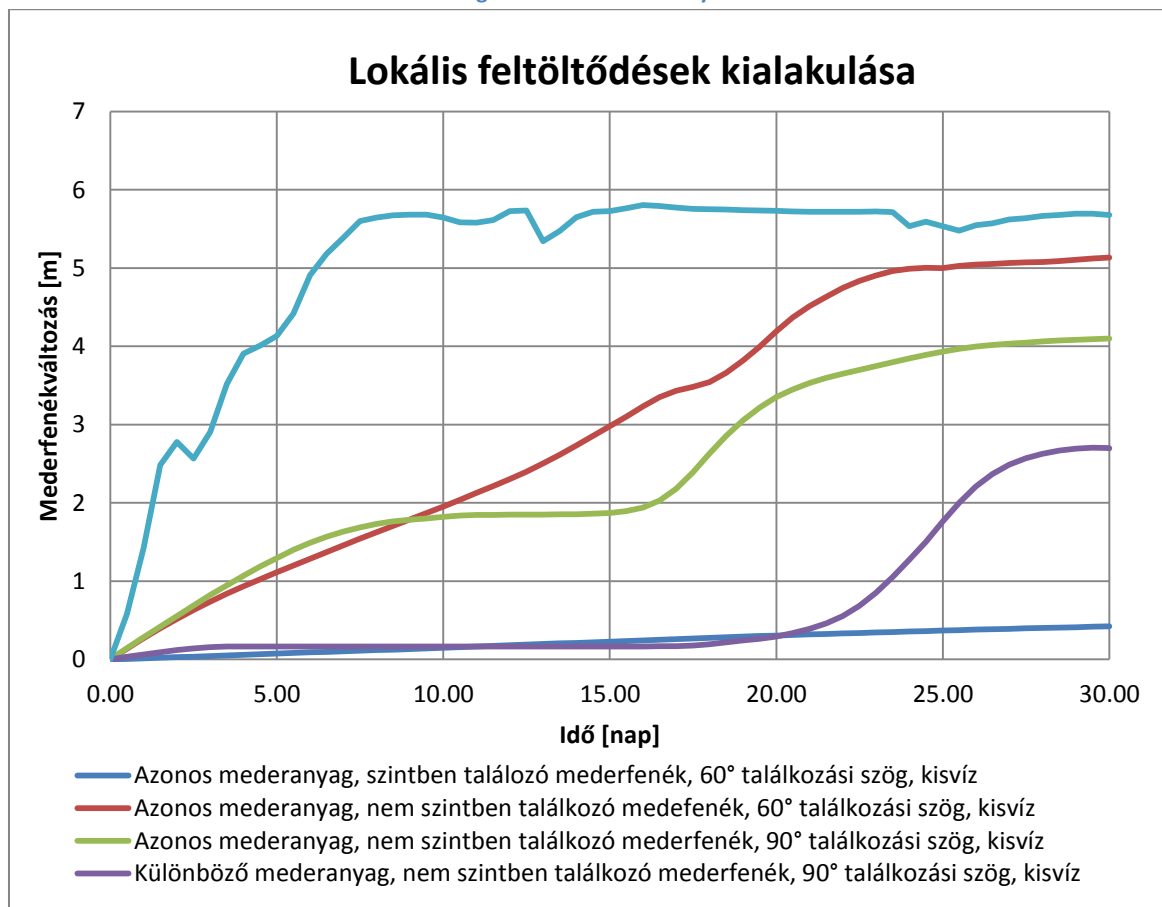
A részletes idősorokat felhasználva a mederváltozási folyamatok intenzitását is vizsgáltam. Referencia változatnak azt az esetet választottam, amikor a vízfolyások fenékszintje egy szintben találkozik, a becsatlakozási szög 60° -os valamint a fő- és a mellékágon azonos mederanyag található (3a). Mindkét esetben (kimélyülés és feltöltődés) a folyamatok a referencia állapotban játszódtak le a leglassabban.

A lokális kimélyülések időbeli alakulása az 1. grafikonon, sötétkék színnel látható. A kiindulási állapothoz képest először a mellékág mederfenekének szintjét emegettem meg (4a; piros vonal), majd szintén a kiindulási állapothoz viszonyítva a becsatlakozási szöget változtattam (60° -ról 90° -ra) (5a; zöld vonal). A változtatások mindkét esetben a lejátszódó mélyülés felgyorsulását eredményezték, azonban ennek mértéke a találkozási szög változtatása esetén volt nagyobb. Az 1. grafikon alapján továbbá az is elmondható, hogy a mederanyag változás (6b, 12b; lila és világoskék vonalak), valamint az oldalág vízhozamának növekedése is növelik a mélyülés intenzitásának mértékét.

A lokális feltöltődések időbeni alakulást a 2. grafikonon láthatjuk. A kimélyülés vizsgálathoz hasonlóan a referencia állapothoz (3a) képest az egyik változatban megemeltem a mellékág fenékszintjét (4a; piros vonal), egy másikban pedig a találkozó csatornák hajlásszögét (5a; zöld vonal). A kiüledés sokkal intenzívebb volt, mikor a két csatorna nem szintben találkozott egymással. Ez kapcsolatban állhat a mellékág torkolatánál megjelenő berágódással. A legintenzívebb mederváltozás abban az esetben tapasztalható, amikor a mellékcsatorna fenékszintje eltérő szintben van a főmeder fenékszintjétől, valamint mederanyaga durvább, továbbá a becsatlakozás szöge 90° (6b, 12b; lila és világoskék vonalak).



1. grafikon: Lokális kimélyülések



2. grafikon: Lokális feltöltődés kialakulása

A következőkben azt vizsgálom, hogy a mellékág becsatlakozási szöge milyen hatással van a maximális kimélyülések és feltöltődések alakulására.

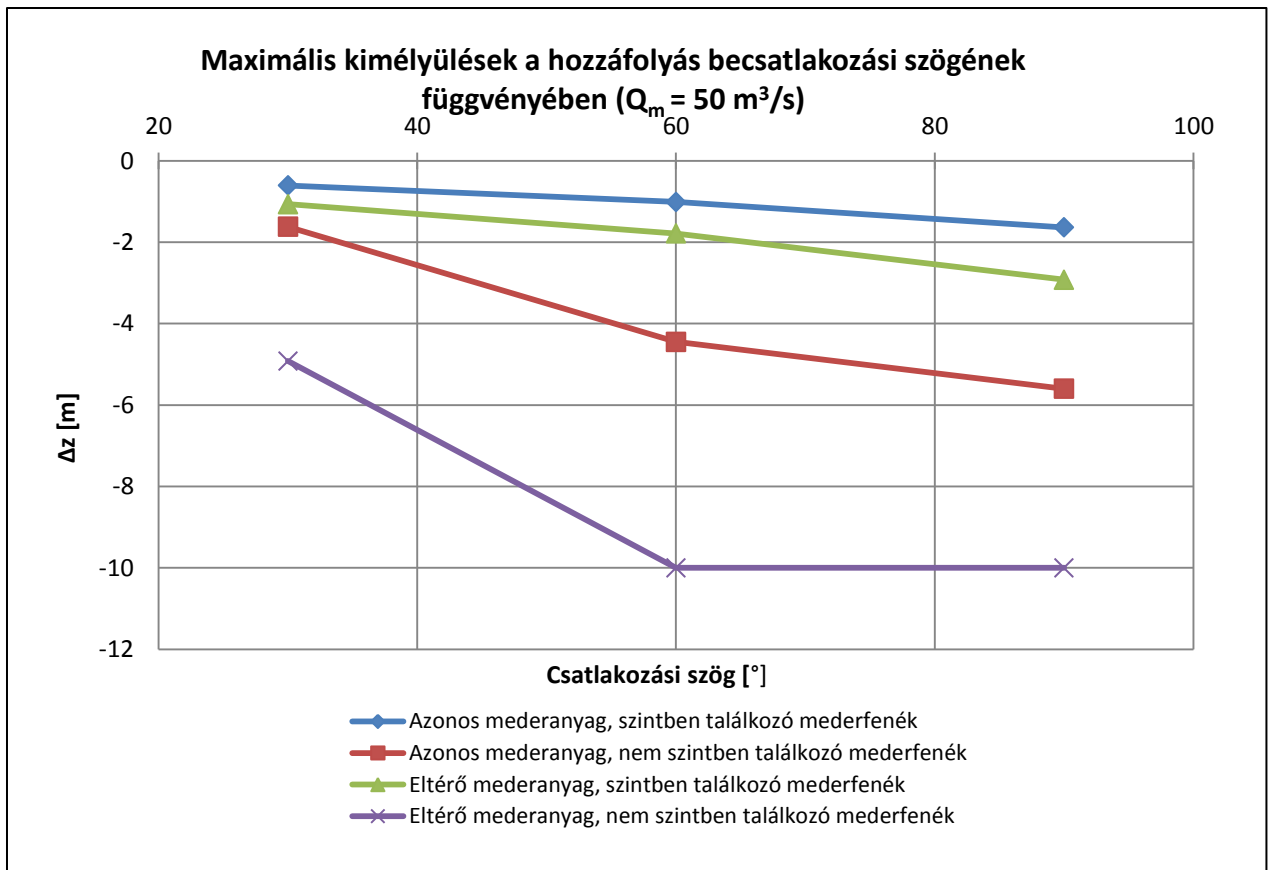
A 3. grafikonon láthatjuk, hogy hogyan változik a hozzáfolyás becsatlakozási szögének függvényében a maximális kimélyülés értéke, ha $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$. Itt meg kell jegyezni, hogy a numerikus vizsgálat során azokban az esetekben, amikor a mellékág mederanya eltér a főág anyagától, valamint a találkozás nem szintben történik azt tapasztaltam, hogy a 60° és 90° találkozásoknál (4b, 6b) a kimélyülés elérte a maximális 10 m-es értéket.

A 3. grafikon alapján azt a trendet tapasztaltam, hogy minél inkább növekszik a becsatlakozás hajlásszöge, annál nagyobb mértékű kimélyülés tapasztalható.

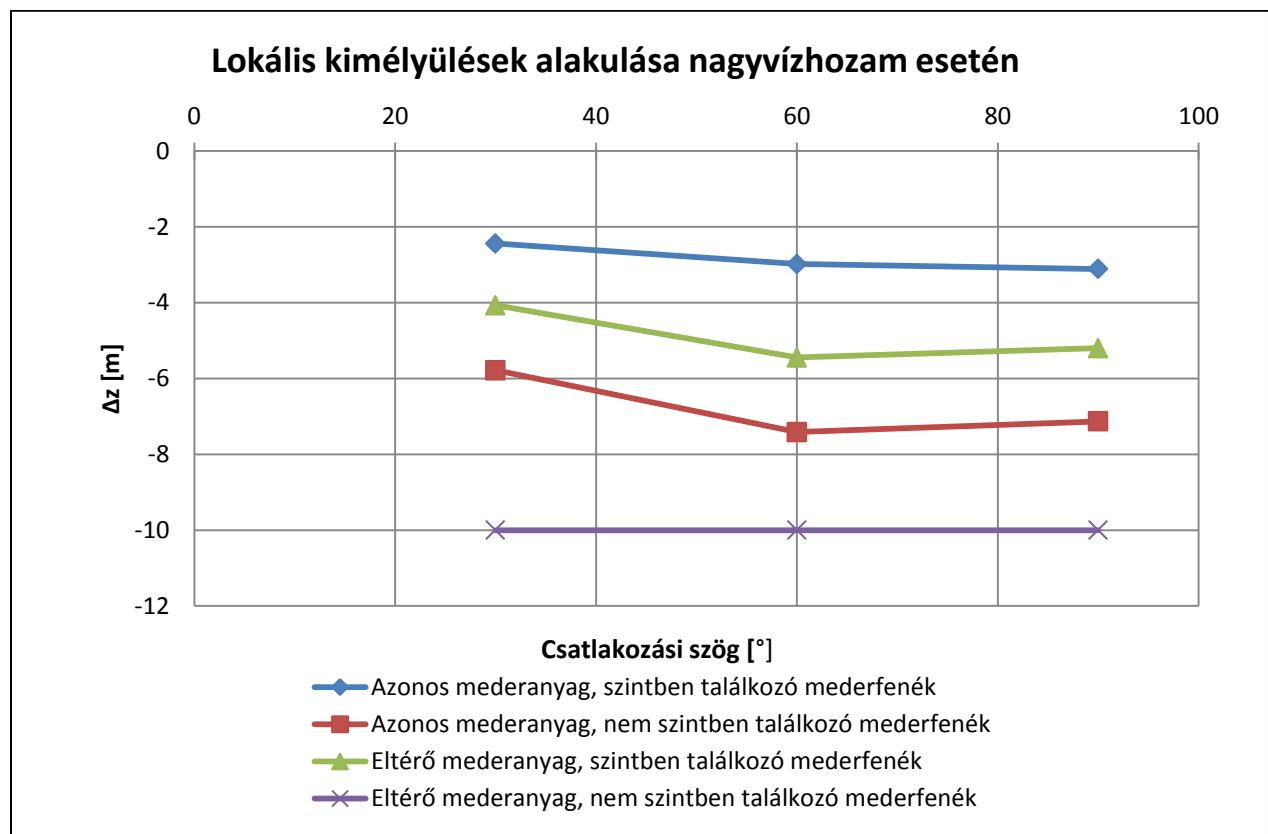
Amennyiben az azonos szintben csatlakozó (kék-zöld), valamint az eltérő szintben csatlakozó (piros-lila) eseteket páronként hasonlítjuk össze, azt tapasztalhatjuk, hogy az eltérő mederanyagok ellenére a párok ugyanazt a tendenciát követik. A párokon belül viszont azt vehetjük észre, hogy amikor a mellékág mederanyaga finomabb (piros, kék), kisebb kimélyülések jönnek létre, mint durvább összetétel esetén.

A 4. grafikonon szintén a kimélyülések mértékének alakulását vizsgáltam, $Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozam esetén. Abban az esetben, amikor a mellékág mederanyaga durvább, valamint nem egy szintben találkoznak egymással (lila) a kimélyülés értéke elérte a maximális 10 m-es értéket.

A 4. grafikonon, ha a szintben csatlakozó (zöld-kék) eseteket hasonlítjuk össze egymással, itt is az tapasztalható, hogy az eltérő mederanyag ellenére a két vonal azonos tendenciát követ. A 3. grafikon és 4. grafikonokat összehasonlítva a tendencia hasonlósága megfigyelhető, azonban $Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozam esetén a kimélyülések értéke jóval nagyobb. 1. grafikon



3. grafikon: Maximális kimélyülések a hozzáfolyás becsatlakozási szögének függvényében ($Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$)



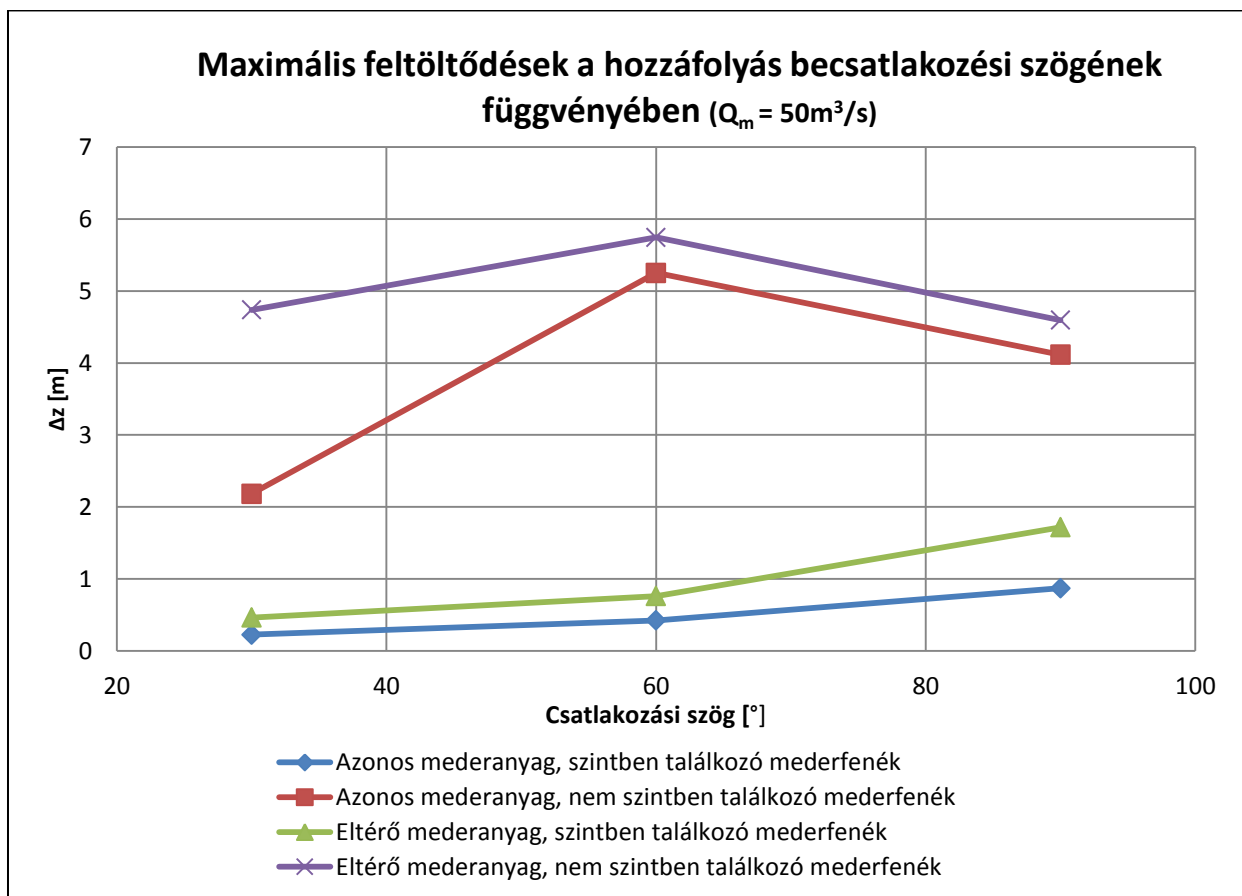
4. grafikon: Maximális kimélyülések a hozzáfolyás becsatlakozási szögének függvényében ($Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$)

Az 5. grafikon és 6. grafikonokon láthatjuk a maximális feltöltődések értéknek változását a becsatlakozási szög függvényében.

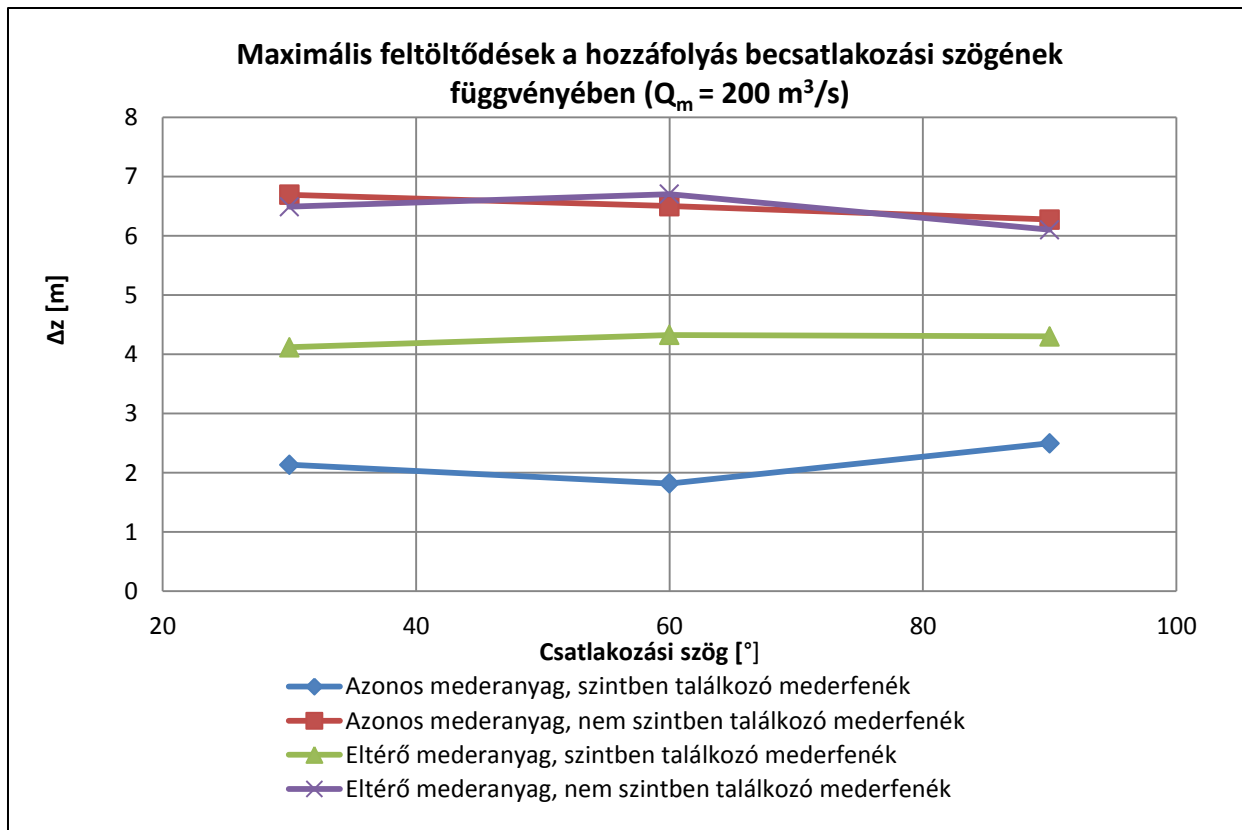
Eddigi vizsgálataim alapján azt feltételeztem, hogy a nagyobb mértékű hordalék lerakódás a nem szintben találkozó csatornák esetében fog bekövetkezni, valamint a kialakuló feltöltődések értéke a találkozási szög emelkedésével szintén növekedni fog.

Azonban a numerikus vizsgálat eredményei nem várt tendenciát mutatnak. A kisvízi eredmények igazolták az első feltételezésemet (5. grafikon piros, lila). A jelenség többek között a korábban már említett visszarágódással magyarázható. Vizsgálatom azonban nem igazolta azt, hogy a növekvő becsatlakozás függvényében növekszik a feltöltődés mértéke (5. grafikon piros, lila).

A vizsgálati eredmények értékelését megnehezíteti, hogy a maximális feltöltődések minden vizsgálatban a meder eltérő pontjaiban alakulnak ki. Mivel a folyószakaszon az áramlás szerkezete keresztmetszetenként változik, így a különböző helyeken kiüledett hordalékokra másfajta erők hatnak. Ezek módosító hatással lehetnek a kiüledés jellegére vonatkozóan. Ezt azonban nem tudjuk pontosan. A probléma feltárására további részletes vizsgálatokra lenne szükségünk.



5. grafikon: Maximális feltöltődések a hozzáfolyás becsatlakozási szögének függvényében ($Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{s}$)



6. grafikon: Maximális kimélyülések a hozzáfolyás becsatlakozási szögének függvényében ($Q_m = 200 \text{ m}^3/\text{s}$)

8. Összefoglalás

TDK dolgozatomban egy háromdimenziós áramlási és morfodinamikai modell segítségével numerikus tesztek végzettem egy sematizált folyótorkolati területen. Ahhoz, hogy jobban megértsük a folyók találkozásánál kialakuló sajátos áramlási és mederdomborzati viszonyokat a dolgozat első felében részletes irodalomkutatást végeztem a legrelevánsabb témához kapcsolódó nemzetközi cikkek alapján. A hivatkozott tanulmányok terepi mérések, kisminta vizsgálatok és két-, illetve háromdimenziós numerikus modellek segítségével mutatnak rá az igen összetett, legtöbbször erősen háromdimenziós áramlási jelenségekre, sőt azok elkeverő hatására. A legtöbbször a vizsgálatok csupán az áramlási szituációkra összpontosítottak, de a folyók találkozásánál létrejövő mederváltozási folyamatok vizsgálatára nehezen találunk kutatási anyagokat. Ez a tény felhívja a figyelmet az általam elvégzett numerikus vizsgálatok fontosságára, bár fontos megjegyezni, hogy a dolgozatban bemutatott eredmények a mederváltozások számítására elsősorban kvalitatív becslések. A morfodinamikai modell mérésekkel való összehasonlításának hiányát igyekeztem kiküszöbölni, amikor az áramlási modell összehasonlító elemzését végrehajtottam egy, az irodalomban található részletes kisminta kísérlet eredményeivel. Mivel az összehasonlítás során kielégítő egyezést tapasztaltam, továbbá bemutattam, hogy az alkalmazott modell már valós léptékű vizsgálatokra is sikeresen igazolva lett, a morfodinamikai modellezés során fellépő hibák lehetőségét minimalizáltam.

A folyók találkozásánál végbemenő mederváltozási folyamatok numerikus vizsgálatára 24 modellváltozatot állítottam fel, amelyek között bizonyos paraméterek hatását vizsgáltam úgy, mint a hozzáfolyás becsatlakozási szöge, a vízhozamok aránya, a főág és mellékág mederszintjeinek szerepe, illetve a mederanyagot leíró szemcseméreteket. Az eredmények bemutatásánál első lépésben az áramlási viszonyokra összpontosítottam, rámutatva a sebességmezők összetettségére mind helyszínrajzi mind keresztmetszeti értelemben. Az áramlási modell eredményeként a fenékcsúsztatófeszültség térbeli változását is illusztráltam térképek segítségével, majd részletes elemzést végeztem a medermorfológiai hatások bemutatására. Az eredmények bizonyos paraméterek tekintetében tendenciózus viselkedést mutattak (pl. kisvíz vízjárási állapotban kimutatható, hogy minél nagyobb a hozzáfolyás becsatlakozási szöge, annál nagyobb kimélyülésre lehet számítani), de voltak olyan esetek, amikor nem lehetett rámutatni egyértelmű összefüggésre. Ezek az eredmények éppen arra hívják fel a figyelmet, hogy számos folyamatleíró paraméter együttes hatása sokszor nem jelezhető egyértelműen előre, vagyis ilyen esetekben még értékesebbé válik a részletes modellvizsgálat. A valóságban a legtöbb esetben összetett hidrológiai-, hidrodinamikai-, hordalék- és medermorfológiai jellemzők írják le a folyótorkolatokat, ami miatt indokolt lesz annak különálló vizsgálata. Mindazonáltal fontos, hogy számos paraméter között viszont kimutatható kapcsolat áll fenn.

A sematizált geometriájú csatornában végzet meder morfodinamikai szimulációk nagyban hozzájárulnak ahhoz, hogy jobban megértsük az ilyen, a folyórendszerekben sokszor nagyon fontos szerepet játszó helyeken végbemenő lokális áramlási és hordalékvándorlási jelenségeket. A természetes és emberi tevékenység okozta mederfejlődési folyamatok pontosabb előrejelzésével folyó- és hordalékgazdálkodási kérdésekre fogunk tudni pontosabb válaszokat adni, amivel olyan aktuális problémák megoldásához járulhatunk hozzá, mint a hajózási, árvízlevezetési vagy élőhely vizsgálatok.

9. Irodalomjegyzék

- Dorđević, D. (2012): Application of 3D numerical models in confluence hydrodynamics modelling. XIX International Conference on Water Resources, CMWR 2012, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA
- Bradbrook, K. F., Lane, S. N., Richards, K. S. (2000): Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences. *Water Resources Research*, Vol. 36, no. 9, pages 2731–2746
- Biron, P. M., Ramamurthy, A. S., Han S. (2004): Three-Dimensional Numerical Modeling of Mixing at River Confluences. *Journal of Hydraulic Engineering*, March
- Weerakoon, S. B., Tamai, N., Kawahara Y. (2003): Depth-averaged flow computation at a river confluence. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water & Maritime Engineering* 156., March 2003 Issue I, Pages 73-83
- Baranya, S.; Józsa, J.; Napoli, E. (2010): „ Field and numerical study of river confluence flow structures”, Fifth International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2010, Braunschweig, Germany. 2010.09.08-10. pp. 233-241.
- van Rijn, L. (1984): Sediment transport part II: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11):1613–1641.
- Weber, L. J., Schumate E. D., Mawer N. (2001): Experiments of flow at a 90° open-channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering* / May 2001, 127:340-350.