



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Folyami sarkantyúk kialakításának hatásvizsgálata 3D numerikus modell segítségével

Készítette:

Korbonits Gergely

Infrastruktúra-építőmérnök MSc hallgató

Konzulensek:

Dr. Török Gergely Tihamér

tudományos munkatárs, MTA-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoport

Dr. Baranya Sándor

tudományos segédmunkatárs, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia

Budapest, 2019.

Tartalomjegyzék

| | |
|--|--------|
| Bevezető..... | - 2 - |
| A vizsgált műtárgy bemutatása..... | - 6 - |
| 1D vizsgálatok | - 8 - |
| 3D vizsgálatok | - 11 - |
| Az alkalmazott numerikus modell bemutatása | - 11 - |
| Az áramlásmo­dell bemutatása | - 11 - |
| A Navier-Stokes egyenletek..... | - 11 - |
| A k - ϵ turbulencia modell | - 12 - |
| Faltörvény | - 13 - |
| A hordalékmodell ismertetése | - 13 - |
| Görgetett üledéktranszport a Wu formulával..... | - 13 - |
| Leárnyékolási és kitettségi faktor | - 13 - |
| Hordalékhozam számítása..... | - 14 - |
| Paraméterek felvétele | - 15 - |
| Eredmények tárgyalása..... | - 17 - |
| Konklúzió..... | - 34 - |
| Ábrajegyzék..... | - 35 - |
| Irodalomjegyzék..... | - 37 - |

Bevezető

Emberi létünkhöz szorosan hozzátartozik a vízzel való együttélés. A legtöbb korai kultúra kialakulása a folyóvölgyek közelségéhez köthető. Napjainkra viszont már nem csak pusztán gazdasági, biológiai vagy technológiai, de esztétikai okok miatt is vízforrások közelében találhatóak fontosabb településeink. A vízzel való együttélés nyomaira könnyen rátalálunk egyes népek vallását, mítoszait, meséit vagy éppen hiedelmeit tanulmányozva. Ezek ugyanis mind foglalkoznak a vízzel és az annak velünk való különleges kapcsolatával. Az ősi, természeti vallásoknál a víz, esetleg egy bizonyos tó vagy patak volt maga az istenség. A politeista vallásoknál pedig kivétel nélkül fellelhetjük a vizek, tengerek istenségét. A közös emberi tapasztalatok, élmények alapján a vízi lényeket és a vizeket irányító erőket a Föld minden táján hasonló tulajdonságokkal ruházták fel. Egyfelől a víz tisztító, gyógyító, életető és nyugodt, másrészt viszont szeszélyes, hirtelen haragú és kiszámíthatatlan. Nem csoda, hogy a folyammenti kultúrák már igen hamar felismerték a víz egyaránt életető és fenyegető voltát. Kezdetben egy település lakószai teljesen a vízfolyások szeszélyeinek kiszolgáltatva éltek és ismereteik szinte kizárólag a korábbi generációk megfigyeléseire alapultak. Így például az árvizek idejének és mértékének becslésekor csupán a korábban megfigyelt tendenciákra támaszkodhattak. Ezen korai kultúrák idejében vette kezdetét a napjainkban is nagymértékben fejlődő folyógazdálkodás.

A folyógazdálkodás alapja a vízfolyások szabályozása, amely történeti alakulását négy szintbe sorolhatjuk: ártéri gazdálkodás, ármentesítésen alapuló folyóhasznosítás, duzzasztóműveken alapuló folyóhasznosítás, valamint a lefolyáson alapuló folyószabályozás. A korai időkben árvíz idején a part menti településekről a lakószok magasabban fekvő házakba költöztek, míg a visszamaradó víz által kialakított ártér a friss legelőkön való külterjes állattartásnak adott helyet. Időben egy következő lépést jelent az, amikor már lehetővé vált az árvíz medrek közé szorítása. Erre igencsak szükség volt, hiszen a növekvő mezőgazdasági igények fenntartása végett az árterületek egy részét is bevonták a termelésbe. Ezeket a terményeket az árvíz rendszeresen pusztította, így szükségessé vált a töltésezéssel történő ármentesítés. A duzzasztóművek kialakulása egy további lépést jelentett az árvízi biztonság irányába, de az ipari, mezőgazdasági és hajózási igények kielégítéséhez is hozzájárult. [1] Mindezeknek köszönhetően, az évszázadok

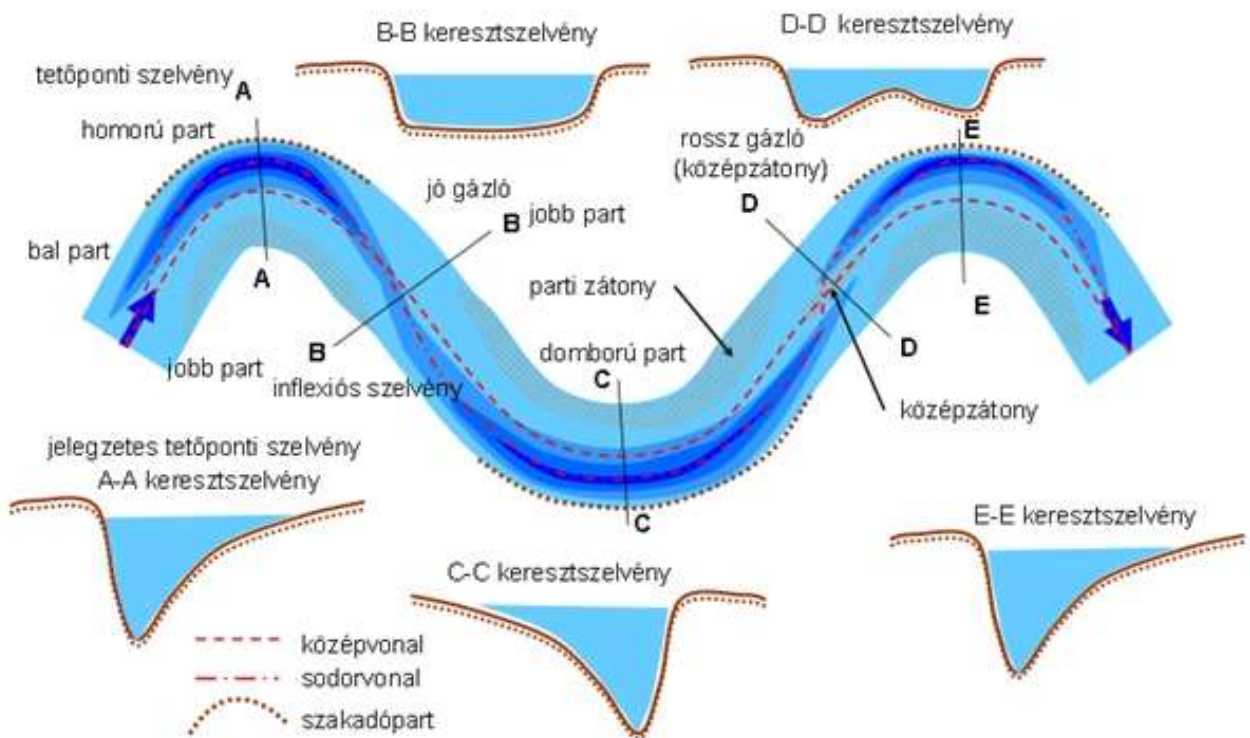
során kialakult lefolyásszabályozás mára már lehetővé teszi a természetes vízfolyás vízjárásának úgy térbeli, mint időbeli alakítását.

A Duna és mellékfolyói mindig is komoly gazdasági tevékenység színterei voltak, ezért nem meglepő módon, már a XIII. századra tehetően megkezdődött a dunai árvízvédelem [2]. Ekkor még össze nem függő töltésszakaszok létesültek, melyek megtervezése, kivitelezése és fenntartása nem összehangoltan történt. A rendszerezett tervek alapján végzett szabályozások később, csupán a XVII. század végén és a XIX. század elején kezdődtek el. Elmondható, hogy a folyószabályozás fő feladata úgy a vizek kártétel nélküli levezetése, mint a jégveszély elhárítása. Ezek mellett a hordalék levonulásának biztosítása és a szükséges hajóút fenntartása is a folyószabályozás egy igen fontos célkitűzése [3].

Az Európai kontinens egységesedésének egyik fő pillanata a megfelelő hajózási útvonalak kiépítése. Az ezen útvonalakkal szemben támasztott követelmények eltérhetnek a különböző típusú folyó minősítések alapján, melyek I-től VII-ig kerülnek kiosztásra. A magyarországi Duna szakasz, mint nemzetközi víziút két minősítési osztályba tartozik. Az 1812–1641 folyamkilométerek között VI/B, majd az 1641-1433 folyamkilométerek között VI/C. Az így kapott hajózási útvonalakkal szemben támasztott követelmények a következők: a VI/B szakaszon 150 méteres szélesség, 25 deciméteres mélység a VI/C szakaszon pedig 120-150 méteres szélesség, 25 deciméteres mélység [4].

Sajnálatos módon napjainkban a magyarországi szakaszon több mint 50 helyen tartanak számon különböző szélességi és vízmélységi problémákat [5]. A Duna Gönyűig felsőfolyás jellegű, esése átlagosan 37 cm/km, míg alatta az országhatárig középfolyás jellegű, átlagos esése pedig 8 cm/km [6]. A középfolyás jellegű folyókra a hordalék aprózódása jellemző, amely folyamat során görgetettből lebegtetetté válik a hordalék, emellett viszont nagy része tovább szállítódik, egy része pedig lerakódik a mederben, amely egyes részei ezáltal erodálódnak is. A középszakasz jellegű meanderező meder kanyarulatok és ellenkanyarulatok sorozatát írja le. Ezek a kanyarok azok, amik a homorú partot építik, a domború partot pedig erodálják. Az 1. ábrán a kanyarulatok átlagos keresztmetszésvényeit láthatjuk(A-A,C-C,E-E). Amennyiben rendelkezésre áll elegendő hely két ellentétes irányú kanyar között, úgy a B-B keresztmetszésvényű jó gázló jön létre. Ha azonban az íveknek túl gyorsan kell váltaniuk, akkor a D-D keresztmetszésvényen látható rossz gázló keletkezhet.

Az előbbi esetek közül a rossz gázló kialakulása hajózási szempontokat szem előtt tartva a leghátrányosabbnak mondható, hiszen ez nem csak a mélységi, de a szélességi kritériumot is negatívan befolyásolja. A meder feltöltődése és a meder kimélyülése is egyaránt problémát jelenthet. Továbbá, a meder kimélyülése következtében a vízszint csökken, amely a vízparti élővilág, a vízellátás és a part menti ipari létesítmények szempontjából is komoly problémákat okozhat. A meder feltöltődése hajózási szempontból pedig egy, még sokkal inkább kézzelfogható hátrányt jelent, hiszen ilyenkor csökken a hajózási mélység és a naptári évben hajózható napok száma is.



1. ábra Jellegzetes inflexiós szelvények [1]

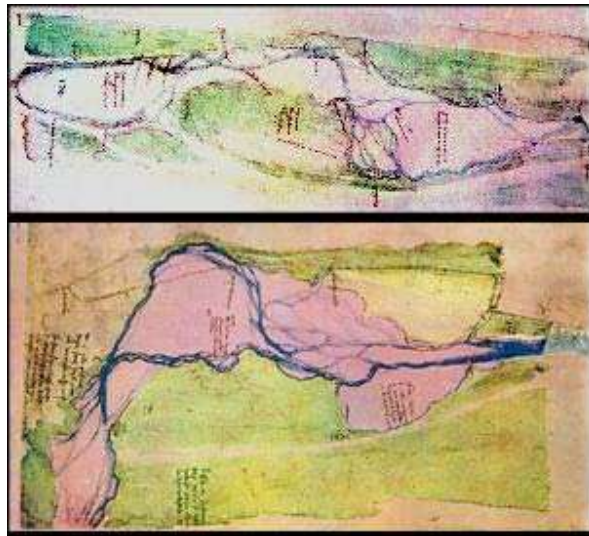
A természetes vízjárás szabályozása az árvízvédelem és a hajózhatóság szempontjából egy különösen fontos feladat. Ezen két területen a vízjárás szabályozását a hosszanti és keresztirányú szabályozó művek teszik lehetővé. Bizonyos problémák – (amelyeket korábban már részben felvezettem) - a meder változása miatt jelentkeznek. Ezek között az alábbiakat említhetjük: meder kimélyülése, meder feltöltődése illetve meanderező folyó esetén a túlfejlett kanyarok kialakulása. Ezek mellett még a rossz gázlók kialakulása (lásd fentebb az 1.ábrán) illetve a vízi élőhelyek

átalakulása. Ezen problémák jelentkezhetnek úgy természeti erők, mint emberi beavatkozás eredményeként. A mederkimélyülés természeti erők következtében, első sorban azért alakul ki, mivel a folyó elragadó ereje nagyobb, mint a meder ellenállása az elragadás ellen. A meder feltöltődése a folyó hordaléktranszport képességének csökkenése miatt alakul ki, illetve abban az esetben, ha a kiülepedés nagyobb, mint az elragadás. A folyó természetes vonalvezetésének megváltozása középszakasz jellegű vízfolyásoknál nem számít gyors. Emberi beavatkozások hatására viszont bizonyos változások igen gyorsan végbe mehetnek. A hajózási útvonal fenntartásához szervesen hozzá tartozik a zátonyok kezelése. A gázlók és zátonyok megszüntetésére legkézenfekvőbb megoldásnak az tűnik, ha a felesleges/útban levő/problémás/többlet anyagot kotrással eltávolítjuk a rendszerből. Rövid távon ez ugyan megoldást jelenthet lokálisan, hosszú távon és a rendszer egészét tekintve viszont egyáltalán nem biztos, hogy a változások mindig kedvező irányúak lesznek. A kotrás önálló alkalmazásakor a probléma kialakulásának okát nem szüntetjük meg, így a hordaléklerakódás miatt belátható időn belül újból kotrásra lesz szükség. A kotrás hatással van az alsóbb szakaszokra is. A meder alakja és formái hatással vannak az áramlásra és a kialakuló sebességekre. az esetlegesen stabilizálódott felsőbb mederrétegek áttörésével, megzavarásával egy intenzívebb helyi kimélyülés kezdődhet meg, amely szinte pontszerű hordalékterhelést okozhat az alvízen. Ez a többlet hordalék az alsóbb szakaszon problémás kiülepedési helyek kialakulásához járulhat hozzá, amelyeket éppen a kotrással terveztünk megszüntetni. A fenti példa jól szemlélteti azt, hogy hatékony folyószabályozást tervezve nem tehetjük meg azt, hogy pusztán lokálisan kezeljük a problémát. Egy jó megoldáshoz akkor juthatunk el, ha rendszer szinten gondolkodunk már a tervezés kezdeti fázisában is. Mindezek mellett azt is fontos megjegyeznünk, hogy a folyók morfordinamikai paraméterei igen összetettek, nagy kihívást jelent az egyes beavatkozások rövid és hosszútávú hatásait pontosan megbecsülni. Épp ezért van kiemelt jelentősége a különböző modellezési eljárásoknak és az ezekre irányuló kutatásoknak.

A fenti problémák némelyikének megoldására alkalmazhatjuk, a klasszikus vízmérnöki szemlélet szerint a keresztirányú műtárgyak családjába tartozó sarkantyúkat. Mivel kutatásom fő tárgya a sarkantyúk és ezek morfordinamikai hatása, így most következzen egy rövid áttekintés arról, hogy mi is a sarkantyú.

A vizsgált műtárgy bemutatása

Folyóvizekben a keresztirányú műtárgyak használata már évszázadok óta elterjedt. Ezen műtárgyak főként folyószabályozás céljából terjedtek el, fejlesztésük pedig a folyópart stabilizálása és a hajózhatóság javítása érdekében történik. Már igen korán, feltehetőleg 400-500 évvel ezelőtt dokumentálták sarkantyúk tervezését. Az egyik elsőként feljegyzett műtárgy Leonardo da Vinci nevéhez köthető, aki az Arno folyó szabályozása céljából tervezett sarkantyút.



2. ábra Leonardo da Vinci rajza az olaszországi Arno folyóról(XVI. század) [7]

A sarkantyúk gyakorlati alkalmazásának korai megkezdése ellenére még mindig igen keveset tudunk a sarkantyúmezők pontos hidro- és morfordinamikai valamint ökológiai hatásairól.

Így nem meglepő, hogy a legtöbb folyami rehabilitációs projektet még mindig nagymértékben empirikus, szinte próba-szerencse alapon végzik.

A sarkantyú, mint kisvízi, folyószabályozásra használt, általában a sodorvonalra merőleges tengellyel rendelkező műtárgy a szelvény szűkítése révén medermélyülést idéz elő.



3. ábra Google Earth műholdas kép a gönyői Duna-szakasz sarkantyúiról

A sarkantyúknak lokálisan az adott szelvényre, valamint szakaszléptékben van hatásuk. A hatásokat alapvetően két csoportba oszthatjuk. Elsőként említhetjük a közvetlen hidrodinamikai hatást, vagyis az áramlási kép megváltoztatását. Ez lehet például a sarkantyú szelvényében a vízszint megváltoztatása (természetben leginkább előforduló áramló vízmozgás esetében csökkentés), a felvízen pedig vízszint duzzasztása. Ezen túl pedig a sarkantyú mögötti limány kialakítása, a kopolyánál a másodlagos áramlási struktúra mértékének fokozódása a sarkantyúk fő hatása. A másik általában kívánt hatás a megváltozott áramlási kép okozta mederváltozás. A sarkantyú szelvényében medermélyülés, a sarkantyú feletti áramlási holt zónában pedig feliszapolódás.

A sarkantyúkat elsődlegesen a sodrásvonal eltolására, a meder mélyítésére, partvédelemre, illetve az általuk közrefogott terület feltöltésére használjuk. Ezek mellett számos kutatás tárgyát képezi a sarkantyúk egyes halfajokra gyakorolt feltehetően kedvező hatása. A keresztmű alvízi oldalán a víz lelassulása következtében limány alakul ki. A lelassuló víz kinetikus energiájának jelentős részét elveszítve hordalékot rak le. A halak kifejezetten szeretik a változatos vízmélységeket és sebességeket. Általánosa minél nagyobb a biodiverzitás, annál értékesebbnek tekintünk egy helyszínt. A változatosabb partvonal és áramlási viszonyok több fajnak biztosítanak kedvező

életteret, így közvetett módon a sarkantyúk építése elősegítheti a biodiverzifikációt. Igaz, hogy az ökológia a sarkantyúépítés történelmében nem rég óta érdekes szempont, így a hagyományos sarkantyúk esetleges előnyös hatása inkább egy szerencsés véletlen. Sok helyen kifejezetten negatív hatást fejt ki az élővilágra ezért az új sarkantyú geometria kialakításával foglalkozó kutatásoknál erre kifejezetten nagy hangsúlyt fektetnek.

1D vizsgálatok

A következő levezetést és egyenleteket a Hidraulika I. HEFOP segédlet 25. oldalától kezdődő fejezetből vettem át.

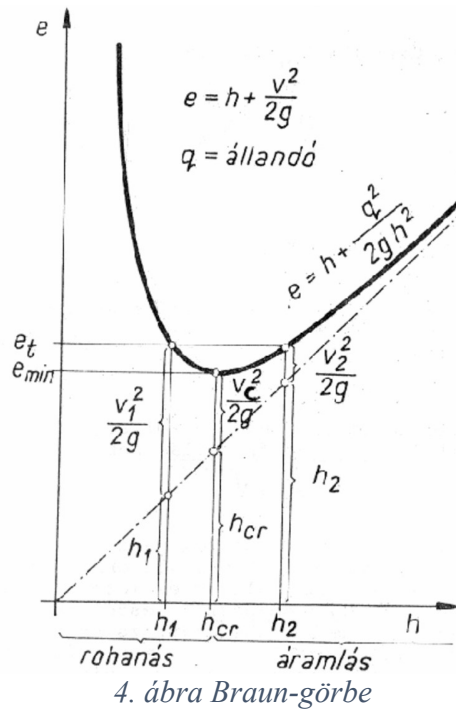
Téglalap szelvényű csatornában, permanens állapotban, a szelvény energiaszintjének magassága (fajlagos energiája) a fenékszinthez képest a Bernoulli-egyenlet alapján:

$$e = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = h + \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

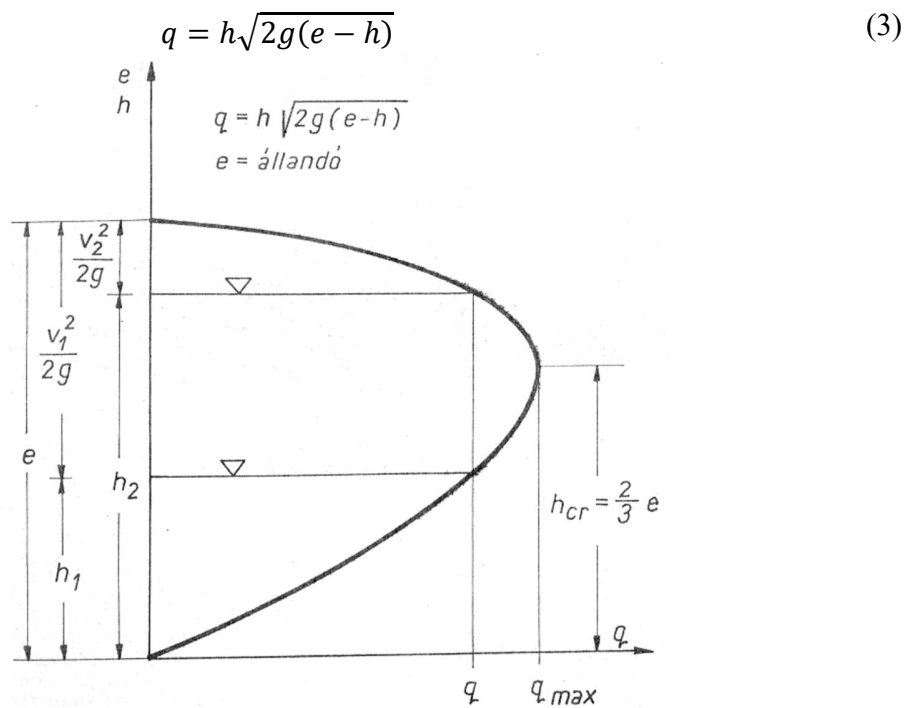
ahol e az energiaszint, z a geodéziai magasság, p a nyomás, γ a víz fajsúlya, v a szelvényközépsébség, g a nehézségi gyorsulás h pedig a vízmélység. Ebből a fajlagos energia és a vízmélység összefüggése a vízsebesség q fajlagos vízhozammal történő kifejezésével:

$$e = \frac{q^2}{2gh^2} + h \quad (2)$$

Ezt ábrázolva az úgy nevezett Braun-görbét kapjuk.



Ha a fajlagos energia egyenletét rögzített energiaszint mellett átrendezzük a fajlagos vízhozamra a Koch-görbét kapjuk:

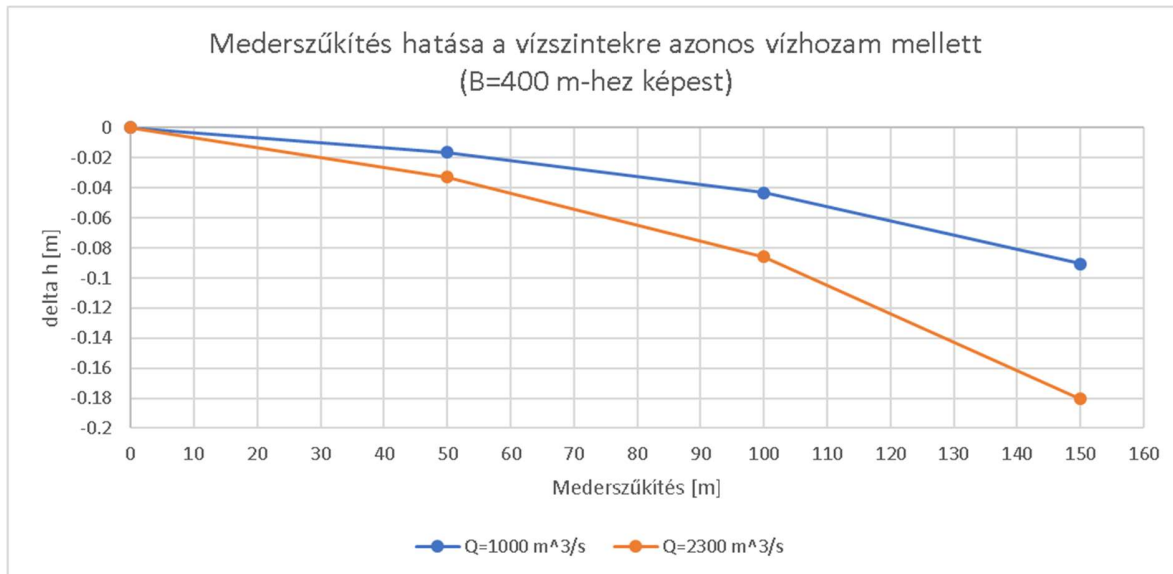


Ezen két görbe segítségével megbecsülhetjük a sarkantyú szelvényében a várható áramlási jellemzőket. Vizsgálataim során elkészítettem a következő paraméterezésű változat Koch-és Braun-görbéjét, valamint számításokkal megbecsültem a sarkantyú szelvényében várható vízszintváltozást. Fontos megjegyezni, hogy ez a számítási mód nem veszi figyelembe a sarkantyúk mederváltoztató hatását. A paraméterek a következők:

- szélesség: 400 m
- vízhozam: 1000 és 2300 m³/s
- Manning-féle simaság: 40 m^{1/3}/s
- Esés: 7 cm/km

A paramétereket a magyarországi Felső Dunára jellemző értékek alapján vettem fel.

Számításaim szerint (6. ábra) a mederszűkítés növelésével csökkennie kell a vízszinteknek a Dunára jellemző áramló vízmozgás esetén. A maximális vízszintváltozás így -0,18 m lenne. Ez az érték nagyságrendi becslésnek ugyan megfelel, de a képletek alkalmazása közben több egyszerűsítéssel is éltünk: a csatorna mentén állandó felszínésés, szelvény mentén azonos sebességek, permanens állapot, amik a valóságban nem elhanyagolható mértékben jelentkeznek. Az egyszerű számítások azt viszont sugallják, hogy a sarkantyúk pusztán mederszűkítő hatása nem eredményez a hajózás szempontjából kedvező változásokat, ahhoz a meder átrendeződése is szükséges! A mederváltozás számítása ilyen egyszerű, 1D szemlélettel nem kivitelezhető (kopolyaképződés számításához min. 2D leírás szükséges). A továbbiakban ezért végeztem 3D vizsgálatokat.



6. ábra A mederszűkítés hatására kialakuló vízszintcsökkenés számítása

3D vizsgálatok

Az alkalmazott numerikus modell bemutatása

Az alkalmazott modell bemutatását Török Gergely Tihámér 2011-es TDK dolgozatából idézem.

Az SIIMM nevű numerikus modell lehetőséget biztosít 3D áramlás, valamint lebegtetett és görgetett hordaléktranszport szimulálására. A mederpáncélozódás folyamatának modellezésének vizsgálatához TDK kutatásomban ezt a programot használtam.

Az áramlásmo­dell bemutatása

A Navier-Stokes egyenletek

A modell az áramlást a Navier-Stokes egyenletek Reynolds átlagolt alakjának közelítő megoldásával számítja. A formulák a víz mozgásának egy végtelen kicsi térfogatra felírt lendület megmaradás törvényét írják le az alábbiak szerint:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad (4)$$

ahol: P a nyomás, δ_{ij} a Kronecker delta ($\delta_{ij} = 1$, ha $i=j$, egyébként $\delta_{ij} = 0$), u az időátlagolt sebesség, t az időlépés, x a térlépés, ρ a víz sűrűsége.

A Reynolds egyenletek három független egyenletet jelentenek, itt az Einstein-féle szummázást alkalmaztuk. Ez a három egyenlet azonban négy ismeretlent tartalmaz, a sebesség három főirányú komponensét és a nyomást. Az egyértelmű megoldáshoz szükséges összefüggést a térfogat megmaradás törvényéből levezetett, alábbi egyenlet adja:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

A Reynolds egyenletek utolsó tagjára, az úgynevezett Reynolds feszültség számítására több eljárás ismert, a SIIMM a Boussinesq közelítését alkalmazza:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \rho \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

ahol: k a turbulens kinetikus energia, ν_T a turbulens örvény viszkozitás.

Ezek alapján a Navier-Stokes egyenletek az alábbi formát öltik:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[- \left(P + \frac{2}{3} k \right) \delta_{ij} + \rho \nu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \nu_T \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

Az egyenlet bal oldalának első tagja a sebesség időbeli megváltozását, második tagja pedig a konvekciót írja le. Az egyenlet jobb oldalán található a nyomás és a kinetikus energia térbeli megváltozását leíró tagok, valamint a diffúziót és feszültséget becsülő összefüggések.

A k - ε turbulencia modell

A Navier-Stokes egyenletekben szereplő Reynolds feszültség a turbulens áramlásban kialakuló örvények okozta mozgási energia disszipációját jelenti. Mivel ez az energiavesztés nem elhanyagolható, az áramlás megbízható modellezéséhez fontos annak minél megbízhatóbb becslése. Kisebb örvények modellezéséhez már olyan finom időbeli és térbeli felbontásra lenne szükség, ami már túllépne a kor technológiája által megszabott határán. Ezért a Reynolds feszültséget a már ismertetett Boussinesq összefüggéssel becsli a SIIMM.

A turbulencia modellek feladata, hogy az egyenletben szereplő ν_T turbulens örvény viszkozitás térbeli és időbeli eloszlását számítsa. Erre a SIIMM a k - ε turbulencia modellt alkalmazza.

Ez az egyik legismertebb turbulencia modell az örvény viszkozitást az alábbi összefüggéssel becsli:

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

ahol: C_μ egy konstans, $C_\mu = 0,09$.

Az összefüggésben szereplő k és ε értékeit az alábbi összefüggésekkel számolja:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_T \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (9)$$

ahol: P_k a turbulencia produktuma, ε pedig a turbulens kinetikai energia disszipációja.

P_k -t és ε -t az alábbi összefüggések határozzák meg:

$$P_k = \nu_T \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

ahol: $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k és σ_ε konstansok, értékük: $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$ és $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Az egyenletek alapján látható, hogy a k - ε turbulencia modellben az örvény viszkozitás az irányok mentén nem változik, tehát izotróp turbulenciát feltételez. Schall (1983) laboratóriumi mérései azonban kimutatták, hogy az örvény viszkozitás akár egy nagyságrenddel is nagyobb lehet az áramlás irányában, mint a keresztmetszvény síkjában. A k - ε turbulencia modell alkalmazásának az izotrópia szabhat határt.

Faltörvény

A vizet határoló falak mentén a modell stabilitási problémákba ütközhet a sebességek hirtelen, nagymértékű megváltozása miatt. A probléma egy lehetséges megoldása a rácsháló sűrítése lehetne, ami azonban nagymértékben megnövelné a számítási igényt. Ennek kiküszöbölésére a falak meghatározott környezetében nem az alapegyenleteket, hanem a faltörvény összefüggésével számol a modell. Az empirikus egyenlet a következő:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30y}{k_s} \right) \quad (12)$$

ahol: u_* a fenékcúszató feszültség, κ a Kármán féle állandó, $\kappa = 0,4$, y a faltól mért távolság, k_s pedig a mederanyag átmérője.

Az összefüggés egy olyan logaritmikus függvényt ír le, aminek az értéke a falnál 0.

A modellben beállítható, hogy a faltörvény alapján számítsa a mederfenék, illetve az oldalfalak mentén az első cellák sebesség és turbulencia paramétereit is.

A hordalékmodell ismertetése

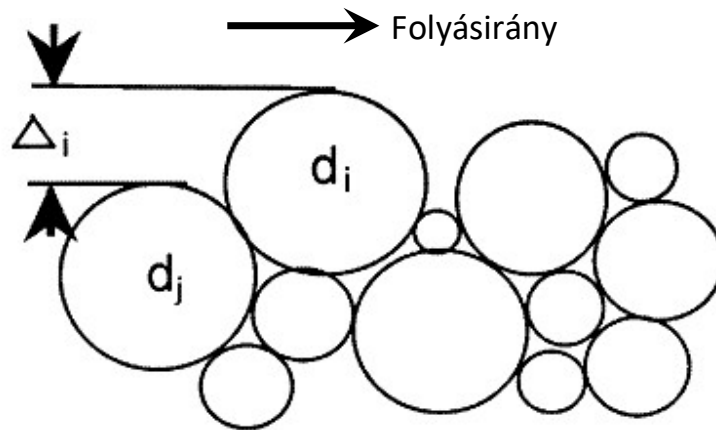
A vízfolyásokban tapasztalt hordaléktranszport alapvetően két folyamatból tevődik össze: a lebegtetett és a görgetett hordalékmozgásból. Az adott szemcse mérete és a víz turbulenciája határozza meg, hogy a szemcse lebegtetett, vagy görgetett hordalékmozgást végez-e. A két folyamatot a SIIIM modell is megkülönbözteti, én azonban vizsgálataimban csupán a görgetett mozgást számszerűsítettem.

Görgetett üledéktranszport a Wu formulával

A SIIIM-ben lehetőség van a görgetett üledékmozgást a Wu fél összefüggésekkel számíttatni. A módszertant a vegyes szemösszetételű meder hordaléktranszport becslése céljából fejlesztették ki. Az eljárás újdonsága abban áll, hogy egy korrekciós tényezőt vezettek be, amit a leárnyékolás és a kitétségi valószínűségének függvényeként adtak meg.

Leárnyékolási és kitétségi faktor

Egy kiragadott mederszemcsére ható elragadó és azt megakadályozó erők mértéke nagyban függ a szemcse elhelyezkedésétől és a közvetlen környezetében elterülő szemcséktől. Ha a felvív oldalán nincs mellette egy másik szemcse, teljes mértékben kitétt az áramlásnak és ekkor van a legnagyobb kitétségi magassága. A d_i átmérőjű szemcse Δ_i kitétségi magasságát a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra - Kitétségi magasság definiálása

Ez alapján, ha $\Delta_i > 0$, a szemcse kitétségét, ha $\Delta_i < 0$ a szemcse leárnyékolását kell figyelembe venni. Mivel a mederszemcsék eloszlása véletlenszerű, Δ_i egy véletlen változó.

Annak a valószínűségét, hogy d_i szemcse d_j szemcse előtt van, a d_j méretű szemcse frakciójának a teljes mederanyag keverékre számolt arányával közelítik, p_{bj} . Ezek alapján d_i szemcse leárnyékolási (hidden) és kitétségi (exposed) valószínűsége:

$$p_{hi,j} = p_{bj} \frac{d_j}{d_i + d_j} \quad (13)$$

$$p_{ei,j} = p_{bj} \frac{d_i}{d_i + d_j} \quad (14)$$

A teljes leárnyékolási és kitétségi valószínűségek értéke:

$$p_{hi} = \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_j}{d_i + d_j} \quad (15)$$

$$p_{ei} = \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_i}{d_i + d_j} \quad (16)$$

ahol: N a mederanyag frakcióinak száma.

A teljes leárnyékolási és kitétségi faktor a következő:

$$\eta_i = \left(\frac{p_{ei}}{p_{hi}} \right)^m \quad (17)$$

ahol: m az empirikus paraméter.

Hordalékhozam számítása

A mederszemcsék leárnyékolási és kitétségi mértéke a kritikus csúsztatófeszültséget nagymértékben befolyásolják. A modell ezt úgy veszi figyelembe, hogy a kritikus csúsztatófeszültséget nem a Shields görbe alapján számolja, hanem az alábbi egyenlőséggel közelíti:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d_i} = \theta_c \left(\frac{p_{ei}}{p_{hi}} \right)^m \quad (18)$$

ahol: τ_c a d_i átmérőjű szemcse kritikus csúsztatófeszültsége, θ_c a homogén, d_i átmérőjű mederanyag szemcséjének dimenziómentes kritikus csúsztatófeszültsége.

Laboratóriumi és terepi mérések alapján $\theta_c = 0,03$ és $m = -0,6$.

A görgetett hordalékhozamot a modell az alábbi összefüggéssel számítja:

$$q_{b,i} = \phi_{b,i} p_{b,i} \sqrt{(\gamma_s - \gamma) g d_i^3} \quad (19)$$

ahol: $\phi_{b,i}$ az i -dik frakció dimenziómentes hordalékhozama, $p_{b,i}$ a d_j méretű szemcse frakciójának a teljes mederanyag keverékre számolt aránya, γ_s és γ a hordalék és a víz fajsúlya.

A dimenziómentes hordalékhozamot az alábbi egyenlet adja meg:

$$\phi_{b,i} = 0.0053 \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{1.5} \frac{\tau_b}{\tau_{c,i}} - 1 \right]^{2.2} \quad (20)$$

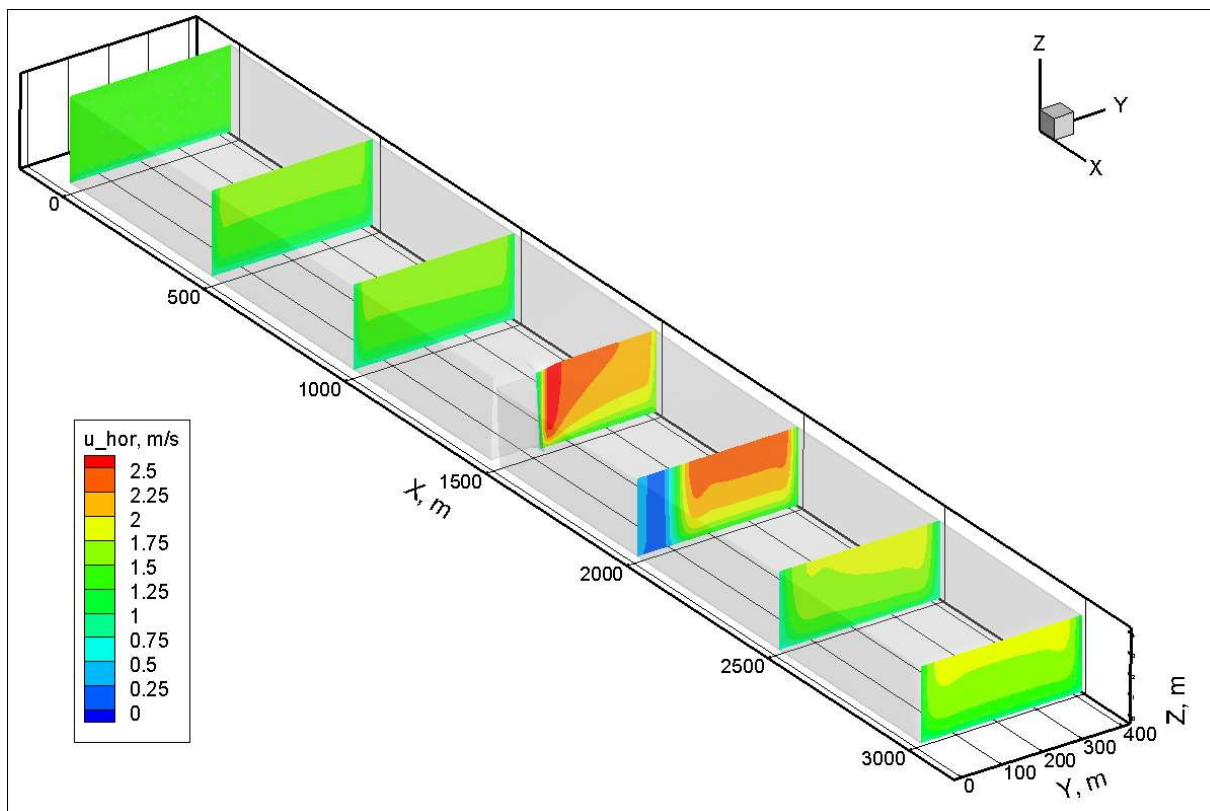
ahol: n a hidradinamikai modellben kalibrált Manning-féle érdességi együttható, n' az i -dik szemcse érdességének megfelelő Manning-féle érdességi együttható, τ_b a szemcse érdessége okozta fenékcúsztató feszültség (teljes fenékcúsztató feszültség).

Paraméterek felvétele

Az általam felépített modellben egy téglalap szelvényű, egyenes tengelyű csatornát építettem, a sarkantyúk általános tulajdonságainak vizsgálata érdekében. A vizsgálat elvégzése során döntenem kellett arról, mi alapján veszem fel a geometriai és hidraulikai alap adatokat. Konzulensem tanácsára a csatorna általános paramétereit a Duna Gönyű és Nagybajcs közti szakaszára jellemző értékek szerint vettem figyelembe. A vizsgálat első lépéseként kézzel számítottam ki a sarkantyú várható hatását a kialakuló vízszintekre és vizsgáltam a 3D modell szükségességét (lásd 1D vizsgálatok). Elsőnek a mederszélességet határoztam meg. A Google Earth térképének segítségével lemértem az átlagos mederszélességet Gönyű és Nagybajcs között. Az átlagos érték 400 m-nek adódott. A továbbiakban ezt az értéket vettem alapul, de 200 és 600 m széles meder változatot is vizsgáltam. A sarkantyúk hosszát mindig az adott mederszélesség 20, 25 és 30 %-nak vettem fel. A sarkantyút a befolyási szelvénytől 1500 m-re vettem fel, a kifolyást pedig a sarkantyútól 1500 m-re (8. ábra). Így összesen 3000 m hosszú a modellezett csatorna. Ezt a hosszt korábbi próbafuttatások alapján határoztam meg úgy, hogy a várt áramlások szépen

kibontakozhassanak a peremhatás figyelembevételével. Fügőleges értelemben 30 cellát definiáltam, azok magasságát a program mindig az aktuális vízmélység függvényében számolta. A vízszintes kiosztást a sarkantyú 500 m-es körzetében szintén 10 m-nek vettem fel. A befolyásnál a cellák szélessége 50 m, a kifolyásnál 30 m és a peremek és a sarkantyúnál sűrített cellakiosztás között fokozatosan változnak a cella méretek. Az esést a magyarországi Dunaszakasra jellemző 7cm/km értékben határoztam meg. A modell futtatásához szükséges a kifolyási vízszint meghatározása. A vízszint számításához a Chézy képletet használtam, ahol a k Mannin-féle medersimásági tényezőt $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ értékűnek vettem fel. Jelen dolgozatban kisvízi és középvízi vízhozam értékeket vizsgáltam: $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ és $2300 \text{ m}^3/\text{s}$. Az időlépést az áramlásmodell esetén 1 s-nak, a hordalékmodell esetén pedig 10 percnak vettem fel. A nagy időlépés beli különbség a modell futási idejével indokolható. Az hordalékmodell nagyságrenddel hosszabb idő alatt fut le, mint az áramlásmodell, 10 perces időlépést használva még stabil marad a hordalék modell. Az aktív rétegvastagságot 0,5 m-re vettem fel. A szoftverben alpból elérhető hordalékmodellek közül a Wu-modell az egyetlen, ami vegyes szemösszetételű mederanyagra lett kidolgozva. A szoftver lehetőséget biztosít más modellek beprogramozására is, azok futtatási ideje azonban jelentősen nagyobb, mint az alap hordalékmodellek alkalmazásához szükséges futtatási idő. Ezek miatt döntöttem a Wu modell alkalmazása mellett. A mederanyagot Gönyű mellett található eloszlás alapján vettem fel a következő táblázat szerint:

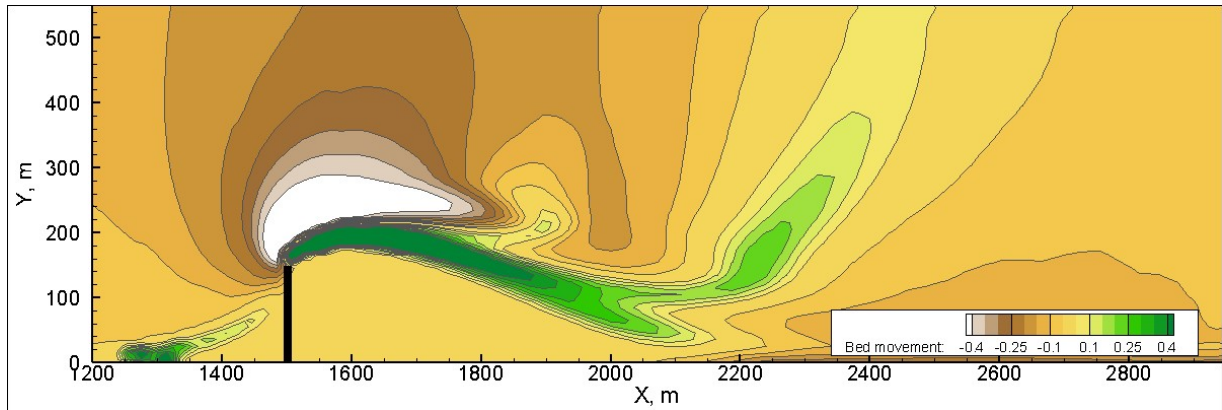
| Szemnagyság [mm] | tömegarány [%] |
|------------------|----------------|
| 63 | 8,62 |
| 29,17 | 43,25 |
| 8 | 15,05 |
| 3 | 18,34 |
| 0,58 | 14,57 |
| 0,0625 | 0,17 |



8. ábra Szelvény menti sebességeloszlások a $2300 \text{ m}^3/\text{s}$ -os vízhozammal futtatott, 400 m széles modellből 50 m hosszú sarkantyú beépítésével

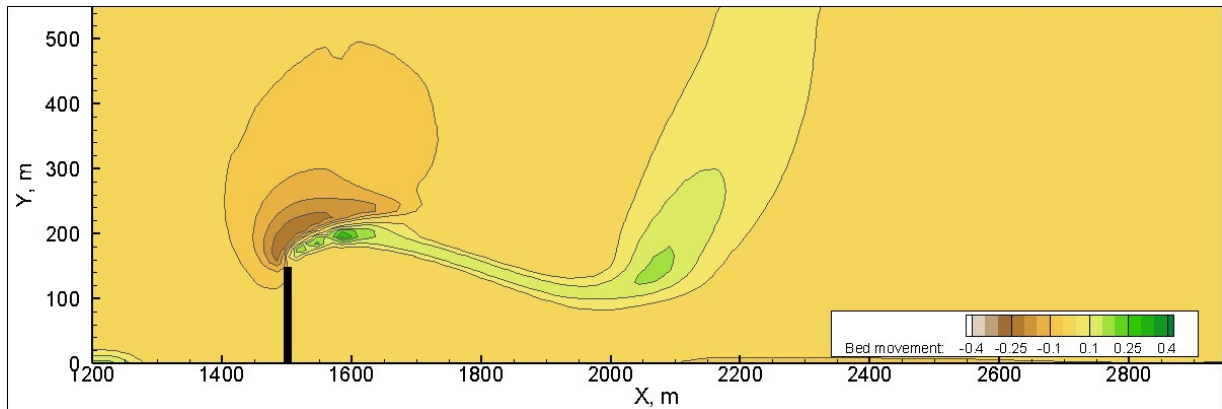
Eredmények tárgyalása

Az alábbi ábrán a 600 méter széles csatorna mederváltozásai láthatók, 150 méter hosszúságú sarkantyú és $2300 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozam mellett. Mint azt vártuk, a szelvény szűkítésével megnőtt a sebesség, a fenék-csúsztatófeszültség és így kimélyülés következett be a szűkületben. A kimélyülés maximális értéke majdnem eléri a $0,5 \text{ métert}$. Ilyen vízhozam mellett a kimélyülés a teljes mederszélességben érezhető, nem csak a sarkantyú orránál. Ez hajózás szempontjából már jelentős eredmény lehet. Szépen kirajzolódik a sarkantyú alvizen a feltöltődés, ami a vízsebesség lassulásának következménye.



9. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 600 m, vízhozam= 2300 m³/s, sarkantyúhossz= 25%

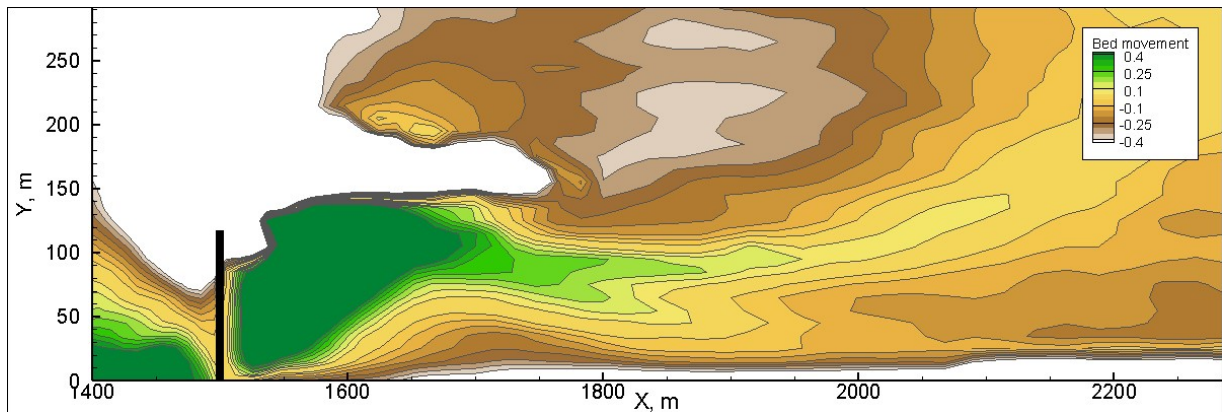
Az alábbi ábrán az előző változathoz képest csupán a vízhozamot változtattam 1000 m³/s értékre. Hasonló tendenciákat mutatnak az eredmények kisvízes állapokra, mint középvíz esetén. A maximális kimélyülés ebben az esetben csupán 0,25 m, és ez a kimélyülés is inkább csak a sarkantyú közvetlen környezetében alakul ki. A mederszűkítés hatása nincs jelentős hatással az egész mederszélességben. A sarkantyú csúcsa után lokális feltöltődés látható, de az ábra alapján jelentős feltöltődés nem történik.



10. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 600 m, vízhozam= 1000 m³/s, sarkantyúhossz= 25%

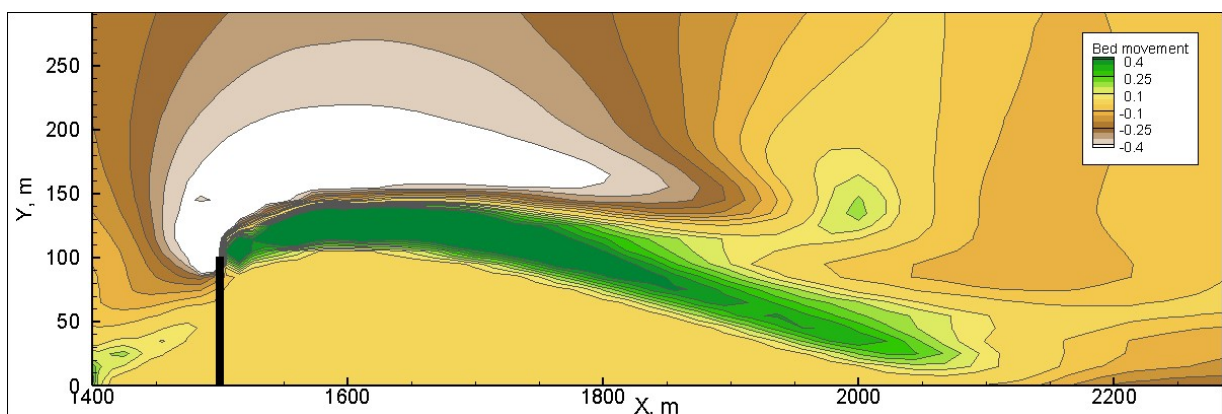
A következő ábrákon a 400 méter széles meder esetén futtatott modellek eredményeit mutatom be a mederváltozás szempontjából. Az első ábrán középvízi vízhozam esetén a mederszélesség 30 %-ig benyúló sarkantyú esetét láthatjuk. Az ábrán jelentős hatást mutat a mederszűkítés. A kimélyülés

értéke több mint 1,5 métert is elér a sarkantyú közelében. A medermélyülés a csatorna egész szélességében érezteti hatását. Jelentős kimélyülés tapasztalható a sarkantyú keresztmetszetében. A feltöltődés hasonlóan jelentős, az ábra alapján a felvízen is nagy feltöltődés figyelhető meg. Meg kell jegyezni, hogy ennél a futtatásnál az értékekben nagyobb a bizonytalanság, mivel az idő rövidege miatt nem tudott a modell teljes dinamikus egyensúlyig lefutni.



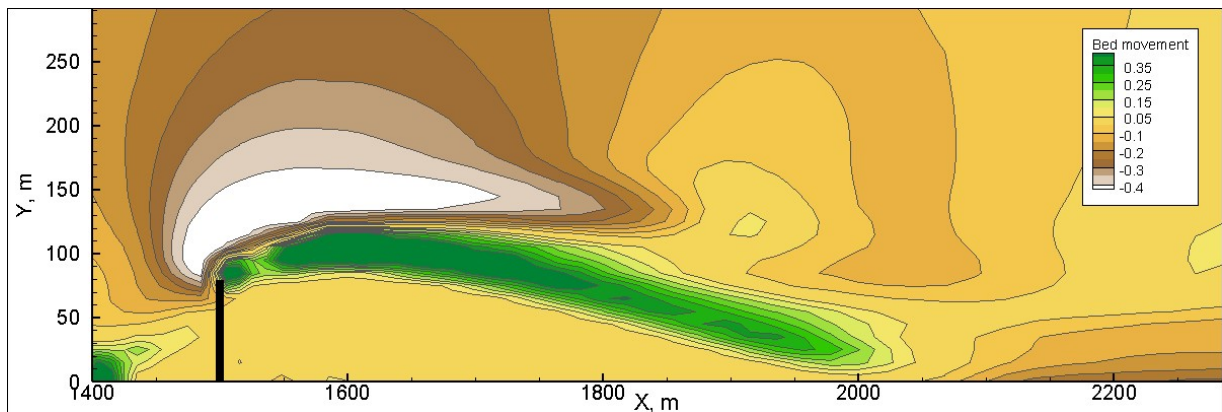
11. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m³/s, sarkantyúhossz= 30%

A következő ábrán a teljes szélesség 25%-ig benyúló sarkantyú hatását láthatjuk. A kimélyülés itt is az egész keresztmetszetben jelentős. A fenti ábrához képest a feltöltődés hosszabban elnyúlik és eléri a partot.



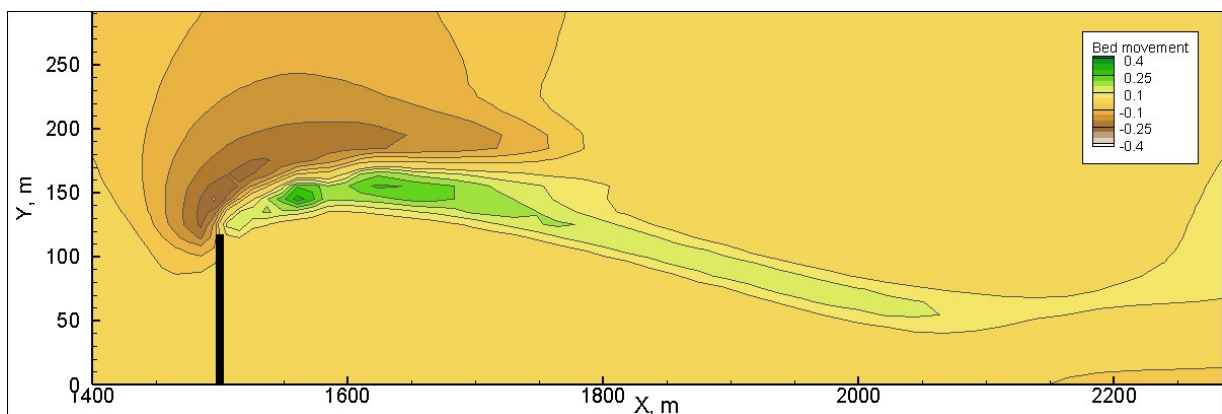
12. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m³/s, sarkantyúhossz= 25%

A 20% relatív hosszúságú sarkantyú esetén hasonló alakú a mederváltozás, mint a 25%-os esetben. A különbség abban érhető tetten, hogy ennél a változatnál a feltöltődés hossza lerövidül és a mederváltozások számértéke is csökken.



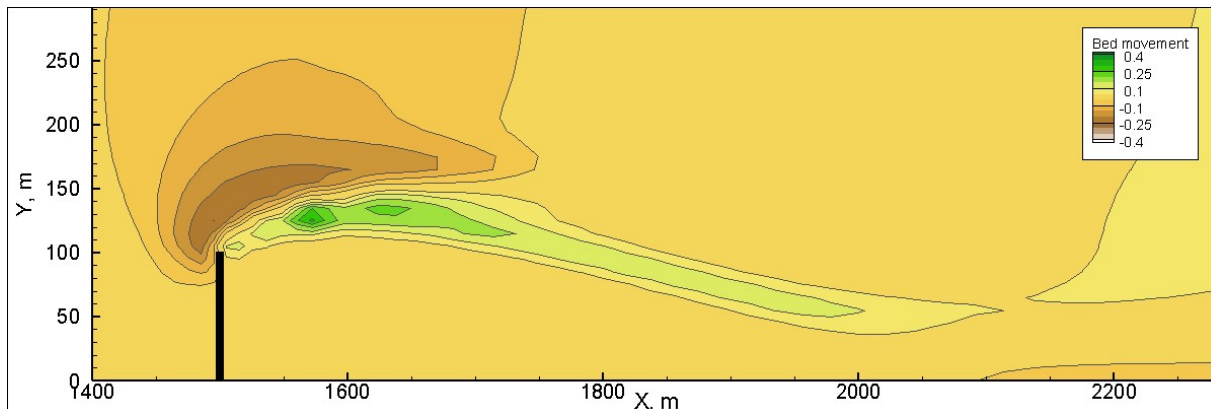
13. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m³/s, sarkantyúhossz= 20%

Eljutottunk a 400 méter széles csatorna kisvizes vizsgálatához. A modellezett leghosszabb relatív hosszúságú sarkantyú maximálisan 0,3 m kimélyülést okozott a műtárgy közelében. A meder felétől a kimélyülés 15 dm alatt marad. A feltöltődés kevésbé markáns, a felvízi oldalon eddig megjelenő feltöltődés itt nem figyelhető meg.



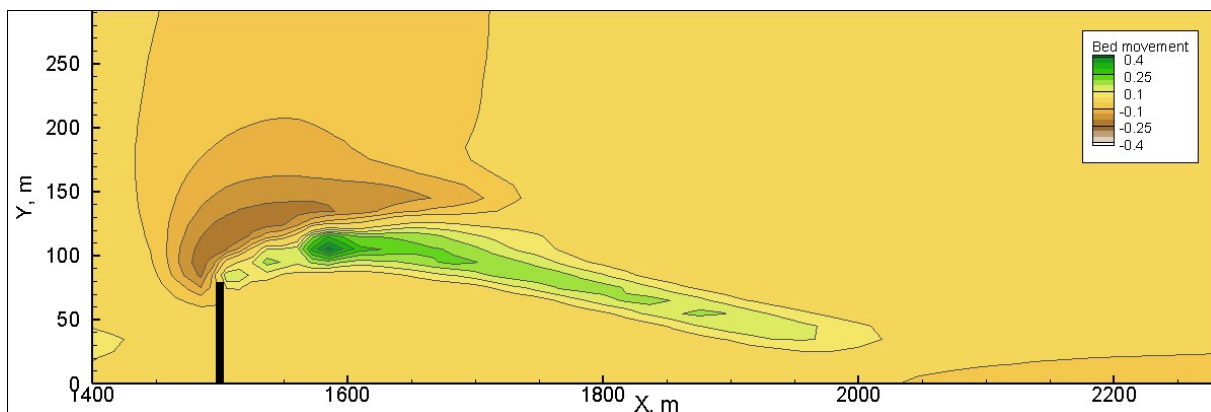
14. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 1000 m³/s, sarkantyúhossz= 30%

A mederváltozás a következő ábrán kisebb mértékű, mint a hosszabb sarkantyú esetén. Jellemét tekintve megegyezik a fenti változattal.



15. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 1000 m³/s, sarkantyúhossz= 25%

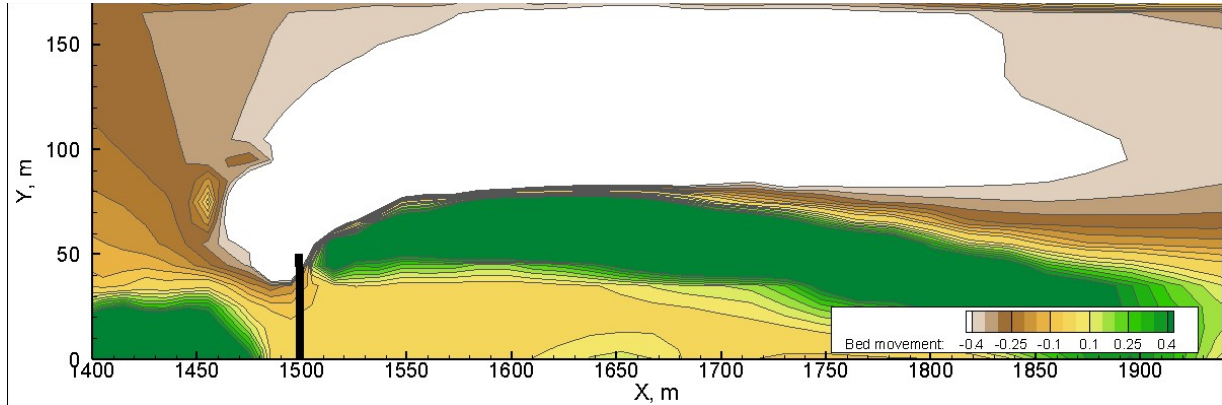
A legrövidebb sarkantyú hatása az ellentétes parton gyakorlatilag elhanyagolható, ekkora hibája van magának a számításnak is. Érdekes módon itt a feltöltődés mértéke nagyobbak adódott, mint a hosszabb sarkantyúk feltételezésével vizsgált változatokban.



16. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 1000 m³/s, sarkantyúhossz= 20%

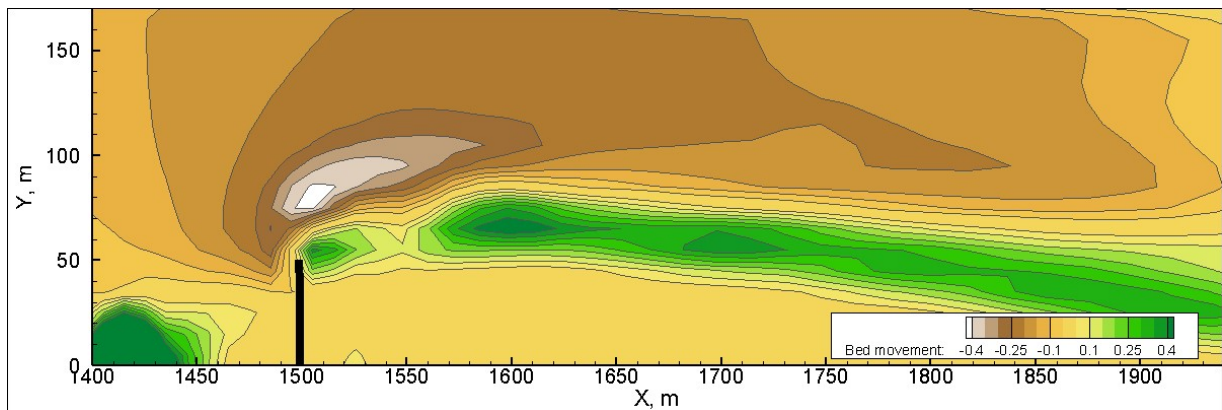
A 200 méter széles csatornában 2300 m³/s vízhozam esetén 50 m hosszú sarkantyú mellett az alábbi mederváltozás figyelhető meg. A mederkimélyülés hosszan érezteti hatását az alvízen. A

kopolyánál több méter mélység is kialakulhat. Nem csak a kimélyülés, de a feltöltődés is jelentős ilyen szűk meder esetén. A sarkantyú felvívén és alvívén is komoly zátonyok alakulnak ki.



17. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 200 m, vízhozam= 2300 m³/s, sarkantyúhossz= 25%

Kisvízes állapot esetén is jelentős kimélyülések figyelhetők meg a meder egész szélességében, bár a középvízes változathoz képest sokkal enyhébb a kimélyülés és sekélyebbek a feltöltődések is.

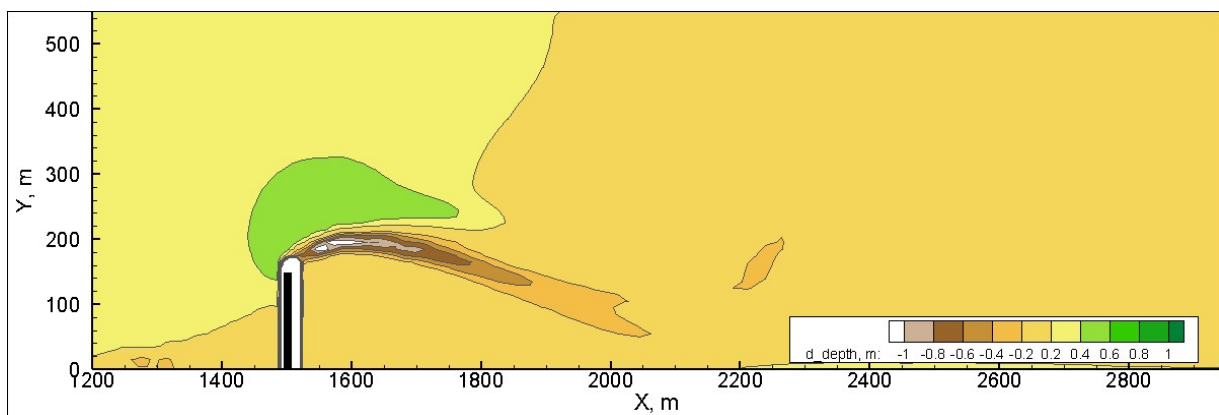


18. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 200 m, vízhozam= 1000 m³/s, sarkantyúhossz= 25%

Hajózhatóság szempontjából fontos megjegyezni, hogy a vízmélységet nem csupán a medermélyítés által befolyásolják a sarkantyúk. A mederszűkítés által beduzzasztó vagy vízszintcsökkentő hatása is fontos lehet. Az alábbi ábrákon a kezdeti vízmélységhez viszonyított

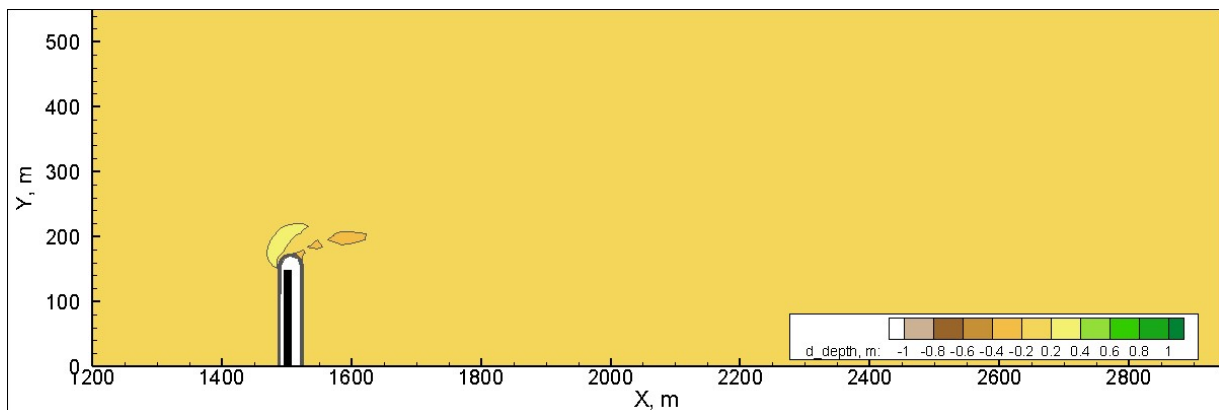
változást szeretném bemutatni. A 3D modellezés egyik hatalmas előnye, hogy a sarkantyú ilyen jellegű különböző hatásait egyszerre tudjuk vizsgálni. Az ábrák bemutatásának sorrendje megegyezik a mederváltozásra vonatkozó ábraszorozat sorrendjével.

Az első ábrán a 600 méter széles meder látható, 150 méter hosszú sarkantyúval, 2300 m³/s vízhozam esetén. A sarkantyú szelvényében közel 0,4 m magas visszaduzzasztás, a sarkantyú feletti közvetlen 100 m-en pedig ennél is nagyobb visszaduzzasztás tapasztalható. A sarkantyú alvizén akár 1 m-es vízszintsüllyedés is kialakulhat. Ez a hatás az első 500 m-en tapasztalható, lejjebb nem érzékelhető a sarkantyú hatása.



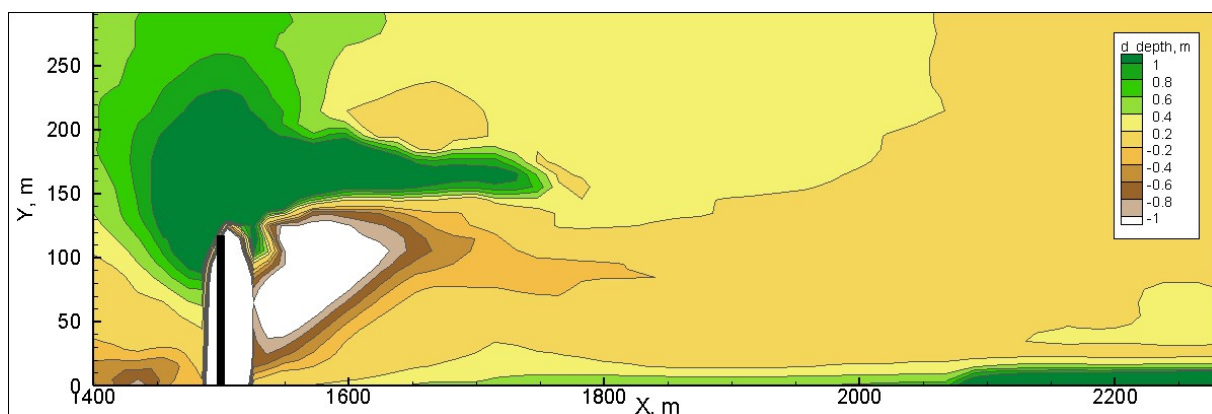
19. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 600 m, vízhozam= 2300 m³/s, sarkantyúhossz= 25%

Kisvízes állapot esetén a sarkantyú duzzasztó hatása elhanyagolható 600 m széles meder esetén.



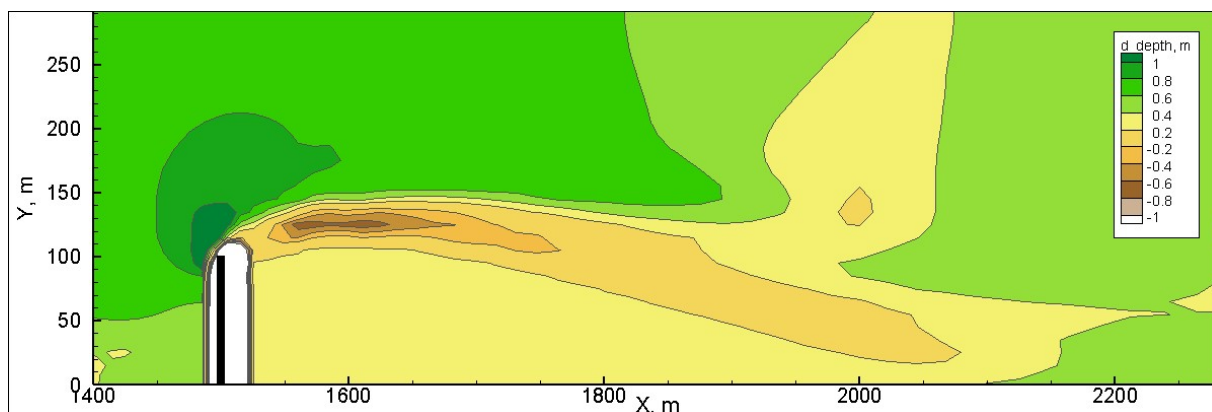
20. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 600 m, vízhozam= 1000 m³/s, sarkantyúhossz= 25%

A következő három ábra 400 m széles mederre vonatkozik, 2300 m³/s vízhozam mellett. A leghosszabb vizsgált sarkantyú visszaduzzasztása jelentős, az alvízi szakaszon a vízszintcsökkenés 1 m is meghalad.



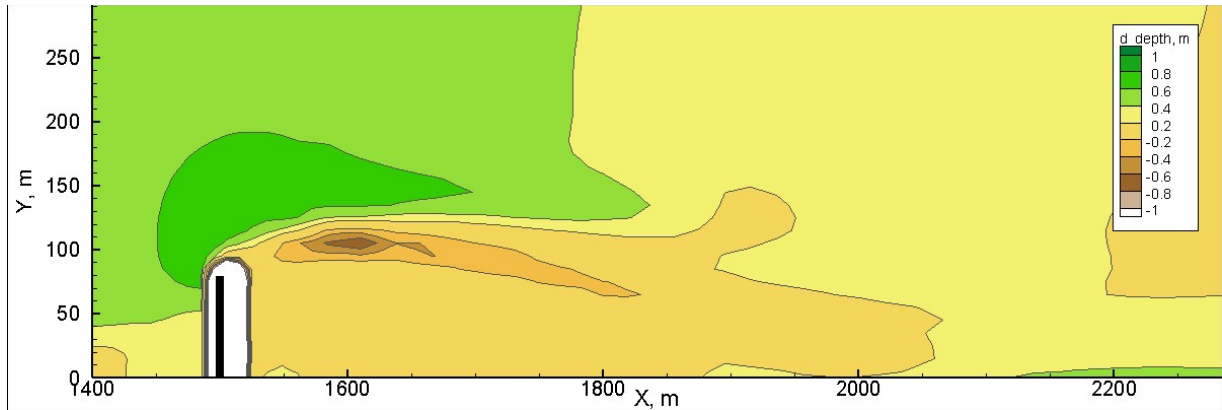
21. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m³/s, sarkantyúhossz= 30%

A 100 m hosszúságú sarkantyú akár 0,8 m is visszaduzzaszt a sarkantyú szelvényében. A visszaduzzasztás a sarkantyú csúcsa felett 40 m-ig a legjelentősebb. Alvízi hatásai 500 m hosszan egyértelműen érzékelhetőek.



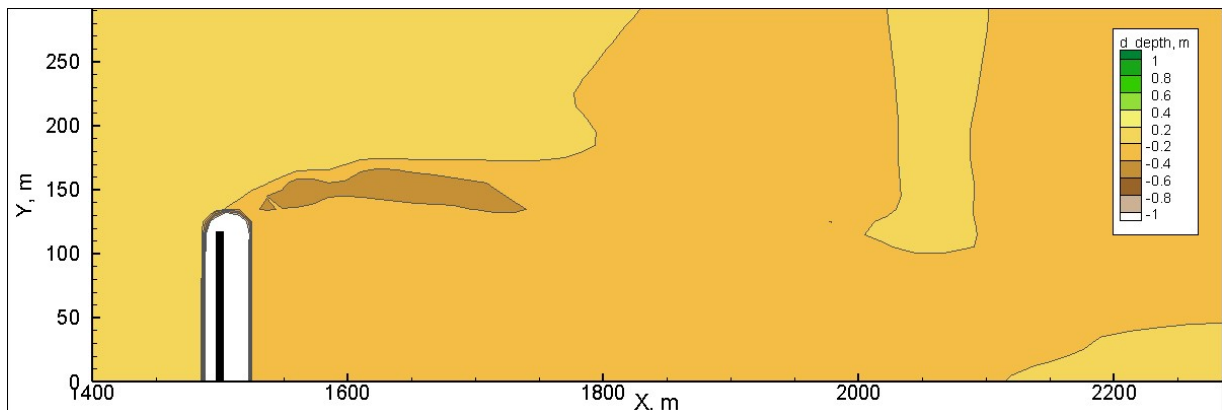
22. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m³/s, sarkantyúhossz= 25%

20% -os relatív szélességű sarkantyú esetén még mindig érezhető a visszaduzzasztás hatása. Az alvízi vízszintsüllyedés sokkal rövidebb ideig érezhető.

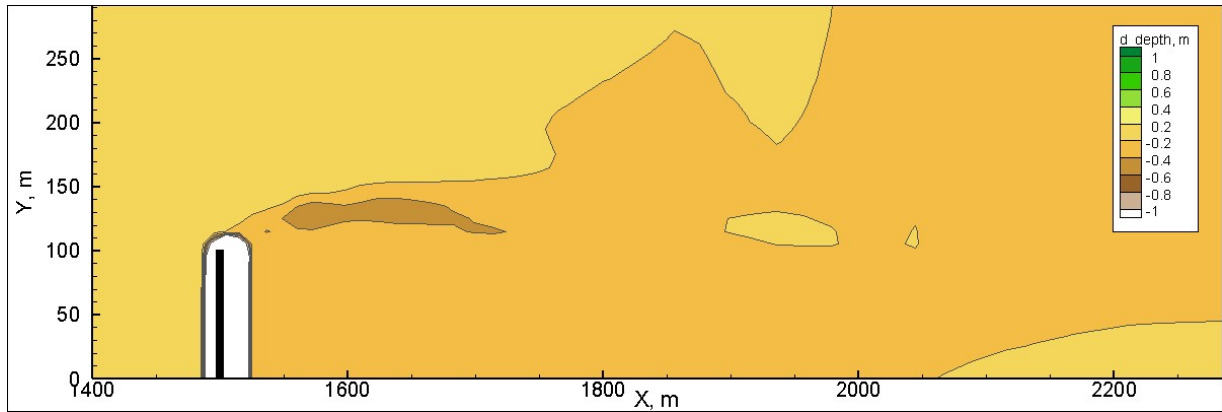


23. ábra Vismélységváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m³/s, sarkantyúhossz= 20%

A sarkantyú utáni vízszintesökkenés 200 m-en keresztül 0,4 m körül mozog, ezen kívül a duzzasztás/vízszintcsökkenés +/- 0,2 m-t nem nagyon haladja meg.

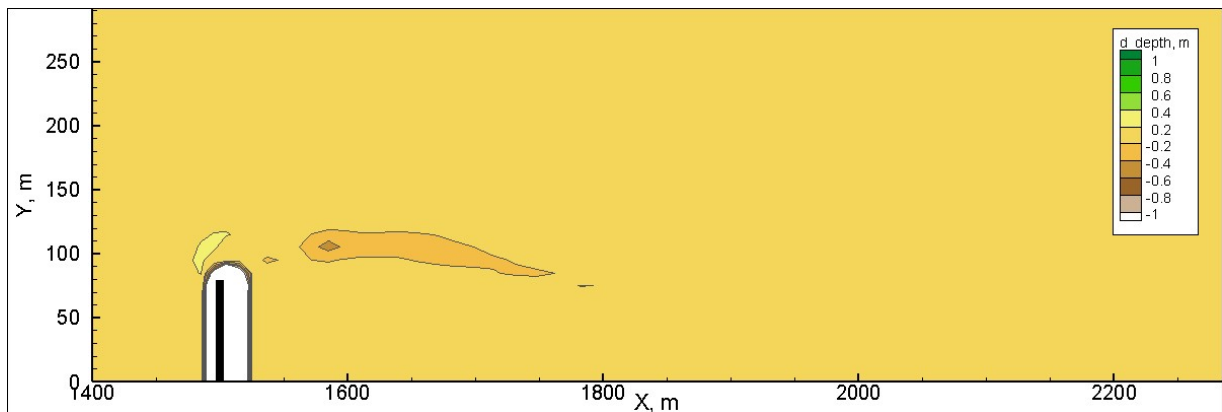


24. ábra



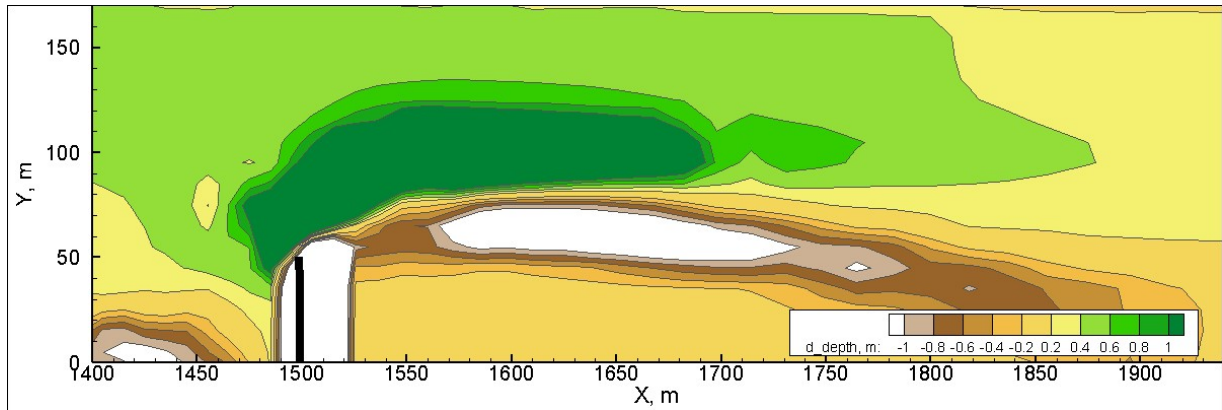
25. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 1000 m³/s, sarkantyúhossz= 25%

Ebben az esetben a duzzasztás hatása elhanyagolható.

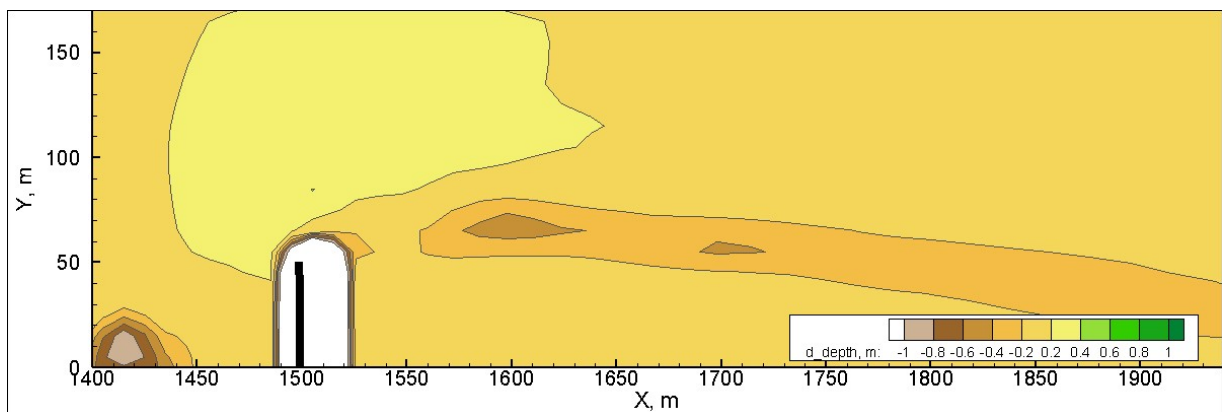


26. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 1000 m³/s, sarkantyúhossz= 25%

200 m széles mederben jelentős duzzasztás figyelhető meg a sarkantyú szelvényében, az alvízen pedig nagy mértékű vízszintcsökkenés



27. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 200 m, vízhozam= 2300 m³/s, sarkantúhossz= 25%

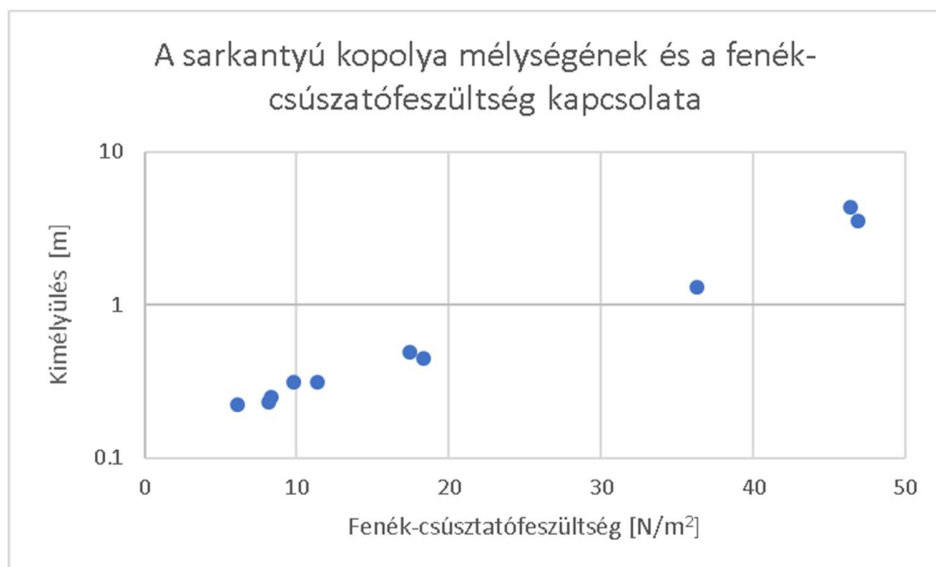


28. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 200 m, vízhozam= 1000 m³/s, sarkantúhossz= 25%

A következő fejezetben az eredmények grafikus kiértékelését végzem el. Az alábbi grafikonon (29. ábra és 30. ábra) a sarkantú csúcsánál kialakuló kopolya mélysége és a fenék-csúsztatófeszültség közötti kapcsolatot ábrázoltam. Egy exponenciális trend látszik a két változó között. Még látványosabb ez a kapcsolat, ha az kimélyülést logaritmikus skálán ábrázoljuk. A fenék-csúsztatófeszültség növelése a kimélyülést exponenciálisan növeli.



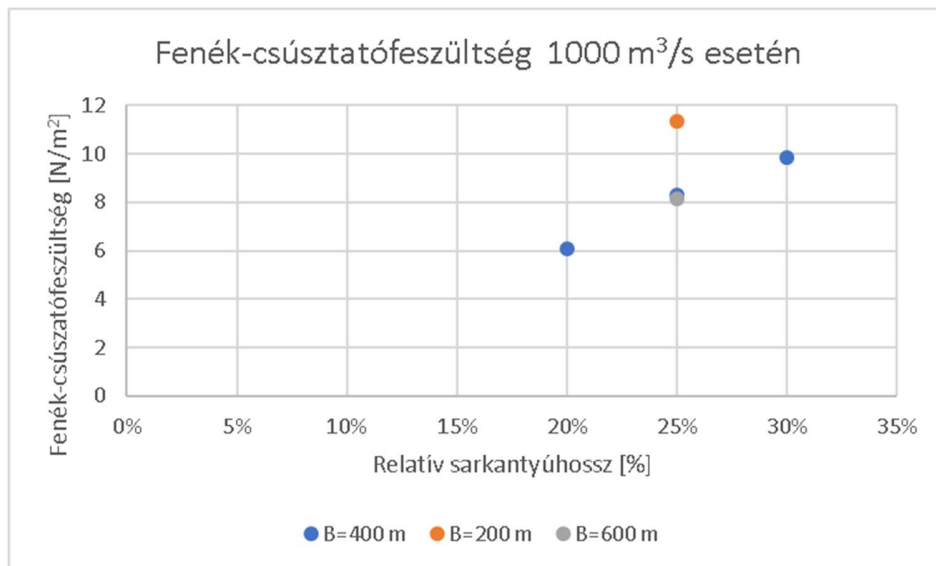
29. ábra Kimélyülés és fenék-csúsztatófeszültség kapcsolata kopolyánál



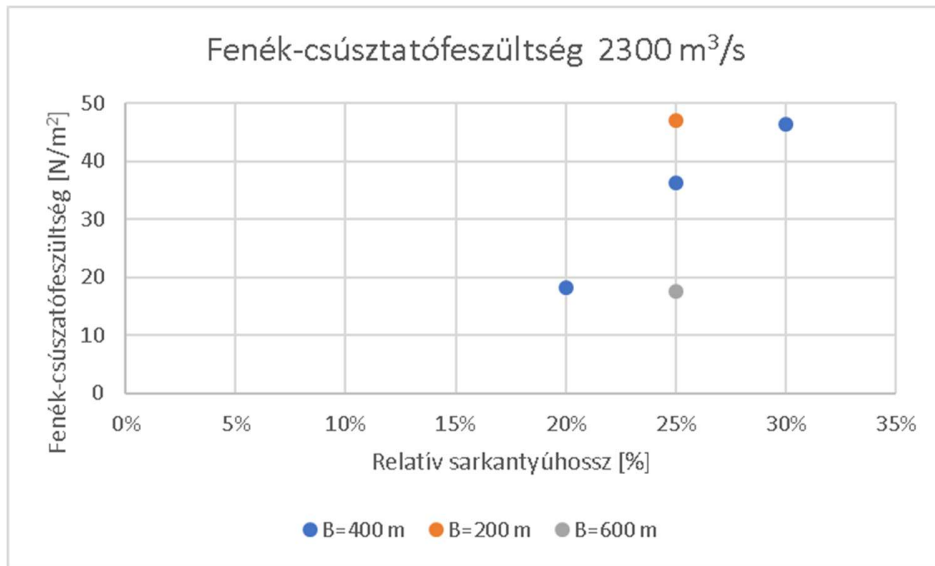
30. ábra Kimélyülés és fenék-csúsztatófeszültség kapcsolata log y tengelyen ábrázolva

Mivel a kimélyülés és a fenék-csúsztatófeszültség között egyértelműen erős a kapcsolat, érdemes megvizsgálni az egyes változók hatását a fenék-csúsztatófeszültség alakulására. A következő grafikonokon a kopolyánál kialakuló fenék-csúsztatófeszültségeket ábrázoltam a relatív sarkantyúhossz szerint. Mind kisvízes, mind középvízes esetben elmondható, hogy szélesebb

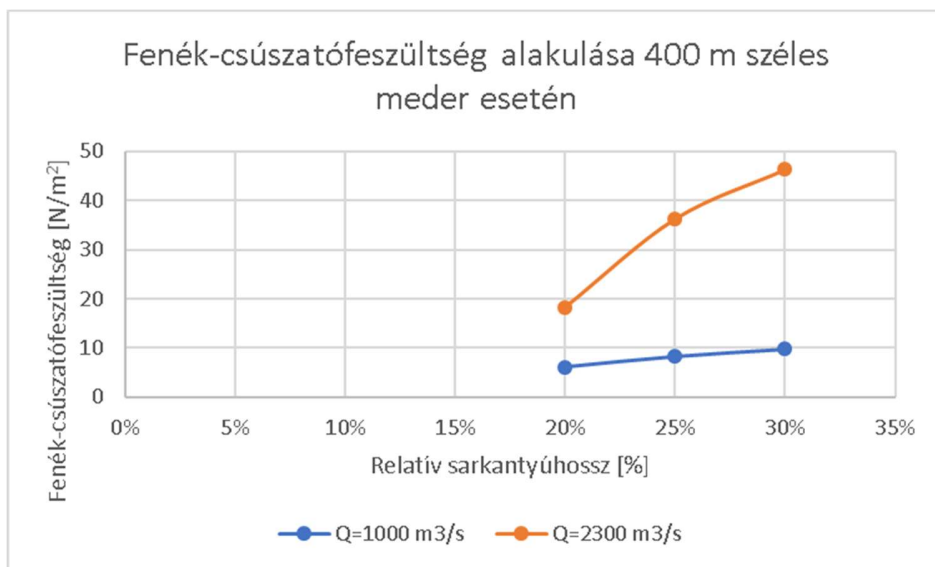
meder esetén, azonos relatív sarkantyúhossz mellett, kisebb fenék-csúsztatófeszültségek alakulnak ki (31. ábra, 32. ábra). Szűkebb meder esetén állandó vízhozam mellett, nagyobb sebességek alakulnak ki, így nem meglepő, hogy megnövekszik a fenék-csúsztatófeszültség értéke. A 33. ábra állandó mederszélesség mellett különböző hosszúságú sarkantyúk hatását mutatja be. Minél hosszabb a sarkantyú annál nagyobb lesz a fenék-csúsztatófeszültség értéke. Az előző gondolatmenetet követve nem meglepő, hogy szűkebb meder esetén nagyobb feszültség értékeket kapunk. Érdekesebb vizsgálni a növekedés arányát. Míg $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ esetén a sarkantyút 80 m-ről 100 m-re növelve a feszültség 1,36 szorosára nő, addig $2300 \text{ m}^3/\text{s}$ esetén azonos feltételekkel 1,98 szoros növekedést figyelhetünk meg. Mindenképpen érdemes lesz nagyvíz esetén is vizsgálni ezeket a paramétereket. Jelen dolgozatban idő hiánya miatt erre sajnos nem került sor.



31. ábra Fenék-csúsztatófeszültség és sarkantyúhossz kapcsolata, vízhozam= $1000 \text{ m}^3/\text{s}$

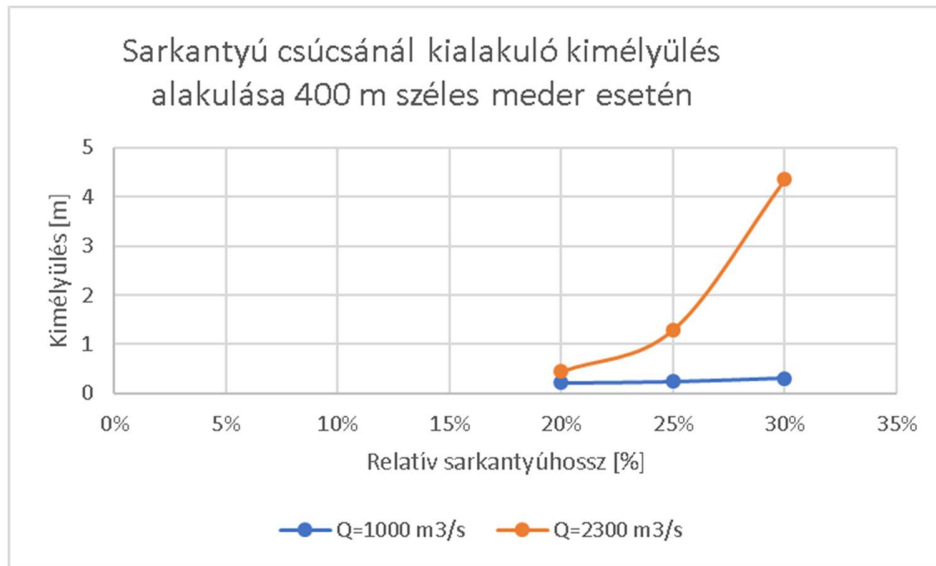


32. ábra Fenék-csúsztatófeszültség és sarkantyúhossz kapcsolata, vízhozam=2300m³/s



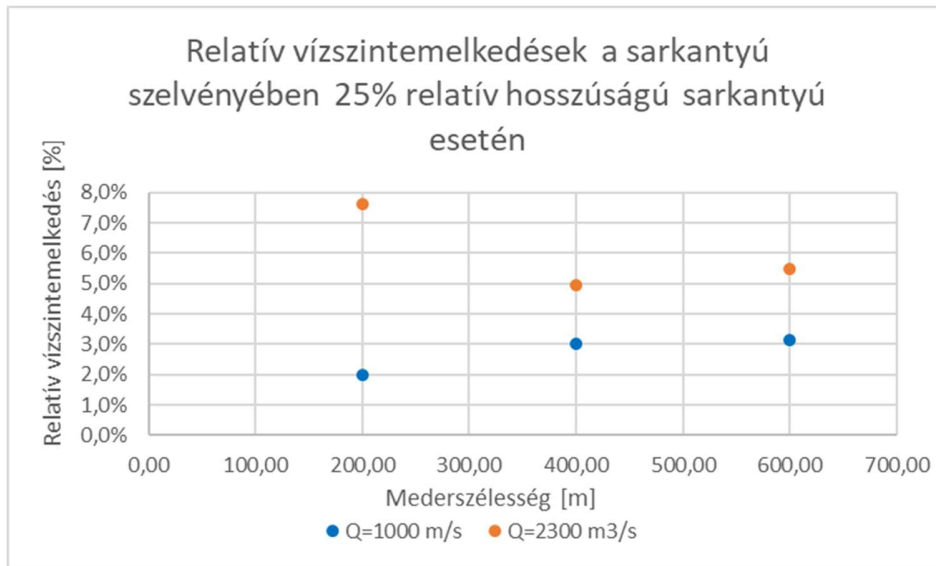
33. ábra Fenék-csúsztatófeszültség és sarkantyúhossz kapcsolata, csatronaszélesség=400m

A 34. ábra megmutatja, hogy nagyobb vízhozamnál és szűkebb medernél nagyobb kimélyülés tapasztalható. Ez összhangban áll az fenék-csúsztatófeszültségre vonatkozó eredményeinkkel. Az ábrán 2300 m³/s vízhozammal és 120 m széles sarkantyúval indított futtatás eredménye kiugróan nagy kimélyülést mutat.

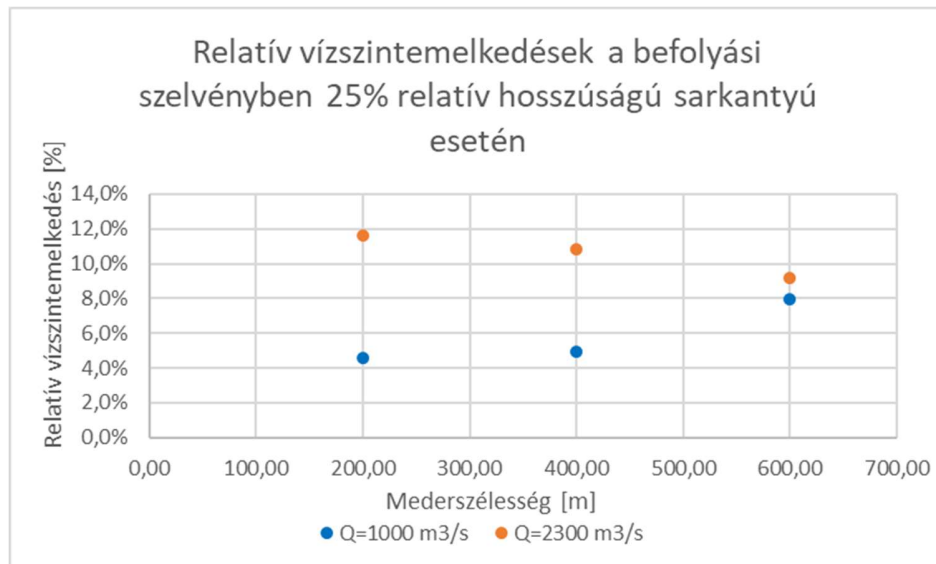


34. ábra Kimélyülés és sarkantyúhossz kapcsolata, csatronaszélesség=400m

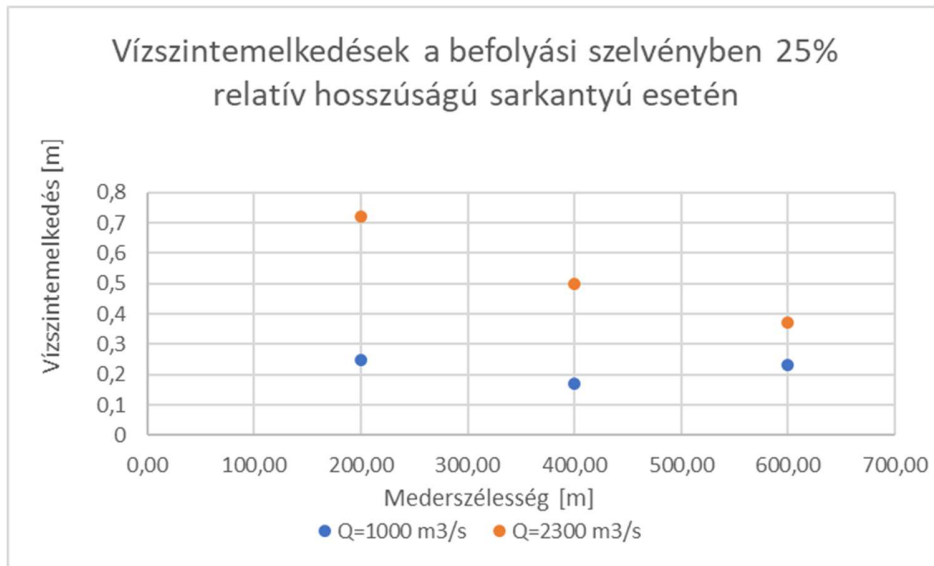
A 34-37. ábrákon a relatív és az abszolút vízszintemelkedést mutatom be különböző szélességű medrekben, állandó relatív sarkantyúhossz esetén. A relatív vízszinteken itt a kifolyási vízszintekhez képest való százalékos eltérést értem. Középvízi vízhozam mellett a szélesebb medrek visszaduzzasztása kisebb. A sarkantyúnál kisvízkor kialakuló visszaduzzasztások csupán 0,1 m körül mozognak. A befolyási szelvény 1500 m-rel a sarkantyú előtt található. A számítási eredmények azt mutatják, hogy itt a visszaduzzasztás kisvíz esetén is elérheti a 0,2 m-t.



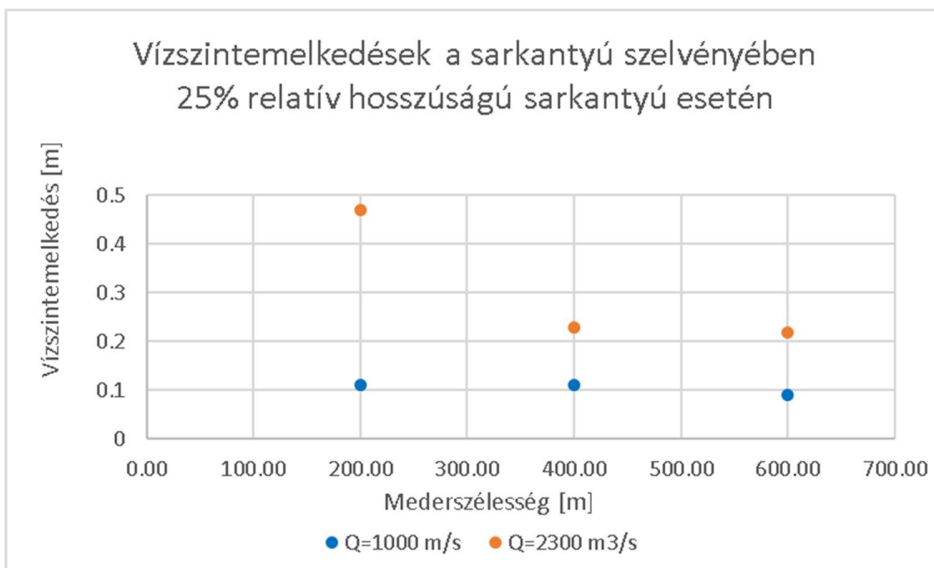
35. ábra Relatív vízszintemelkedés és mederszélesség kapcsolata a sarkantyú szelvényében, sarkantyúhossz=25%



36. ábra Relatív vízszintemelkedés és mederszélesség kapcsolata a befolyási szelvényben, sarkantyúhossz=25%



37. ábra *Vízszintemelkedés és mederszélesség kapcsolata a befolyási szelvényben, sarkantyúhossz=25%*



38. ábra *Vízszintemelkedés és mederszélesség kapcsolata a sarkantyú szelvényében, sarkantyúhossz=25%*

Konklúzió

A TDK dolgozatomban azt vizsgáltam, hogy különböző geometriájú csatornába eltérő hosszúságú sarkantyúk milyen változásokat eredményeznek a csatorna geometriájában és az áramlási képben, különböző vízjárási állapotok esetén. Céloom az volt, hogy trendeket tárjak fel a beavatkozásokat jellemző paraméterek és az általuk eredményezett morfordinamikai állapotjellemzők (vízmélység, fenék-csúsztatófeszültség) között.

Az eredmények alapján mederváltozás szempontjából a kisvízi állapot nem jelentős. (34. ábra) Erős kapcsolatot találtam a fenék-csúsztatófeszültség és a mederkimélyülés között (30. ábra). Nagyvízes vizsgálati eredményeim még nincsenek, így az egyes kialakítások jellemzése nem lehet teljeskörű. Hajózás szempontjából a kisvízi állapot a legfontosabb, ezért érdemes lenne megvizsgálni, hogy a közép és nagyvizek hatására megváltozott mederben milyen vízmélységgel jelenne meg a kisvíz. Fontos megemlíteni, hogy a vizsgált modellváltozatokban nem adtam meg a befolyási szelvényben hordalékhozamot, ami jelentősen befolyásolhatja a kapott eredményeket. A mederanyagot jelen vizsgálataimban egy keverékkel jellemeztem és egy mederesést vettem fel minden változatnál. Azonban mivel ezen paraméterek a valóságban inkább egy adott tartományban veszik fel jellegzetes értékeiket (még a vizsgált Duna szakaszon belül is), ezért azok érzékenységvizsgálata mindenképp szükséges a továbbiakban. Továbbá, a futtatási idő optimalizálása miatt vizsgálataimban csak a Wu hordalékmodellt alkalmaztam. A továbbiakban indokoltnak gondolom más, pl. a nagyobb számítási igényű Wilcock and Crowe modell használatát is.

Mivel a TDK dolgozatomban bemutatott modellváltozatok nem fedik le a vizsgálandó paraméterek reális skáláját, ezért az eredményeim csak további vizsgálatokkal kiegészítve nyernek valódi értelmet. Azt azonban sikerült prezentálnom, hogy a bemutatott vizsgálatok segítségével olyan jellegzetes kapcsolatok tárhatók fel, amik jelentősen hozzájárulhatnak sarkantyúk tervezési és értékelési munkáihoz.

Ábrajegyzék

| | |
|--|--------|
| 1. ábra Jellegzetes inflexiós szelvények [1] | - 4 - |
| 2. ábra Leonardo da Vinci rajza az olaszországi Arno folyóról(XVI. század) [7]..... | - 6 - |
| 3. ábra Google Earth műholdas kép a gönyűi Duna-szakasz sarkantyújáról..... | - 7 - |
| 4. ábra Braun-görbe | - 9 - |
| 5. ábra Koch-görbe..... | - 9 - |
| 6. ábra A mederszűkítés hatására kialakuló vízszintesökkenés számítása..... | - 11 - |
| 7. ábra - Kitétségi magasság definiálása | - 14 - |
| 8. ábra Szelvény menti sebességeloszlások a 2300 m ³ /s-os vízhozammal futtatott, 400 m széles modellből 50 m hosszú sarkantyú beépítésével | - 17 - |
| 9. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 600 m, vízhozam= 2300 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 18 - |
| 10. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 600 m, vízhozam= 1000 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 18 - |
| 11. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m ³ /s, sarkantyúhossz= 30% | - 19 - |
| 12. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 19 - |
| 13. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m ³ /s, sarkantyúhossz= 20% | - 20 - |
| 14. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 1000 m ³ /s, sarkantyúhossz= 30% | - 20 - |
| 15. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 1000 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 21 - |
| 16. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 1000 m ³ /s, sarkantyúhossz= 20% | - 21 - |
| 17. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 200 m, vízhozam= 2300 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 22 - |
| 18. ábra Mederváltozás mező - csatornaszélesség= 200 m, vízhozam= 1000 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 22 - |
| 19. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 600 m, vízhozam= 2300 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 23 - |
| 20. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 600 m, vízhozam= 1000 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 23 - |
| 21. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m ³ /s, sarkantyúhossz= 30% | - 24 - |
| 22. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 24 - |
| 23. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 2300 m ³ /s, sarkantyúhossz= 20% | - 25 - |
| 24. ábra..... | - 25 - |
| 25. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 1000 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 26 - |

| | |
|--|--------|
| 26. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 400 m, vízhozam= 1000 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 26 - |
| 27. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 200 m, vízhozam= 2300 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 27 - |
| 28. ábra Vízmélységváltozás mező - csatornaszélesség= 200 m, vízhozam= 1000 m ³ /s, sarkantyúhossz= 25% | - 27 - |
| 29. ábra Kimélyülés és fenék-csúsztatófeszültség kapcsolata kopolyánál..... | - 28 - |
| 30. ábra Kimélyülés és fenék-csúsztatófeszültség kapcsolata log y tengelyen ábrázolva | - 28 - |
| 31. ábra Fenék-csúsztatófeszültség és sarkantyúhossz kapcsolata, vízhozam=1000m ³ /s..... | - 29 - |
| 32. ábra Fenék-csúsztatófeszültség és sarkantyúhossz kapcsolata, vízhozam=2300m ³ /s..... | - 30 - |
| 33. ábra Fenék-csúsztatófeszültség és sarkantyúhossz kapcsolata, csatornaszélesség=400m..... | - 30 - |
| 34. ábra Kimélyülés és sarkantyúhossz kapcsolata, csatornaszélesség=400m | - 31 - |
| 35. ábra Relatív vízszintemelkedés és mederszélesség kapcsolata a sarkantyú szelvényében, sarkantyúhossz=25%..... | - 32 - |
| 36. ábra Relatív vízszintemelkedés és mederszélesség kapcsolata a befolyási szelvényben, sarkantyúhossz=25%..... | - 32 - |
| 37. ábra Vízszintemelkedés és mederszélesség kapcsolata a befolyási szelvényben, sarkantyúhossz=25% | - 33 - |
| 38. ábra Vízszintemelkedés és mederszélesség kapcsolata a sarkantyú szelvényében, sarkantyúhossz=25% | - 33 - |

Irodalomjegyzék

- [1] S. János, „<http://www.ovf.hu/hu/hirek-ovf/vizkarkonyv>,” 2014. [Online].
- [2] S. Dr.Alzbeta, „A Duna szabályozása,” *Vízügyi Közlemények*, pp. 461-479, 2001.
- [3] B. Hajós, „A víz és az ember kapcsolata,” *Vízügyi Közlemények*, pp. 9-39, 2001.
- [4] „KöViM rendelet,” 2002. [Online]. Available: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A0200017.KOV&fbclid=IwAR0ewTzE0Kt2fwbPBaUmhKznurvypr4ZdhOp6bsyrE-omUoCHbLtRbHASoo>.
- [5] K. S. Solymár, „Hagyományos és innovatív folyószabályozási beavatkozások szimulációs vizsgálata a Dunaföldvári gázló környezetében,” MSc Diplomamunka, Budapest, 2019.
- [6] E. Mistéth, „A magyarországi Duna-szakasz,” *Hidrológiai Közöny*, pp. 73. Évf., 1. szám, 1993..
- [7] M. & B. M. & M. G. Coli, „Florence and its floods: anatomy of an hazard,” in *18th International Conference on soil mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2013.
- [8] www.vit.bme.hu, „Szabad felszínű, permanens, fokozatosan változó vízmozgások felszingörbérének vizsgálata - Hidraulika II. - Dr. Krámer Tamás,” 2018.
- [9] www.vit.bme.hu, „Bukók hidraulikája - Hidraulika II. - Dr. Krámer Tamás,” Budapest, 2018.
- [10] www.vit.bme.hu, „Zsilipek, átereszek hidraulikája - Hidraulika II. - Dr. Krámer Tamás,” 2018.
- [11] J. W. Jordan, in *Upper Mississippi River Restoration Environmental Management Program Environmental Design Handbook - Chapter 7, River Training Structures and Secondary Channel Modifications*, 2012.
- [12] L. Dr. Rákoczi, "A Duna 1800-1812 fkm közötti szakaszán várható mederváltozások becslése," VIZDOK Nyomda, Vízgazdálkodási Tudományos Kutatóközpont, Hidraulikai Intézet, Budapest, 1993.
- [13] B. Máté, „A Duna Mederváltozása Nagybajcs és Gönyű között,” in *TDK Konferencia, BME Építőmérnöki Kar*, Budapest, 2010.
- [14] M. G. M. L. H. H. Michael Tritthart, „Numerical Study of Morphodynamics and Ecological Parameters Following Alternative Groyne Layouts at the Danube River,” in *11th International Conference on Hydrosience & Engineering*, Hamburg, 2014.
- [15] M. Yossef, „The effect of groynes on rivers: literature review,” Delft Cluster, 2002.
- [16] Ö. Dr.Starosolszky, *Vízépítési hidraulika*, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1970.

- [17] J. Juhász, „A Duna-sztráda,” *Hidrológiai Közlöny*, pp. 244-246, 2011.
- [18] K. K. J. W. István Kontúr, *Hidrológiai számítások*, Linograf Kft.: Gödöllő, 2003.
- [19] C. M. T. T. Ashley Rogers, „Measuring the geometry of a developing scour hole in clear-water,” *International Journal of Sediment Research*, 2019.
- [20] E. D. Nagy, T. Krámer és G. T. Török, „Hazard of embankment erosion due to flooding on the M1 motorway, NW Hungary,” Budapest, 2018.
- [21] W. S. J. Uijttewaal, „Effects of Groyne Layout on the Flow in Groyne Fields: Laboratory Experiments,” *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 782-791, 2005.
- [22] L. Dr. Rákoczi, „A Duna-meder sorsa Szap és Szob között,” *Vízügyi Közlemények*, pp. 268-308, 2000.
- [23] G. Timár, „Az alluviális folyók alaktípusai és a típusok kialakulásának feltételei,” *Hidrológiai Közlöny*, %1. kötet85, pp. 1-10, 2005.