



Komplex energiatörő műtárgy 3D hidrodinamikai modellezése

Schrott Márton

Budapest, 2024 November

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék



Konzulens:

Dr Fleit Gábor (Tudományos Munkatárs, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi
Egyetem)

Kivonat

A vízmérnöki gyakorlatban a numerikus áramlásmodelleket különféle célokra alkalmazzák. Az egyszerű, egy dimenziós (1D) modelleket évtizedek óta használják a vízszintek előrejelzésére. A technológia fejlődésével ezek a modellek folyamatosan futtathatók, ami az online előrejelző rendszerek kialakulásához is vezetett. Az összetettebb geometriájú árterületek és folyószakaszok esetében kétdimenziós (2D) modelleket alkalmaznak. Háromdimenziós (3D) modellek akár a hidraulikai szerkezetek környezetében lévő összetettebb áramlásokat is képesek leírni.

A 3D modellek ipari alkalmazása a vízmérnöki területen még nem mindennapos, elsősorban azok nagy számítási igénye miatt. Azonban, ahogy egyre több maggal rendelkező és nagyobb számítási kapacitású processzorok válnak elérhetővé, lehetőség nyílik a számítógépes modellek felépítésére a hagyományos fizikai méretarányos modellek mellett vagy akár azok helyett. Ezek részletesebb információkat kínálhatnak, figyelembe véve a fizikai modellek műszerezési korlátait. Továbbá, a fizikai modellek bizonytalanságokat hordozhatnak a léptékhatások miatt, és általában erőforrás-igényesebbek is (munkaerő, anyagok stb.).

Ez a munka egy erőmű melegvízcsatornájában található energiatörő szerkezet 3D modellezését mutatja be. A geometriai modellt az eredeti tervrajzok alapján állítottam össze. A hidrodinamikai modellezést a nyílt forráskódú REEF3D CFD modellel végeztem. Áttekintést adok a releváns fizikai és matematikai modellekről, különös tekintettel a szabad felszín kezelésére és a turbulencia modellezésére. Érzékenységvizsgálatot végeztem numerikus és fizikai paraméterekre vonatkozóan. A modellt terepi mérésekkel igazoltam. A modellt ezután a szerkezet hidrodinamikai viselkedésének értékelésére, megértésére használom, különböző üzemállapotok esetére.

Abstract

In the field of hydraulic engineering, numerical models are employed for a variety of purposes. Simple one-dimensional (1D) models have been utilized for decades to predict water levels. With the advancement of technology, these models can now be run continuously, resulting in the development of online prediction systems. For floodplains and river reaches with more intricate bathymetry, two-dimensional (2D) models are used. Three-dimensional (3D) models can even describe complex flows in the vicinity of hydraulic structures.

The use of 3D models in a commercial context is not yet widespread, largely due to the high computational demands associated with them. However, as processors with an increasing number of cores and greater computational capabilities become available, it becomes possible to construct computer models in addition to or in replacement of traditional physical scale models. This offers the potential for more detailed information, given the instrumental limitations of physical models. Furthermore, physical models are subject to uncertainty due to scaling effects and usually more resource intensive (laboratory, materials etc.).

This work presents the 3D analysis of an energy dissipator structure of powerplant outflow channel. The geometrical model is constructed based on the original blueprints. The hydrodynamic modeling was done using the open-source CFD model, REEF3D. The relevant physical and mathematical models are reviewed, with special focus on free surface treatment and turbulence modeling. A sensitivity analysis was conducted for numerical and physical parameters. The model was validated using field measurements. The validated model is then used to assess the hydrodynamic behaviour of the structure under different operating conditions.

Tartalom

Kivonat.....	2
Abstract.....	3
Tartalom.....	4
Ábrajegyzék	5
Jelölésjegyzék	6
1 Bevezetés.....	7
2 Alkalmazott módszerek	10
2.1 A numerikus modell	10
2.1.1 Alapegyenletek	10
2.1.2 Egyenletek megoldásai	11
2.1.3 Szabadszél kezelése.....	12
2.1.4 Turbulencia modellezése.....	13
2.2 Modell geometria	14
2.2.1 Hálógenerálás	16
2.3 Nagy Léptékű Részecskekép Sebességmérés (LSPIV)	18
2.3.1 Előfeldolgozás	19
2.3.2 Elmozdulás számítások.....	20
2.3.3 Utófeldolgozás.....	21
3 Eredmények.....	22
3.2 Validáció	25
3.3 Hidraulikai viselkedés különböző alvízi körülmények között.....	27
4 Összefoglalás	33
Mellékletek	37

Ábrajegyzék

1. ábra Energiatörő a hűtővízcsatornán.....	8
2. ábra VoF és LSM módszerek összevetése.....	9
3. ábra 3D geometria a tervrajzok alaján, AutoCAD segítségével készítve	15
4. ábra GCIBM a hálógenerálás alkalmazásánál	16
5. ábra Áttekintés a műtárgy leképezéséről különböző rácsfelbontások esetén	18
6. ábra Közeli kép a műtárgy leképezéséről különböző rácsfelbontások esetén	18
7. ábra Kiragadott képkocka az eredeti videóból, és annak feldolgozott verziója:.....	19
8. ábra Kezdeti terület, keresési terület, kezdeti rácspontok két egymást követő képkockán	21
9. ábra Kétdimenziós Gauss-függvény használata a pixelméretnél kisebb elmozdulás meghatározására.....	21
10. ábra Rácsháló konvergencia ellenőrzése a modellezett és mért vízszinttel a melegvízcsatornán	23
11. ábra A sebességnagyságok összehasonlítása négy rácsfelbontáson: középső hossz-szelvény.	24
12. ábra A TKE értékek összehasonlítása négy rácsfelbontáson: középső hossz-szelvény.	24
13. ábra A modell eredményeinek összehasonlítása a helyszíni drónfelvétellel.....	25
14. ábra A modell szerinti vízfelszín magasságok.	26
15. ábra Vízszintes sebességkomponensek divergenciája a vízfelületeken: a) CFD modell előrejelzései vs. b) LSPIV elemzés. Az áramlás felülről lefelé halad.....	27
16. ábra A sebességnagyságok összehasonlítása három forgatókönyv szerint: hosszmetset a középső szakasról a) 85.0 mB.f.; b) 87.8 m B.f.; c) 90.5 m B.f.....	29
17. ábra A turbulens kinetikus energia összehasonlítása három forgatókönyvben: hosszmetset a középső részről a) 85.0 mB.f.; b) 87.8 m B.f.; c) 90.5 m B.f.....	29
18. ábra A validált modell keresztmetszetei a b) forgatókönyv esetében	30
19. ábra Keresztmetszeti sebességnagyságprofilok az energiaeosztó után (A-A) és a folyásirányban (B-B).	31
20. ábra Keresztmetszeti turbulens kinetikus energiaprofilok az energiaeosztó után (A-A) és a folyásirányban (B-B).	32
21. ábra Sebességnagyságok egy LES modell alapján.	34

Jelölésjegyzék

U	Sebesség (<i>Velocity</i>)
x, y, z	Descartes-féle koordináták (<i>Cartesian coordinates</i>)
i, j, k	Vektorok az x , y , és z tengelyek mentén (<i>Vectors along the x, y, and z axes</i>)
t	Idő (<i>Time</i>)
τ	Szabadszín inicializálásának időlépés (<i>Time for reinitialization of free surface</i>)
P	Nyomás (<i>Pressure</i>)
ρ	Sűrűség (<i>Density</i>)
ν	Kinematikai viszkozitás (<i>Kinematic viscosity</i>)
ν_t	Örvény-viszkozitás (<i>Eddy viscosity</i>)
g	Nehézségi gyorsulás (<i>Acceleration due to gravity</i>)
Φ	Szintvonalfüggvény (<i>Level set function</i>)
$H(\Phi)$	Lépcsőfüggvény (<i>Heaviside function</i>)
2ϵ	Átmeneti réteg vastagsága (<i>Transition zone thickness</i>)
$S(\Phi)$	Sima előjeles távolságfüggvény (<i>Smooth signed distance function</i>)
Γ	Diffúzió együttható (<i>Diffusion coefficient</i>)
k	Turbulens kinetikus energia (<i>Turbulent kinetic energy</i>)
ω	Fajlagos turbulens disszipáció (<i>Specific turbulent dissipation</i>)
$S_{i,j}$	Alakváltozás tenzor (<i>Strain tensor</i>)
MX, MY	Eredeti terület mérete (<i>Sizes of the initial area</i>)
a_{xy}, b_{xy}	Szürkeárnyalat intenzitása (<i>Grayscale intensity</i>)
R_{ab}	Keresztkorreláció (<i>Cross-correlation</i>)

1 Bevezetés

A hűtővíz a legtöbb erőmű fontos része. Magyarországon az egyik legjelentősebb a paksi atomerőmű, amely a Duna vizét használja. Normál üzemi körülmények között $100 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozamra van szükség. Ezzel, az átlagos vízhozamot tekintve, Magyarország nyolcadik legnagyobb folyója lehetne, a Hármas-Körös mellett, másfelől közelítve ez a Duna átlagos vízhozamának mintegy öt százalékát teszi ki (Vízügyi Főigazgatóság, 2022). Ez a jelentős mennyiségű melegvíz a hűtővízcsatornán keresztül folyik a jobb parton, és az atomerőműtől délre torkollik a Dunába. Ez több olyan kérdést vet fel, amelyek további vizsgálatot igényelnek. Először is, a visszavezetett víz és a befogadó hőmérséklet-különbségét a magyar atomenergetikai rendelet szabályozza (15/2001. (VI. 6.) KöM rendelet). Az alacsony vízállású időszakokban a meleg víz nem tud kellőképpen elkeveredni, és meghaladhatja az előírt határértéket. Másodszor, a víz magas energiatartalma miatt az alvízen fokozott hordalékmozgás és medersüllyedés következik be. Ezt enyhíti a hűtővízcsatornán épített energiatörő műtárgy (1. ábra). E tanulmány célja az ebben a bonyolult szerkezetben kialakuló áramlások összetettségének bemutatása.

Az energiatörő műtárgy egy 40 m széles $\times$ 80 m hosszú vasbetonszerkezet, amely összetett geometriával rendelkezik. Hagyományos süllyesztett utófeneket kombinál falakkal és keresztgerendákkal. A szerkezet geometriája olyan összetett áramlásokat hoz létre, amelyek nem írhatók le az elterjedt empirikus egyenletekkel. Ezekkel a hidraulikai ugrás helyzete és az áramlás átlagos paraméterei közelíthetők. Az előforduló jelenségek pontosabb leírására fizikai modelleket lehetne alkalmazni. Ezek lehetővé tennék a különböző üzemállapotok szimulációját, a sebesség és a vízmélység mérését több ponton. Ez a megközelítés azonban építőanyagokat, drága mérőeszközöket és a modell építéséhez megfelelő helyszínt igényel. Ezenkívül a léptékhatások terhelhetik az eredményeket, és nem biztos, hogy akármelyik pont mérése megvalósítható. Ez rávilágít arra, hogy potenciálisan szükség lehet 3D modellekre, melyek számos technikát és közelítést felölelnek.



1. ábra Energiatörő a hűtővízesatornán

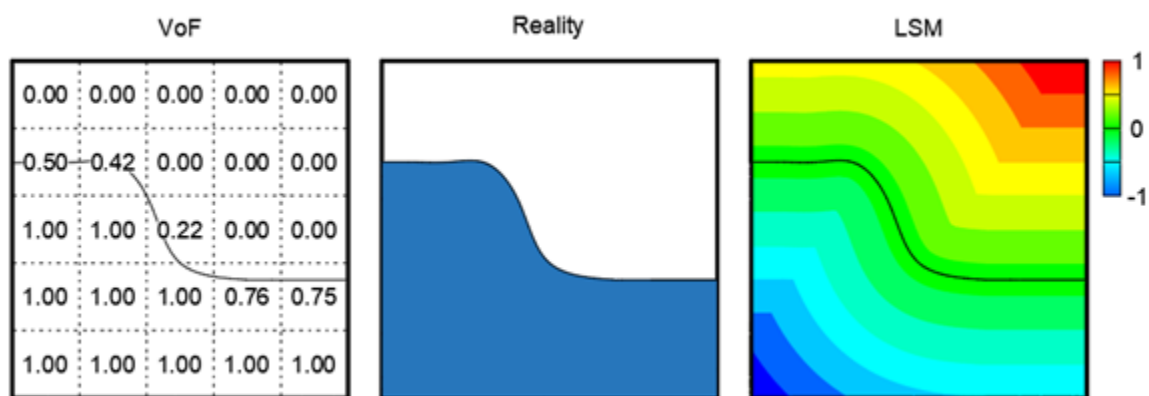
Az egyik legegyszerűbb 3D modellezési módszer a merev fedő (Rigid-Lid) megközelítés. Feltételezi, hogy a vízfelület állandó a szimulált időszak alatt. Ezt egy síkkal vagy egy összetettebb felülettel lehet ábrázolni. A vizsgált műtárgy esetében kihívást jelent ezt a módszert alkalmazni, mivel az alvíz felőli oldalon a vízszint esetenként alacsonyabb, mint a csatorna medre, és a vízfelület pontos alakját nehéz megállapítani. Egy alternatív megközelítés a szigma-transzformációs módszer, amely lehetővé teszi a vízmélység dinamikus módosítását a szimuláció során. Ez a módszer azonban nem képes pontosan leírni azokat az eseteket, amikor a víz eléri a keresztgerendákat és nyomás alá kerül. Másodszor, nem képes egy adott ponton két vagy több vízfelszín leírására, ami kihívást jelent, amikor a víz átfolyik a keresztgerendák felett.

Ezzel szemben a legtöbb korszerű szoftver a Volume of Fluid: (VoF) vagy a Level Set Method (LSM) módszereket alkalmazza, mivel ezek képesek a fent említett scenáriók kezelésére. A VoF módszert gyakrabban alkalmazzák merev rácsoknál, mivel az egyes cellákban jelen lévő folyadék arányát számítja ki. Ha egy cella folyadékkal van tele, akkor 1 értéket kap, míg a folyadék nélküli cellákhoz 0 értéket rendelünk. Minden cella a $[0,0, 1,0]$ intervallumon belül helyezkedik el, és az értékét a szabadfelszínből származtatjuk, amint azt a 2. ábra szemlélteti.

Ezt a módszert számos kereskedelmi modellező szoftver, köztük a FLOW-3D HYRO alkalmazza.

Az másik módszer a LSM, amely egy $\Phi(\vec{x}, t)$ függvényt generál, amely a szabadfelszínen, és csak ott nulla. A függvény előjele határozza meg, hogy az adott pont az 1. vagy a 2. fázisba tartozik. Ezenkívül minden pontban a szabadfelszíntől való legrövidebb távolságot veszi fel értékének. Ezt a módszert többek között a REEF3D is használja. Mivel a tanulmány során REEF3D szoftvert lett alkalmazva az energiaeosztó modellezéséhez, így ez a módszer kerül részletesebben kifejtésre a későbbiekben.

A szabadfelszín számításán kívül a turbulencia és az időbeliség kezelése is jelentős hatással van a végeredményre. A tanulmány a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes-egyenletekre (RANS) épül, bár ez nem alkalmas instacioner áramlások esetén. Az állandó beáramlás ellenére az örvények és a különböző áramlások idővel változnak, ami más megközelítést, például nagy örvényszimulációt (Large Eddy Simulation: LES) tehet szükségessé.



2. ábra VoF és LSM módszerek összevetése

Az első lépés a rácsháló konvergencia vizsgálat, amelynek célja egy olyan kellően finom felbontású háló meghatározása, amely lehetővé teszi a szimulációs eredmények konvergenciáját, miközben a szükséges számítási kapacitás elérhető marad. Ezt követően számos megközelítést alkalmaztunk az eredmények igazolására. Egy viszonylag egyszerű teszt a hűtővízcsatorna vízszintje, vagy a különböző paraméterek szerint színezett hosszmetsetek szubjektív összehasonlítása. Továbbá a modellezett divergencia összehasonlítása a Nagy Léptékű Részecskekép Sebességmérés (Large-Scale Particle Image Velocimetry: LSPIV) egy videóból számított divergenciával.

A tanulmány célja, hogy a validált modellt felhasználva összehasonlítsuk a szerkezet működését különböző üzemi körülmények között.

2 Alkalmazott módszerek

Ez a fejezet a numerikus-modell megalkotásához és igazolásához használt módszereket mutatja be. A szerkezet számítógépes tervezésétől kezdve a szimulációkhoz használt modellező szoftvereken keresztül egészen az LSPIV-vel történő validálásig részletesen ismertetjük a folyamatot.

2.1 A numerikus modell

E tanulmányban az energiatörő szimulációja a cél, egy korszerű szoftverrel. A következő fejezetek áttekintést nyújtanak a használt REEF3D szoftverbe beépített alapelvekről és numerikus technikákról.

2.1.1 Alapegyenletek

A CFD modellezés a Navier-Stokes-egyenleteken alapul, amelyek egy nem összenyomható folyadék dinamikus mozgását írják le kapcsolt parciális differenciálegyenletekkel. Az egyenletek a tömeg-, és az inerciamegmaradáson, valamint a folyadék összenyomhatatlanságának feltételezésén alapulnak.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

A gyakorlatban az analitikus megoldások helyett numerikus megoldásokat alkalmaznak, mivel az utóbbiaknak jelentősen alacsonyabb a számítási igényük. Az egyik ilyen egyszerűsített megoldás a RANS modell, amely a sebesség- és nyomásváltozókat egy átlagos és egy fluktuáló komponensre bontja (Reynolds, 1985):

$$U_i = \bar{U}_i + U'_i, \quad P = \bar{P} + P' \quad (2.2)$$

Az átlagolt sebesség komponens közvetlenül az egyenletekben használjuk; a fluktuáló komponens azonban beépül az örvényviszkózitásba.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + g_i \quad (2.3)$$

Ezen egyenletek megoldásához szükség van a nyomástényezőre is; mivel azonban a nyomás advekcója nem meghatározott, nem lehet közvetlenül meghatározni a következő rácspontban. Ennek a problémának a kiküszöbölésére ebben a tanulmányban a REEF3D által kínált opciók közül a projekciós módszert (Projection Method: PJM) használtuk.

2.1.2 Egyenletek megoldásai

A PJM az irányadó egyenletekben a nyomás kérdését időben explicit módon kezeli (Chorin, 1968). A sebességmezők kiszámítása az előző lépés alapján történik, egy közbenső U_i^* sebességmezőt használva, amelyet tranziens RANS-egyenletekkel számolunk.

$$\frac{\partial(U^* - U_i^n)}{\partial t} + U_j^n \frac{\partial U_i^n}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu(\Phi^n) \left(\frac{\partial U_i^n}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j^n}{\partial x_i} \right) \right] + g_i \quad (2.4)$$

Ez a U_i^* nem elégíti ki a folytonossági egyenletet, ami egy második lépést tesz szükségessé. Ez a projekció, ahol a következő időlépésben a sebességet a következő egyenletben szereplő nyomás segítségével számoljuk ki:

$$\frac{\partial(U_i^{n+1} - U_i^*)}{\partial t} + \frac{1}{\rho(\Phi^n)} \frac{\partial P^{n+1}}{\partial x_i} = 0 \quad (2.5)$$

A 2.5 egyenletben P^{n+1} egy ismeretlen mennyiség. Ahhoz, hogy megkapjuk, a folytonossági egyenletből levezetett $U_i^{n+1} = 0$, feltételt kell alkalmazni, ami a következő Poisson-egyenlethez vezet:

$$\frac{\partial(U_i^{n+1} - U_i^*)}{\partial t} + \frac{1}{\rho(\Phi^n)} \frac{\partial P^{n+1}}{\partial x_i} = 0 \quad (2.6)$$

A Poisson-egyenlet megoldására számos közvetlen vagy iteratív megközelítés alkalmazható. Az utóbbi módszer az alacsonyabb számítási igénye miatt előnyösebb, ezért szélesebb körben alkalmazott megközelítés. Ezek a módszerek aszerint csoportosíthatók, hogy Newton típusú vagy globális megoldók. Ebben a tanulmányban minden modellt globális iteratív megoldóval futtattunk, nevezetesen a Bi-Conjugate Gradient Stabilized (BiCGStab) módszerrel (van der Vorst, 1992), ami a REEF3D-ben az alapértelmezett.

2.1.3 Szabadszín kezelése

A vízépítés területén a problémák többsége többfázisúnak minősíthető. Nyílt csatornás áramlások esetében a víz és a levegő mozgását egyaránt figyelembe kell venni. Az ebben a tanulmányban alkalmazott REEF3D szoftver az LSM-mel működik (Osher & Fedkiw, 2001). A program $\phi(\vec{x}, t)$ szintvonalfüggvényt használ. Ez a függvény csak a két fázis közötti határon veszi fel a nulla értéket. Minden más ponton a szabad felülettől mért legrövidebb távolságot jelöli, előjellel kísérvé. Az előjel jelzi, hogy az adott pont melyik fázishoz tartozik:

$$\phi(\vec{x}, t) = \begin{cases} > 0 & \text{if } x \in \text{phase 1} \\ = 0 & \text{if } x \in \Gamma \\ < 0 & \text{if } x \in \text{phase 2} \end{cases} \quad 2.7$$

A szimuláció során a Γ mozgása a szabadszínnel egyezően történik. Ez a következő egyenlet segítségével írható le:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + U_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = 0 \quad 2.8$$

Az elegyedhetetlenség és az összenyomhatatlanság feltételezése (2.5. egyenlet) a paraméterértékek hirtelen változását eredményezi, ami viszont numerikus stabilitási problémákat okoz a szabad felület közelében. E probléma megkerülése érdekében a szoftver egy változó ϵ vastagságú átmeneti zónát tartalmaz, amely független a rácshálótól, és a szabad felület mindkét oldalán állandó marad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad 2.9$$

$$\begin{aligned} \rho(\Phi) &= \rho_1 H(\Phi) + \rho_2 (1 - H(\Phi)), \\ v(\Phi) &= v_1 H(\Phi) + v_2 (1 - H(\Phi)) \end{aligned} \quad 2.10$$

$$H(\phi) = \begin{cases} 0 & \text{if } \Phi > \epsilon \\ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Phi}{\epsilon} + \frac{1}{\pi} \sin \left(\frac{\pi \Phi}{\epsilon} \right) \right) & \text{if } |\Phi| \leq \epsilon \\ 0 & \text{if } \Phi < -\epsilon \end{cases} \quad 2.11$$

Ahogy a szabad felület mozog, a Φ értékei már nem a pontoktól mért legrövidebb távolságot jelentik. Ennek a problémának a megoldásához a függvényt egy adott idő után újra kell inicializálni. A rendelkezésre álló megközelítések közül a REEF3D parciális differenciálegyenleteket (PDE-k) alkalmaz (Peng et al., 1999).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} + S(\Phi) \left(\left| \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right| - 1 \right) = 0, \quad 2.12$$

ahol $S(\Phi)$ a előjeles távolságfüggvény:

$$S(\Phi) = \frac{\Phi}{\sqrt{\Phi^2 + \left| \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right|^2 (\Delta x)^2}}. \quad 2.13$$

A 2.12. egyenletet alkalmazzuk az előjeles távolságok visszaállítására, miután az állandósult állapotot elértük. A 2.13. egyenlet ezután a szabad felülethez újra nullát rendel, a többi pontot pedig a 2.7. egyenlet szerint rendeljük újra.

2.1.4 Turbulencia modellezése

Csak az időátlagolt sebességek modellezése nem elegendő az hordalékszállítás és a különböző szerkezetek áramlásra gyakorolt hatásának pontos leírásához. Ezért elengedhetetlen az fluktuáló rész modellezése. Ebben a tanulmányban egy Reynolds-átlagolt két egyenletből álló modellt, különösen a k - ω turbulencia modellt alkalmaztuk. Ez a modell két további transzportegyenletet ad a rendszerhez a turbulens energia folyadékon belüli diffúziójának és konvekciójának leírására. Ezeket a k változó, amely a turbulens kinetikus energiát jelöli, és az ω változó, amely a fajlagos turbulens disszipációt jelöli. A 2.3. egyenletben meghatározott turbulens örvényviszkozitás ezen új változók alapján számítható ki. Végül a Reynolds-feszültségi tag beépítésre került a RANS egyenletbe:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] + g_i \quad (2.14)$$

A feszültségi tag $\overline{u_i u_j}$ helyettesíthető a Boussinesq-approximációval (1877):

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.15)$$

$$\nu_t = c_\mu \frac{k}{\omega} \quad (2.16)$$

A turbulens modellhez tartozó két új transzport egyenlet a következő:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\nu_t |S|^2 - k\omega \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2c_\mu c_{\omega 1} |S|^2 - c_{\omega 2} \omega \quad (2.18)$$

Ahol $|S|^2$ a feszültségi tenzor sebességváltozásának ütemén alapul

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.19)$$

Az ezekben az egyenletekben bevezetett együtthatókat Wilcox (1994) az alábbiak szerint adja meg: $c_\mu = 0.09$, $c_{\omega 1} = \frac{5}{9}$, $c_{\omega 2} = \frac{5}{6}$ and $\sigma_k = \sigma_\omega = 2$.

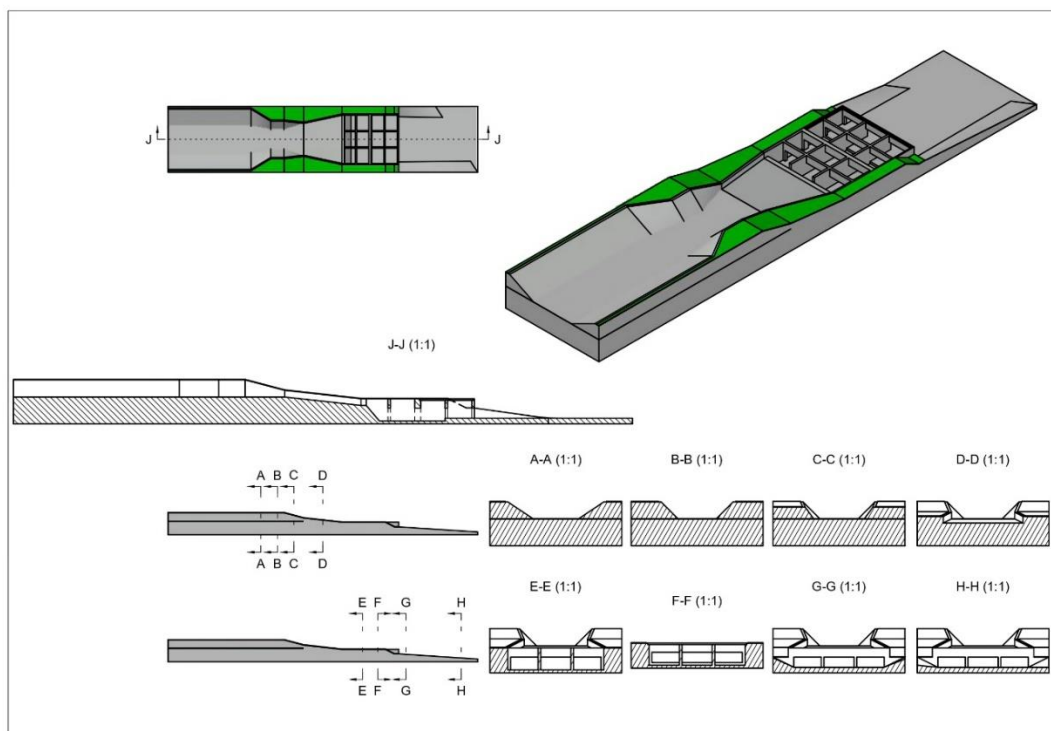
2.2 Modell geometria

A 3D modell adaptálásához két tervcsomagot bocsátottak rendelkezésre. Az egyik egy kézzel rajzolt terv 1973-ból, amely egy alaprajzot és egy hosszmetsetet tartalmaz. A második tervsorozat egy újabb, számítógépes terv, amely az 1973-as tervvel megegyező nézetek mellett több keresztmetsetet is tartalmaz. Ezek és egy helyszíni tanulmány alapján az Autodesk AutoCAD termékének segítségével elkészítettük a műtárgy egy 3D-s modelljét. A modell elkészítése után exportáltuk azt a szükséges ASCII STL fájlformátumban, amely egy széles körben használt hálóformátum, amelyet a REEF3D is használ.

A modellezett terület magában foglalja a hűtővízcsatorna egy részét, az energiatörőt és a 3. ábrán látható sarkantyúszerű szerkezetet. A csatorna szélessége a torkolati oldalon 20,0 m, mélysége 6,43 m, az oldalrészű 1:2 lejtésű. A csatorna medrének esése 0,2 ‰, azaz 2 cm/100m. Ez azonban ebben az összefüggésben nem jelentős tényező, mivel az ezt modellezni képes rácsháló túl finom lenne, ami hatalmas számítási igényt eredményezne.

Ezt követően a csatorna keresztmetszete fokozatosan megváltozik. A csatorna 15 méteren belül 14,50 méteres szélességűre szűkül, miközben oldalai egyre meredekebbé válnak, 1:1 arányú lejtéssel (A-A; B-B). Ez a keskeny szakasz 10 méter hosszan húzódik.

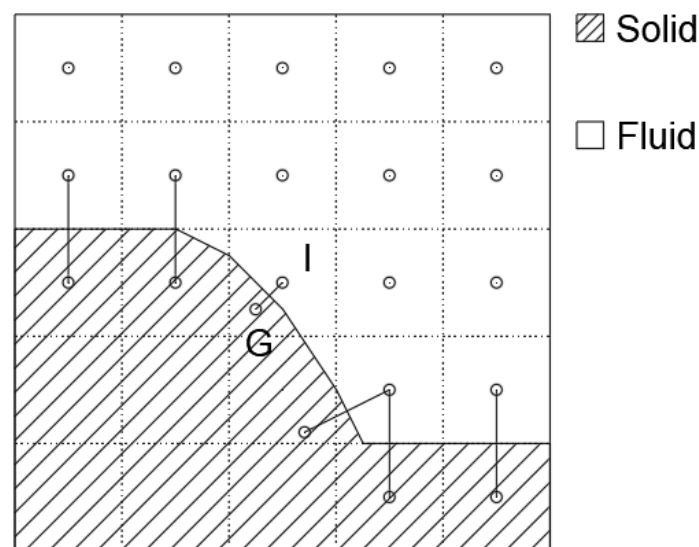
Az ezt követő 15 méteren a csatorna ismét kiszélesedik, és eléri a 24,00 méteres szélességet. Ezzel párhuzamosan a falak rövidebbek, 2,50 méter magasak és függőleges irányúak lesznek (C-C). A csatorna ezután egy 29,00 méter hosszú, 110‰-es lejtésű surrantóba torkollik. Tovább szélesedik, és eléri a 37,50 méteres szélességet (D-D). Ettől a ponttól kezdve a szerkezet szélessége állandó marad. Az energiatörő műtárgy egy nagyobb meredekségű surrantóval kezdődik, amely egy 32,9 méter hosszú és 1 méter mély süllyesztett utófenékbe vezet (E-E, F-F). Ezt a hagyományos módszert falak és keresztgerendák rendszerével egészítik ki. A két 1,0 m vastagságú fal a második surrantó felső szakaszából indul ki, és 43,10 m hosszúságban húzódik. Három szimpla és egy kettős, egyenként 1,0 m vastagságú és 3,5 m magas keresztgerendát helyeztek, ezek alatt 1,0m rést hagytak. A keresztgerendákat a csatorna falai mellett elhelyezkedő kis beugrások támasztják meg alulról. Ezek az elemek egyenlő távolságra vannak egymástól, így egy 3-szor 3-mas rácsot alkotnak, ahol minden egyes cella 9,20 m hosszú és 11,5 m széles. A szerkezetet követően mindkét oldalon két-két sarkantyú található, melyek az áramlás Duna-parttól való eltolására szolgálnak. A folyómedret ezen kívül kőszórással erősítették meg (G-G, H-H).



3. ábra 3D geometria a tervrajzok alapján, AutoCAD segítségével készítve

2.2.1 Hálógenerálás

A REEF3D a hálógeneráláshoz a DiveMESH (Bihs, 2016) programot használja. A REEF3D-ben használt Descartes-féle rácsot merevség jellemzi. A Descartes-féle rács használata megkönnyíti a numerikus modellezés folyamatát, ugyanakkor jelentős kihívást jelent a szabálytalan geometriák ábrázolása során. Az élek és bonyolult görbék ábrázolásához olyan rácsfelbontásra lenne szükség, amely túlzottan nagy számítási teljesítményt igényelne. Ennek a problémának a megoldására a szoftver a Ghost Cell Immersed Boundary Módszert (GCIBM) alkalmazza (Berthelsen et al., 2008). A modell szilárd komponenseit szellemcellákkal reprezentáljuk, és a folyadék régiót ezekre extrapoláljuk az ortogonális vonalak mentén.



4. ábra GCIBM a hálógenerálás alkalmazásánál

A szellemcellák használata a modellezési folyamat párhuzamosítása során is használatos. A modern számítógépek több processzormaggal vannak felszerelve, amelyekkel a számítási folyamatok optimalizálhatóak. A modellezett területet egyenlő részekre osztjuk fel, amelyeket aztán az egyes processzorokhoz rendelnünk. A számítások megkönnyítése érdekében elengedhetetlen a területek közötti kommunikáció. A peremeken felvett értékek megosztásához üzenátviteli interfészt (Message-Passing Interface: MPI) használnak. Ehhez minden régió szellemcellákkal bővítjük ki.

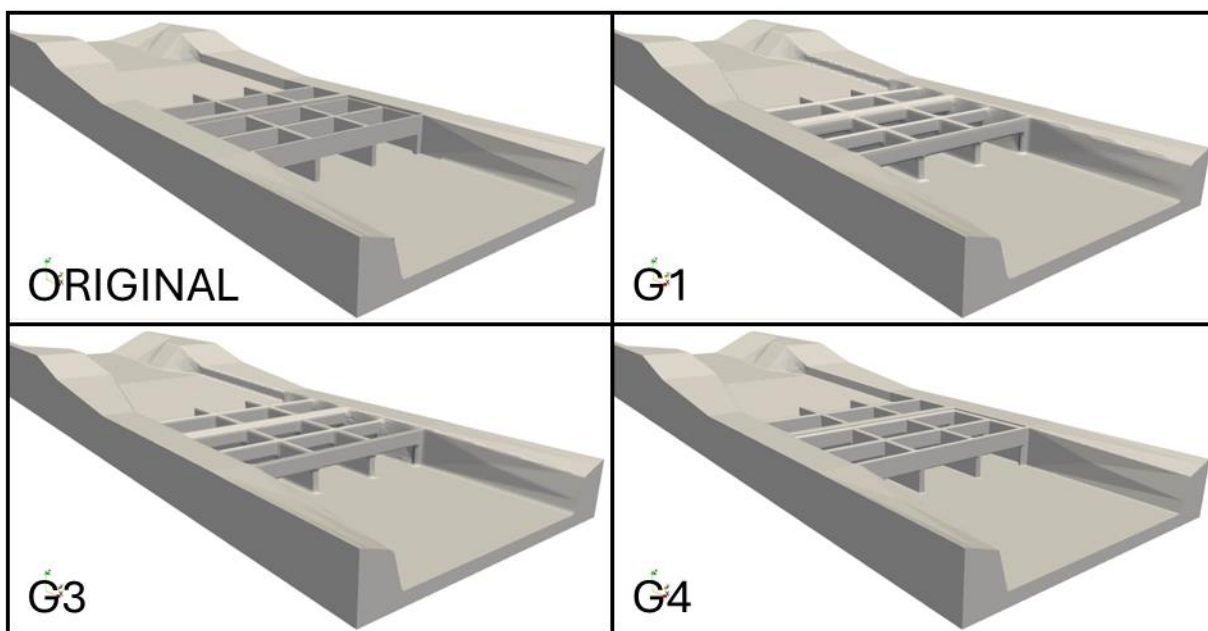
A hálógenerálás egyik legfontosabb szempontja a megfelelő felbontás meghatározása, amely optimális az adott probléma szempontjából. A hálóméretnek kellően finomnak kell lennie ahhoz, hogy pontosan ábrázolja a kérdéses geometriát, de nem lehet túl finom, nehogy meghaladja a rendelkezésre álló számítási kapacitást. A hálóméretnek továbbá a megfigyelendő

tárgy vagy jelenség méreteivel kell összehasonlíthatónak lennie. Ez a rácsháló konvergencia vizsgálatával érhető el, amely a hálófelbontás és a különböző paraméterek közötti összefüggést vizsgálja. Bár létezik átfogó megközelítést nyújtó szabvány, a mi céljainkhoz négy különböző felbontás tesztelése elegendő, amelyek az 1. táblázatban láthatóak.

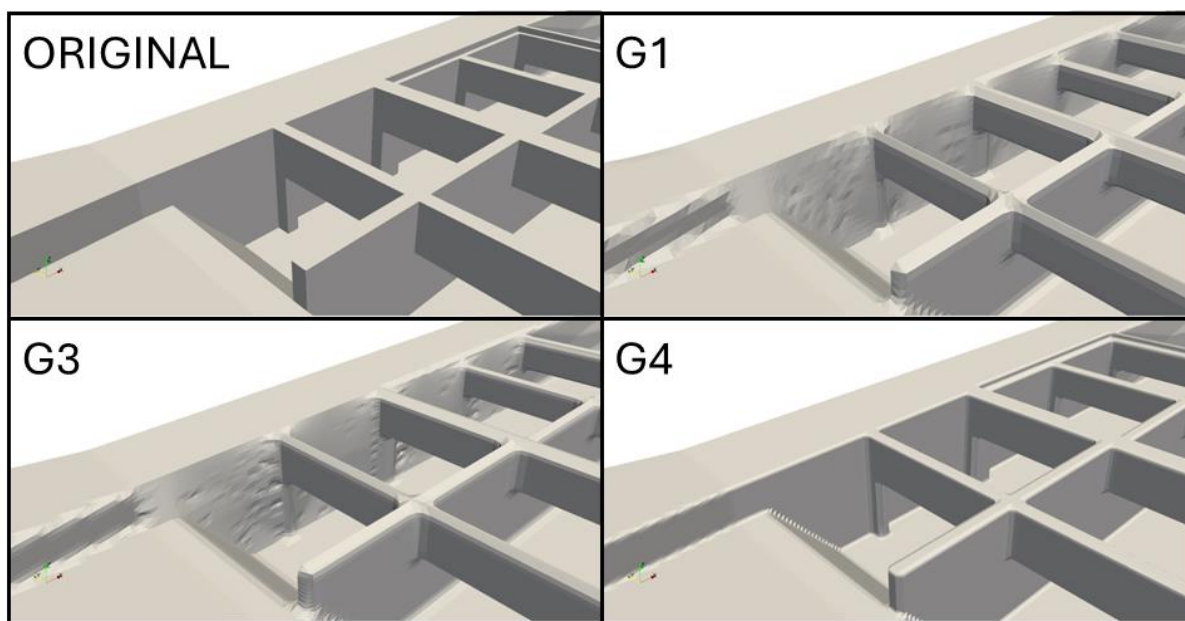
1. táblázat Vizsgált rácsháló felbontások

Grid ID	Grid resolution [m]			Total number of active cells
	dx	dy	dz	
G1	0.50	0.50	0.50	674 535
G2	0.50	0.50	0.25	1 330 161
G3	0.50	0.25	0.25	2 636 970
G4	0.25	0.25	0.10	12 265 674

A különböző rácsfelbontások közötti különbségek világosabb szemléltetése érdekében a modellezett szerkezetről áttekintő (5. ábra) és közeli (6. ábra) képet is készítettünk. Megfigyelhető, hogy még a legdurvább rácsméret is elegendő volt ahhoz, hogy a geometriát úgy állítsuk elő, hogy az felismerhető legyen, és minden fontosabb alkotóelemet tartalmazzon. A közeli képek vizsgálata azonban jelentős eltéréseket mutat a modellek között. A G1 esetben a falak és a keresztgerendák csak két cella vastagságúak, ami az összes él elvesztését eredményezi. A falak homlokzati síkja áramvonalasabbá válik, hasonlóan egy hídpillérhez, így az energiaveszteségek kisebbek. A G3 kiemel néhány élt, de a torzított cellaméret miatt a keresztgerendák továbbra is két cella vastagságúak maradnak. A G4, a legsimább vizsgált felbontás, szinte tökéletes egyezést mutat az eredetivel ennél a képméretnél.



5. ábra Áttekintés a műtárgy leképezéséről különböző rácsfelbontások esetén



6. ábra Közeli kép a műtárgy leképezéséről különböző rácsfelbontások esetén

2.3 Nagy Léptékű Részecskekép Sebességmérés (LSPIV)

Az LSPIV széles körben alkalmazott módszer a vízfelszín sebességének mérésére. Népszerűségét annak köszönheti, hogy nincs szükség speciális eszközre.

A módszer a videó képeinek elemzését foglalja magában annak érdekében, hogy a vízfelszínen mesterséges vagy természetes nyomjelzők mozgását nyomon lehessen követni. A sebességet ezután a nyomjelző által megtett távolság és a két egymást követő képkocka között eltelt idő

alapján számítjuk ki. Ennek alapvető előfeltétele egy olyan kamera, amely kellően nagy felbontású a nyomjelzők azonosításához, és képes a megbízható követésükhöz szükséges nagy képkockasebességű videofelvételek készítésére. A tanulmányban felhasznált LSPIV programot Fleit Gábor MATLAB-ban fejlesztette ki (Fleit & Baranya, 2019). Az LSPIV folyamat három szakaszból áll:

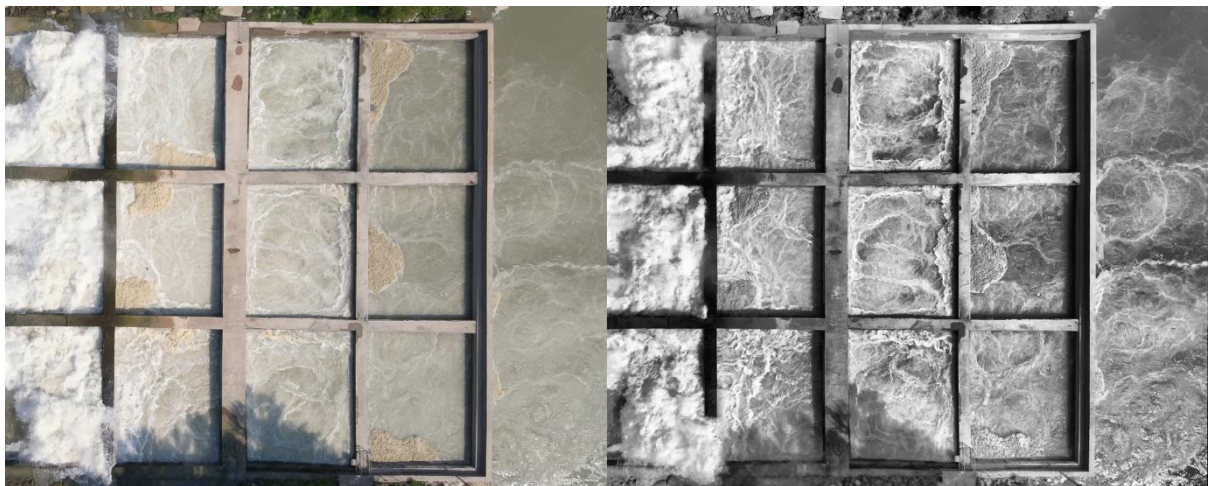
- a) Előfeldolgozás
- b) Elmozdulás számítások
- c) Utófeldolgozás

2.3.1 Előfeldolgozás

A videó elemezhetővé tételéhez elengedhetetlen az előfeldolgozás. Ez magában foglalja a videó szűrését és átalakítását.

Az első lépés az RGB-kép átalakítása 8 bites szürkeárnyalat intenzitású formátumba, amely jobban kiemeli a nyomon követhető elemeket. Ezt követően a legtöbb videót olyan szögben rögzítik, hogy a pontos sebességek kiszámításához ortorektifikációra van szükség.

Ez egyenlőtlen pixelsűrűséget eredményez, mivel az eredeti kép szélessége a kamerától való távolság növekedésével egyre szélesedik. Az LSPIV-folyamat racionalizálása érdekében elengedhetetlen ezen értékek strukturált, ortogonális rácsra történő interpolálása. Az ortorektifikáció valós és pixelkoordinátákon alapul, amelyekből a program ki tudja számítani a képek m/px értékeit. A 7. ábrán egy mintakép látható.



7. ábra Kiragadott képkocka az eredeti videóból, és annak feldolgozott verziója:

2.3.2 Elmozdulás számítások

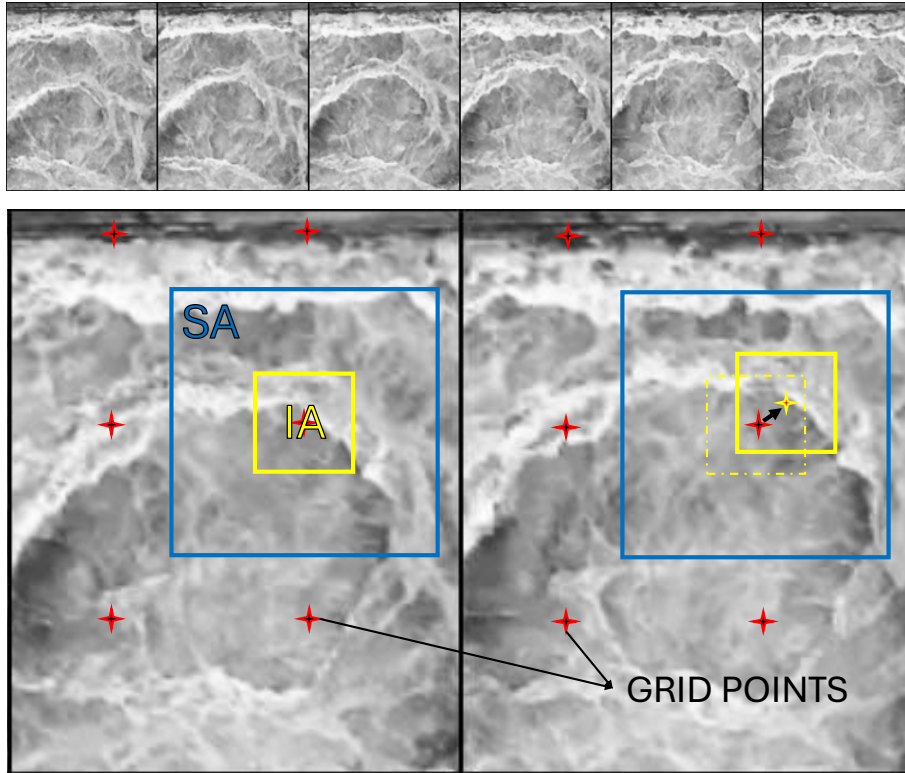
Az elmozdulás kiszámításának folyamata magában foglalja a kezdeti területnek (IA) nevezett képkomponensek és egy előre meghatározott keresési területen (SA) belüli analóg elemek összevetését. Ez keresztkorrelációs technikák alkalmazásával történik.

A fent említett számítás elvégzéséhez meg kell adni, milyen sűrűséggel legyen az IA felvéve, és a két terület méreteit. A reprezentatív kimenethez nem szükséges minden egyes pixelt kiértékelni; továbbá nem szükséges a teljes képet átkutatni.

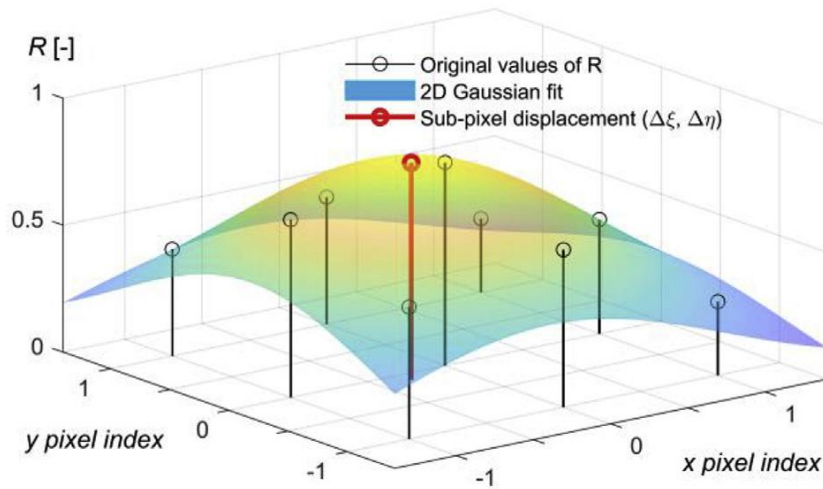
Lehetséges az SA-t az IA körüli négyzetként definiálni, bár ennek nem feltétlenül kell így lennie. Az SA méretei a sebességek becsült nagysága és iránya alapján csökkenthetők. Ebben az esetben a rácsszerkezet miatt nincs egyértelmű áramlási irány. Az SA-t az IA-t körülvevő négyzetként határozzuk meg. A program az IA-t az SA-n belül minden lehetséges területre elmozdítja. A program kiszámítja a pixelek szürkeárnyalat-értékének keresztkorrelációját minden pozícióban.

$$R_{ab} = \frac{\sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} [(a_{xy} - \overline{a_{xy}})(b_{xy} - \overline{b_{xy}})]}{\left[\sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} (a_{xy} - \overline{a_{xy}})^2 \sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} (b_{xy} - \overline{b_{xy}})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.20)$$

Ezután azonosítja a legjobb egyezést, amely legfeljebb olyan pontos lehet, mint amekkora egy pixel. Az eredmény finomításához a program a keresztkorrelációs értékekre egy kétdimenziós Gauss-függvény illesztésével kiszámítja a pixelméret alatti elmozdulást (Dobson, et al, 2014). Ennek a függvénynek a maximumát választja ki az IA elmozdulásának, amint az a 8. ábrán látható. Az elmozdulásvektorok és az eltelt idő alapján a program minden egyes rácspontra ki tudja számítani a sebességet.



8. ábra Kezdeti terület, keresési terület, kezdeti rácspontok két egymást követő képkockán



9. ábra Kétdimenziós Gauss-függvény használata a pixelméretnél kisebb elmozdulás meghatározására

2.3.3 Utófeldolgozás

Az utófeldolgozási szakaszban a Westerweel és Scarano (2005) által javasolt normalizált medián teszt alapján a kiugró értékek kimutatására szolgáló eljárást alkalmazunk. Ez egy sebességvektor értékelését jelenti a nyolc szomszédos rácspont sebességének mediánjához viszonyítva. Abban az esetben, ha a teszt a vektort kiugrónak minősíti, azt egy interpolált értékkel helyettesítjük.

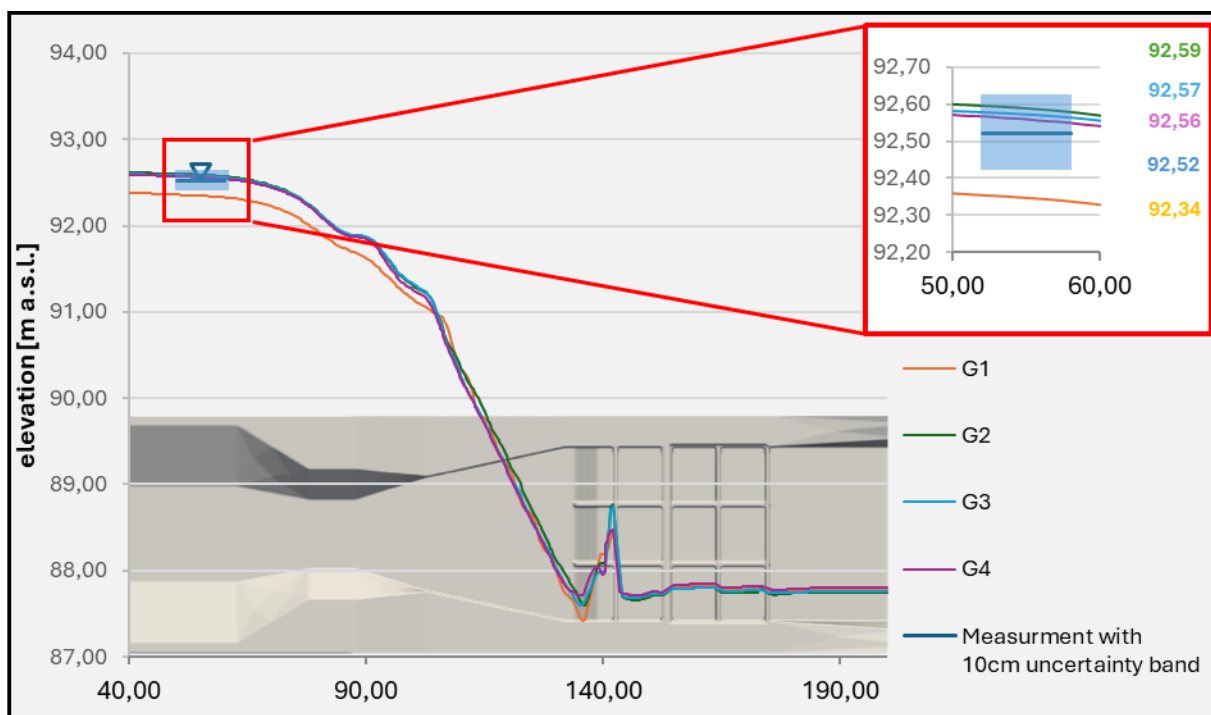
3 Eredmények

A melegvíz-csatorna energiatörő műtárgy modellezésére a korábban ismertetett módszereket alkalmaztuk. A következő fejezetek a rácsméret optimalizálását, az eredmények validálását és a különböző működési körülményekből származó eredményeket mutatják be.

3.1 Rácsháló konvergencia

A 3D geometria megalkotása és a modellezési módszerek kiválasztása után elengedhetetlen az optimális rácsméret meghatározása. A rácsháló konvergencia alkalmazásával elkerülhető a felesleges számítások elvégzése, miközben megmarad a modellezéshez szükséges pontosság. Annak érdekében, hogy több modellverzió tesztelését végezhessük el, csökkentenünk kell a szimulációk futási idejét.

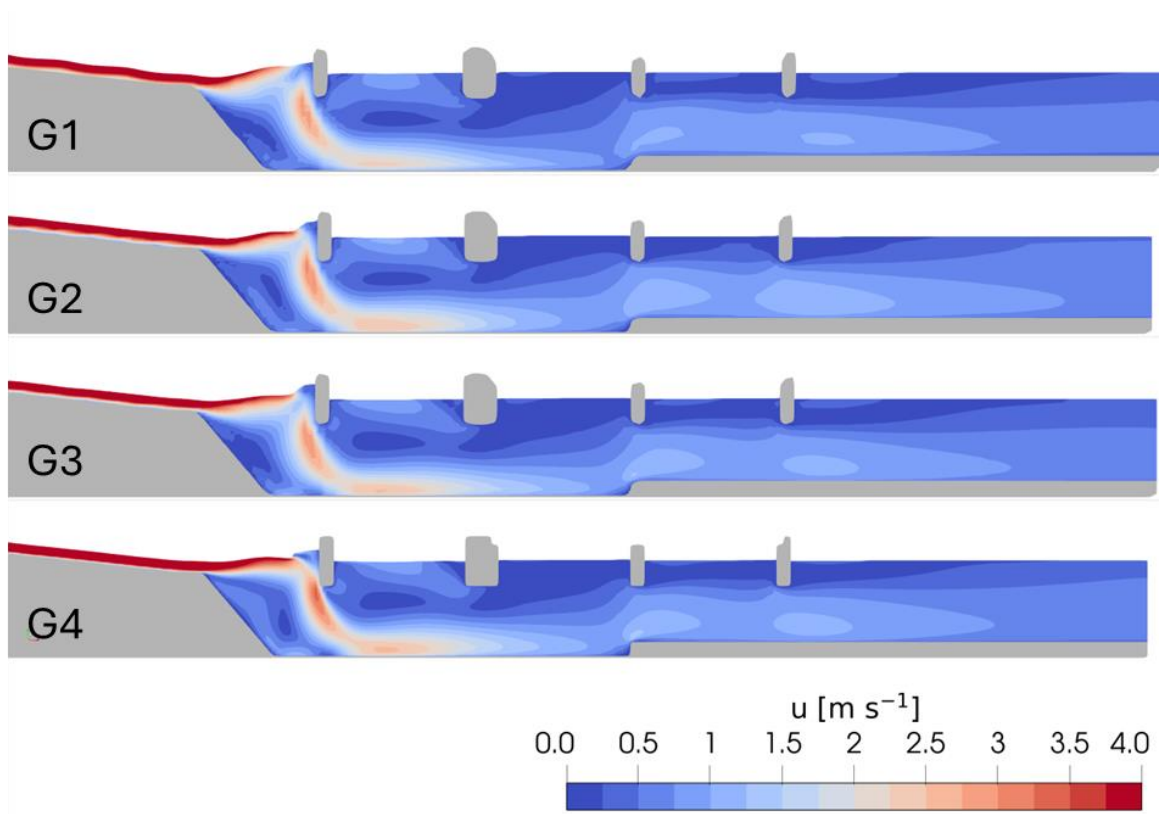
A 2.2.1. fejezetben bemutatottak szerint négy rácsméretet teszteltünk. Az eredmények a 10. ábrán láthatóak, amelyek a szimulációk utolsó lépésénél a vízszinteket ábrázolják. Ezeket egy drónnal végzett kalibrálatlan vízszintméréssel hasonlítottuk össze. Az összehasonlítás elsősorban a különböző modellek eredményei között történt, a mérést ellenőrzési céllal vettük figyelembe a módszer bizonytalansága miatt. Itt fontos kiemelni, hogy az alsó peremfeltétel a kifolyó víz vízszintje volt, amely hatással van az eredményekre. Ebből következik, hogy a kiemelt területek a legfontosabbak az elemzés szempontjából. A legdurvább rácsméret elfogadható eredményt adott a melegvíz-csatornában lévő vízszint esetén. A finomabb rácsháló használata azonban a vízszint jelentős növekedését eredményezte a vízgyűjtőnél és a hidraulikai vízugrásnál. A rács későbbi finomításai nem okoztak hasonló eltéréseket, az eredmények kezdtek közelíteni a mért vízszinthez, jóval a bizonytalansági sávon belül.



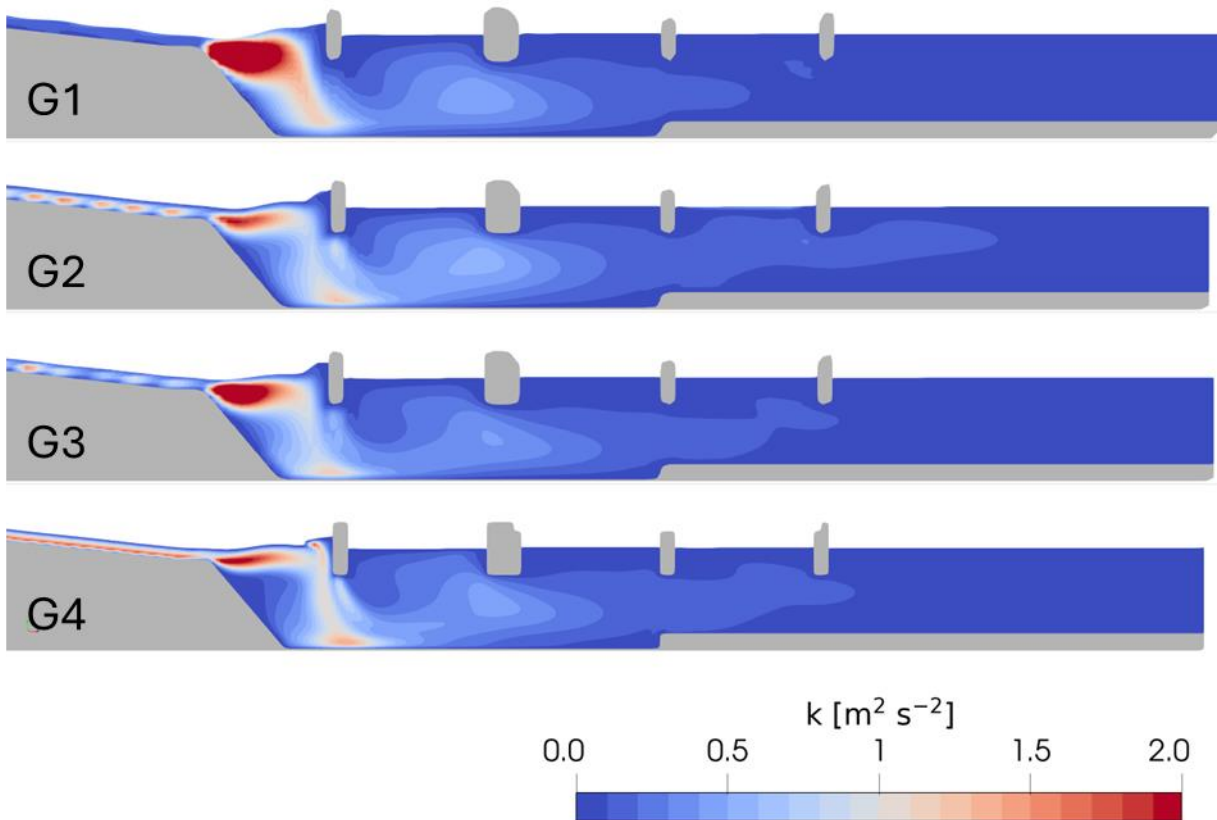
10. ábra Rácsháló konvergencia ellenőrzése a modellezett és mért vízzszinttel a melegvíz-csatornán

Az eredmények részletesebb összehasonlításához valamennyi modell konfiguráció középső részéből hossz-szelvényt emeltünk ki. Először is a 11. ábrán látható sebesség nagyságokat vizsgáltuk. Azt találtuk, hogy minden modell hasonló sebességtartományt mutatott, és a mintázatok minden felbontásban hasonlóak. Kisebb eltéréseket figyeltünk meg az első keresztgerenda jobb alsó sarkában és a süllyesztett utófenék után. A G3 és a G4 rácsfelbontások között még ezek a régiók is nagyobb hasonlóságot mutattak. Ugyanezeket a hosszmetseteket alkalmaztuk a turbulens kinetikus energia esetén is (12. ábra). Ezek jobban szemléltetik a különbségeket ugyanazokon a területeken. A TKE a G1 beállításban magasabb a hidraulikus vízugrásnál, de alacsonyabb az első keresztgerenda és a süllyesztett utófenék után. A sebességekhez hasonlóan ezek a különbségek is elhanyagolhatóvá válnak a G3 és a G4 között. A G2 modell hosszmetsetek alapján megkülönböztethető a finomabb modell konfigurációktól, még úgy is, hogy a 10. ábrán kielégítő vízzszint eredményeket mutat. Ez elsősorban az alvízi oldalon megfigyelt magasabb TKE-értékeknek köszönhető.

Ezen összehasonlítások alapján a G3 rácsfelbontást választottuk ki további elemzésre és validálásra.



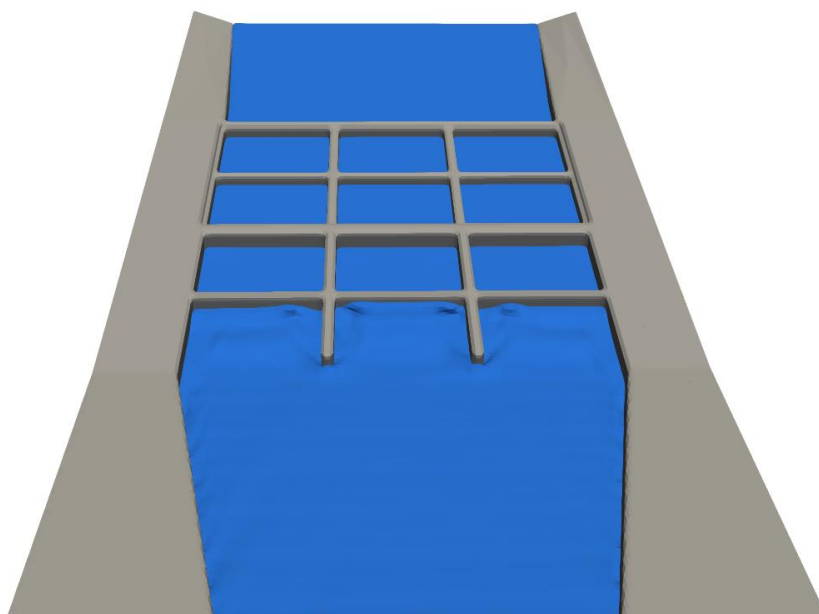
11. ábra A sebességnagyságok összehasonlítása négy rácsfelbontáson: középső hossz-szelvény.



12. ábra A TKE értékek összehasonlítása négy rácsfelbontáson: középső hossz-szelvény.

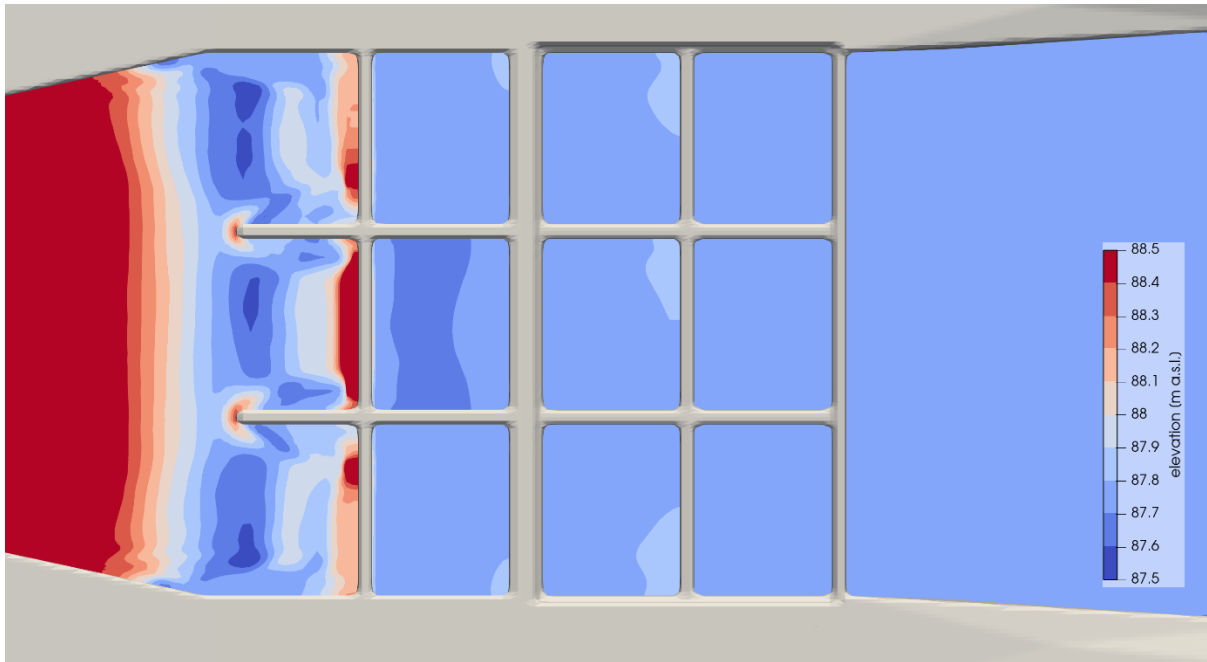
3.2 Validáció

A G3 rácshálóval végzett szimuláció eredményeinek validálásához 3 összehasonlítást végeztünk. Először a vízfelületet összevetettük a helyszínen készült drónfelvételekkel (13. ábra). A hullámok egy része látható a modellben; a valóságban azonban ezek az erős hullámok, amelyek a műtárgyon megtörnek, aeroszolt hoznak létre. Ez a jelenség nem modellezhető egyszerű méretű rácshálóval, mivel ehhez a celláknak kisebbnek kellene lenniük az aeroszolban lévő vízcseppeknél.



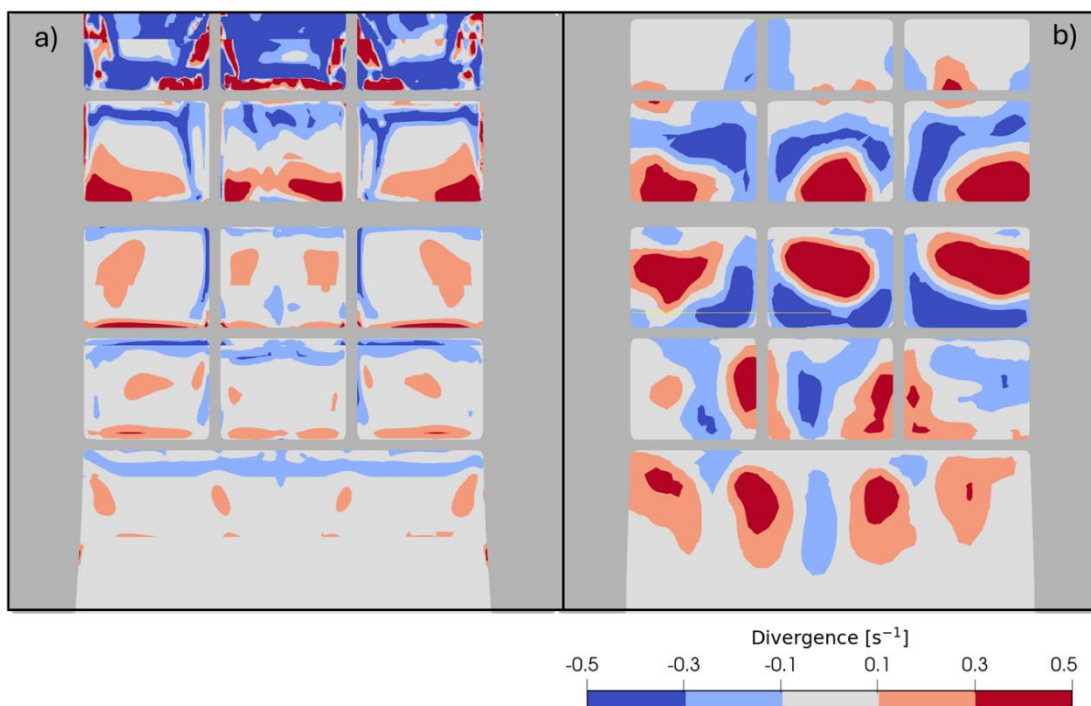
13. ábra A modell eredményeinek összehasonlítása a helyszíni drónfelvétellel

A második összehasonlítás hatékonyabban szemlélteti a szabadfelszín magasságának változatosságát, a 14. ábrán látható színekódolt térkép segítségével. Láthatóak a várt hidraulikai vízugrás jellemzői, valamint az, hogy az energiatörő műtárgy fala előtt megemelkedett a vízfelszín. Továbbá a legtöbb keresztgerendától felfelé is kisebb emelkedések figyelhetők meg.



14. ábra A modell szerinti vízfelszín magasságok.

A validáláshoz használt legjobb módszer a vízfelszín horizontális sebességkomponensek divergenciája volt. Ez a számítás a CFD-modell előrejelzésein és a rögzített drónfelvételeken alapult. A videót a 2.3. fejezetben ismertetett LSPIV módszerrel elemeztük. Sikeresen alkalmaztuk az LSPIV-t, a következő térben és időben átlagolt korreláció értéket kaptuk: $R = 0,83$ (2.20. egyenlet). A korábban bemutatott számítások alapján készült divergencia térképeket a 15. ábra mutatja be. Ezen az ábrán felülnézetben látható, hogy hol található fel- és lefelé irányuló áramlás. A divergencia nagysága összehasonlítható a két számítás között, de nem pontos az egyezés. Az első és a második keresztgerenda köztött, valamint a teljes szerkezet alvízi oldalán a mintázatok feltűnő hasonlóságot mutatnak, ami azt jelenti, hogy a feláramlások helyét a numerikus modell is mutatja. A középső szakasz szintén nagyfokú hasonlóságot mutat.



15. ábra Vízszintes sebességkomponensek divergenciája a vízfelületeken: a) CFD modell előrejelzései vs. b) LSPIV elemzés.
Az áramlás felülről lefelé halad.

A modellt a bemutatott összehasonlítások alapján elfogadhatónak tartom. A rendelkezésünkre álló számítási kapacitás révén a valóságnak megfelelő és változatos működési feltételeket elemezhattünk. Az eredeti modellt 32 órán keresztül futtattuk egy asztali számítógépen (processzor: i9-7900x; RAM: 24 GB). Egy korszerű számítógépen a futási idő jelentősen csökkenthető, de ez az időtartam még így is elég rövid ahhoz, hogy a modellünk működőképes legyen.

3.3 Hidraulikai viselkedés különböző alvízi körülmények között

A validált modellt három különböző üzemi állapot szimulálására alkalmaztuk:

- a) 85.0 m B.f.
- b) 87.8 m B.f.
- c) 90.5 m B.f.

A b) esetben a vízszint eléri, de nem haladja meg a kereszttrudakat. Ezt alkalmaztuk a validáláshoz.

A fennmaradó két scenáriót úgy terveztük, hogy szélsőséges eseteket képviseljen. Az a) esetben a vízszint a keresztgerendák alatt, míg b) esetén keresztgerendák felett volt. A fent említett áramlási viszonyok jelentősen különböznek egymástól. Azonban nem esnek sem a

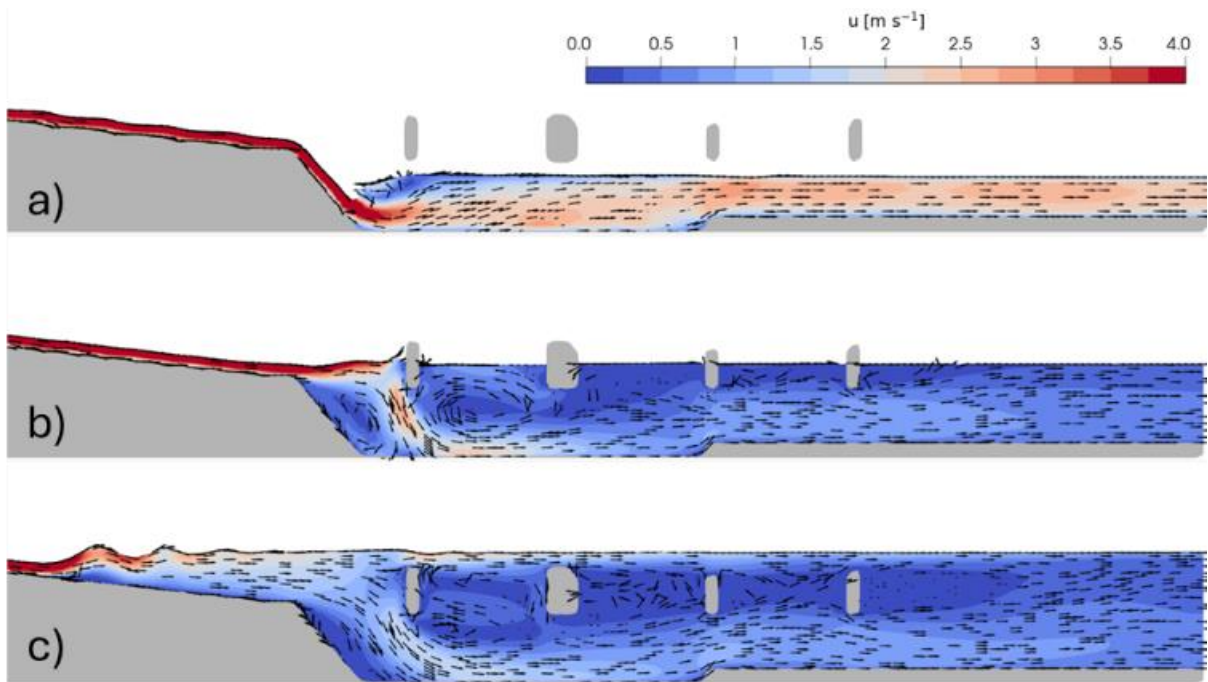
tervezés idején fennálló legmagasabb, sem a legalacsonyabb vízszint (nagy vízállás: 92,1 m B.f.; kis vízállás: 84,1 m B.f.) tartományába.

A 3 scenárió közti különbséget hatékonyan szemléltettük a hosszmetsetek segítségével. Az első sorozatot a 16. ábra mutatja be. Ez a sebesség nagyságát szemlélteti. Az a) esetben a hidraulikai vízugrás jobban látható és a vízszög a fal közelében marad. Ebben az esetben csak a süllyesztett utófenék hat az áramlásra, a keresztgerendák nem. A beáramlás változatlan marad, mivel azt nem szabályozza a vízszint. Ezekből következik, hogy az alacsony alsó peremfeltétel növeli a víz sebességét. A víz körülbelül 6 m/s sebességgel közelíti meg a surrantó végét. Az alacsony alsó peremfeltétel miatt azonban az alvz nem éri el a surrantót, a vízsebesség addig növekszik, amíg meg nem haladja a 8 m/s-ot. A hidraulikai vízugrás után a sebességek körülbelül 2-2,5 m/s-ra csökkennek. A süllyesztett utófeneket elhagyva a vízmélység körülbelül 1 m-rel csökken, ennek következtében az áramlási sebesség 2,5-3 m/s-ra nő.

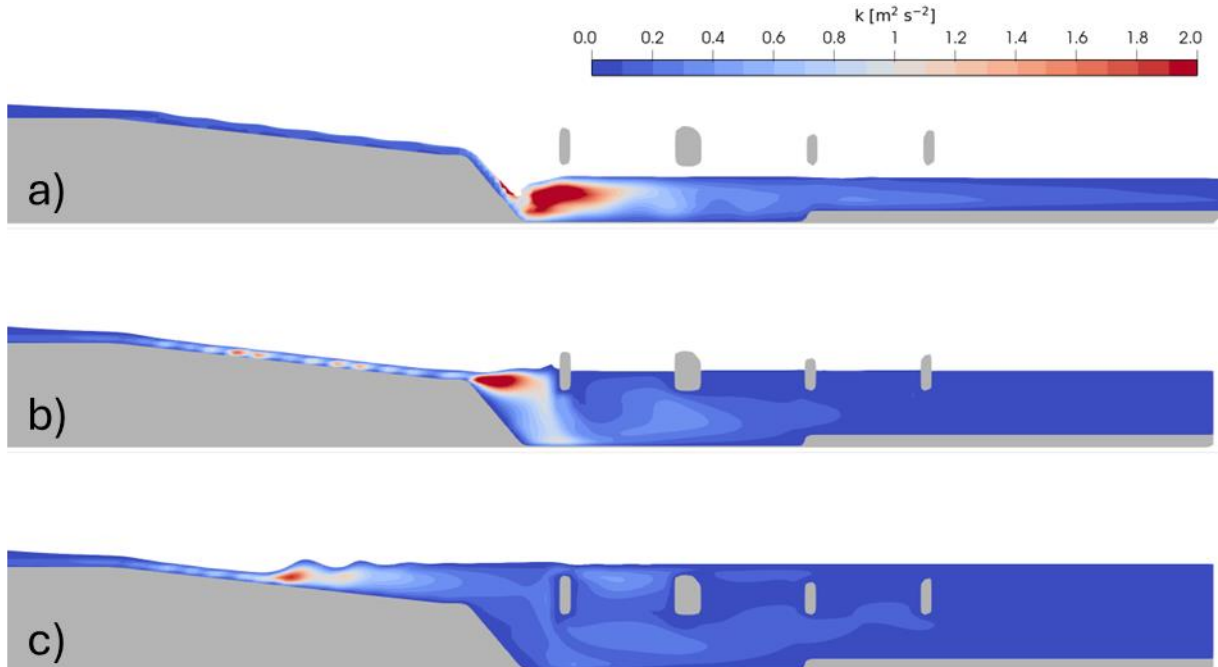
A validált b) scenárió esetén a kiáramló peremfeltétel éri a surrantót, az áramló víz eltávolodik a csatorna falától. Csak akkor lassul le 6 m/s alá, amikor az első keresztgerendához ér, és alábukik. Ez az első és a második keresztgerenda között keringő áramlást okoz. Az ellenáramlás a szabad felület közelében éri az 1 m/s-ot. A műtárgyat elhagyva az áramlás 1 m/s alá csökken.

A c) scenárió esetén a magas vízszint visszaszorítja a hidraulikus vízugrást a surrantó felé, így az hullámsorozatból áll. Amikor az áramlás éri az energiatöröt, már 2 m/s alá csökken a sebessége. A víz már nem csak a keresztgerendák alatt áramlik, hanem azok felett is. A másodlagos áramlás sebessége 2,5 m/s körül nagyobb, de kisebb keresztmetsetű. A keresztgerendák alatti áramlás csúcsértéke alig több mint 1,5 m/s. A két áramlás közötti vízhozam-arányt a keresztmetset mentén lévő eltérések miatt nem lehet egyetlen hosszmetset alapján meghatározni, de a modellből kiszámítható. Az első két keresztgerenda között a b) scenárióhoz hasonlóan visszaáramlás történik, de a sebességek 0,5 m/s alatt maradnak. A kiáramló víz alsó határa 0,5-0,75 m/s.

A 17. ábra hosszmetsete a TKE-t szemlélteti. Azt tapasztaljuk, hogy a vízszint emelkedésével a TKE csökken. Emellett a magas TKE-értékek kiemelik a hidraulikus vízugrás helyét, amely alábukik. A legtöbb TKE a hidraulikus vízugrásokból származik. Az a) esetben az egyetlen más forrás a süllyesztett utófenék vége, de az nem oszlik el teljesen. A divergencia még a modellezett terület végén is 0,1 m²/s². Az a) és b) esetben a visszaáramlások miatt a TKE értéke megnő. Az első két keresztgerenda között egyes pontokon éri a 0,5 m²/s² értéket is.

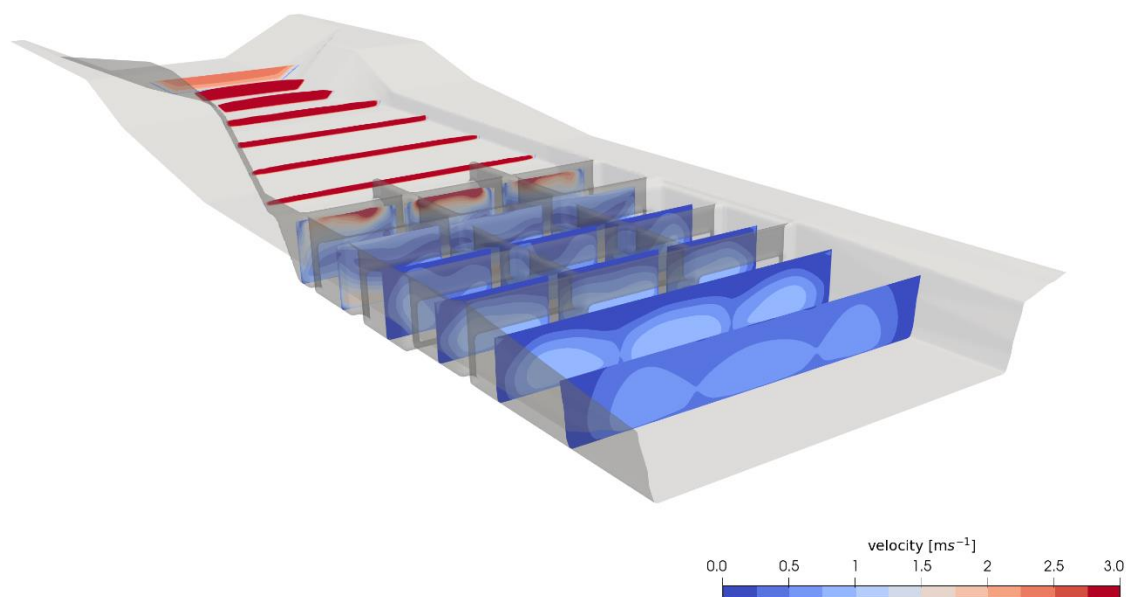


16. ábra A sebességnagyságok összehasonlítása három forgatókönyv szerint: hosszmetset a középső szakasról
a) 85.0 mB.f.; b) 87.8 m B.f.; c) 90.5 m B.f..

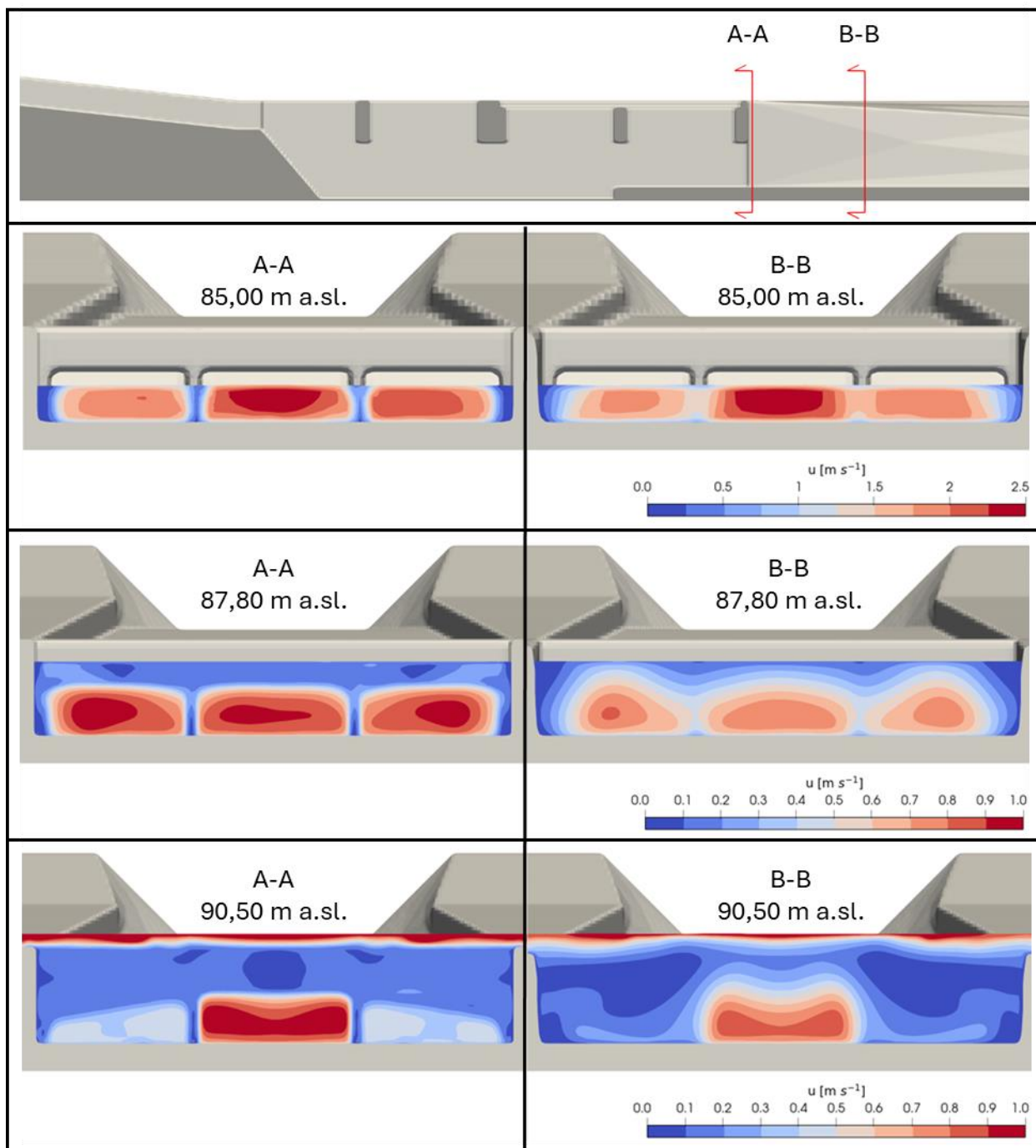


17. ábra A turbulens kinetikus energia összehasonlítása három forgatókönyvben: hosszmetset a középső résről
a) 85.0 mB.f.; b) 87.8 m B.f.; c) 90.5 m B.f..

A modell 3D-s jellegének jobb szemléltetése érdekében a 18. ábra a műtárgy mentén elhelyezkedő sebességi keresztmetszetek sorozatát mutatja be. Ez szemlélteti a hosszirányú változatosságot, valamint a sebességek térbeli eloszlását egy adott keresztmetszeten belül, miközben a szabadfelszín vizuális ábrázolását is biztosítja. A pontos értékek megállapítása azonban kihívást jelent. Ennek megoldására minden scenárióból két keresztmetszetet választottunk ki a további elemzésekhez. A következő keresztmetszetek azt szemléltetik, hogy a víz hogyan hagyja el az energiatörő műtárgyat, majd az ezt követő néhány méteren belüli áramlási változásokat. A 19. ábra az első sorozat sebességnagyságait mutatja be. Az eredmények alapján az optimális eloszlás a b) scenárióban következik be, ahol mind a süllyesztett utófenék, mind a keresztgerendák hozzájárulnak az energiatöréshez, de utóbbin a víz nem tud átfolyni. Az a) scenárióban megfigyelt eloszlás hasonló, azonban a középső csatorna megtartja az elsődleges áramlási vonal állapotát. Az előző scenáriókkal ellentétben az a) eset a következő keresztmetszetig változatlan marad. A c) scenárió mutatja a legérdekesebb keresztmetszeti képeket. Itt a felső áramlás egyenletesen oszlik el, mégis a középső csatorna és a periférián lévő csatornák közötti sebességkülönbség jelentős. A sebességek csökkenni kezdenek, az arány azonban a következő keresztmetszetenél is egyenletes marad.

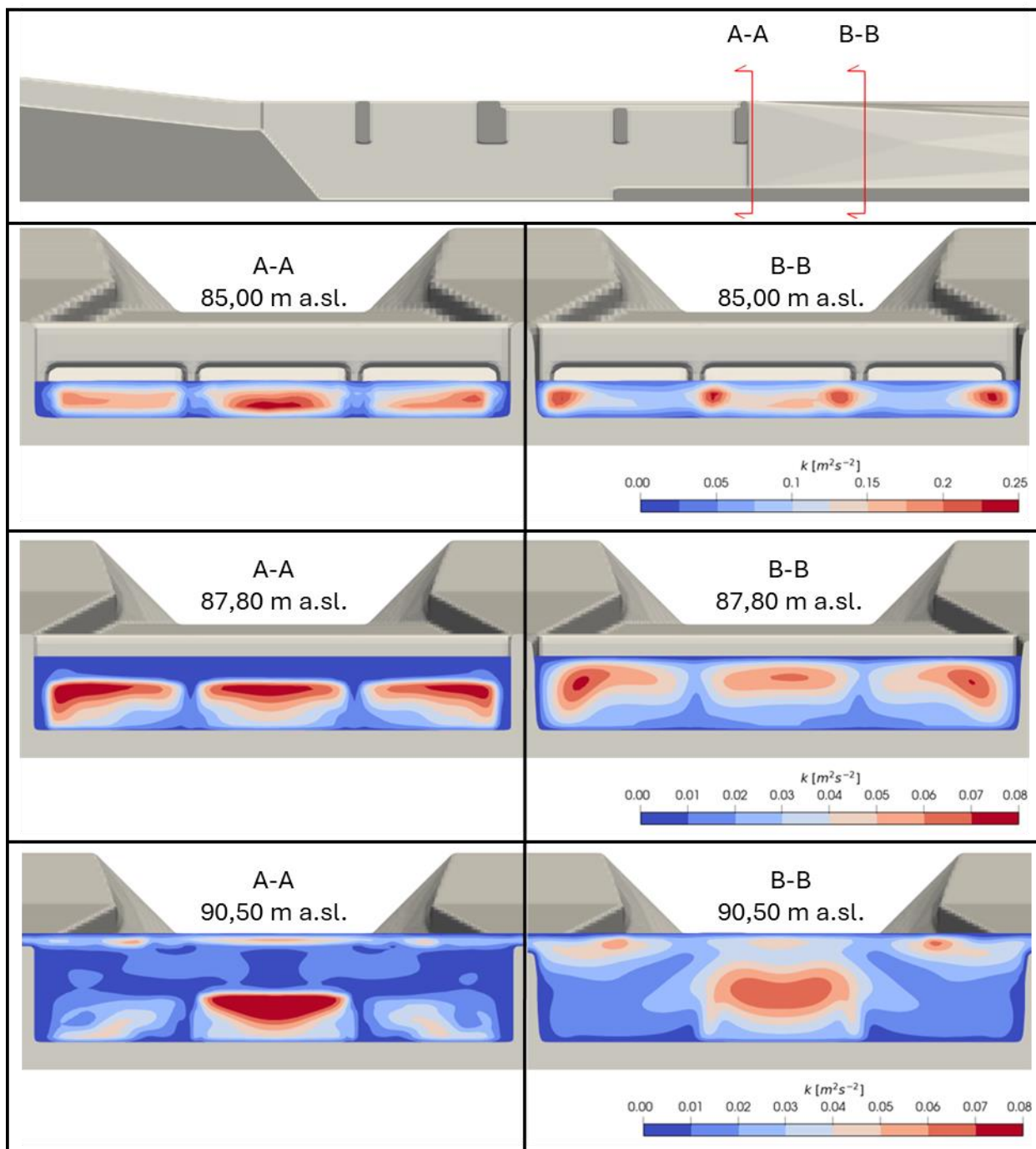


18. ábra A validált modell keresztmetszetei a b) forgatókönyv esetében



19. ábra Keresztmetszeti sebességnagyságprofilok az energiaelosztó után (A-A) és a folyásirányban (B-B).

A keresztmetszetek második csoportja a TKE-t szemlélteti a 20. ábrán. Tekintettel a TKE és a nyírófeszültség közötti szoros összefüggésre, ezek az ábrák is segítenek annak elemzésében, hogy a műtárgy mennyire hatékonyan akadályozza meg a meder mélyülését. Minden szcenárió esetében megfigyelhető, hogy a TKE a B-B keresztmetszeteknél a csatorna medrének közelében csökken az A-A keresztmetszethez képest. Az a) szcenárióban megfigyelt nagy sebességek miatt azonban a TKE még mindig egy nagyságrenddel magasabb, mint a többi esetben.



20. ábra Keresztmetszeti turbulens kinetikus energiaprofilok az energiaelosztó után (A-A) és a folyásirányban (B-B).

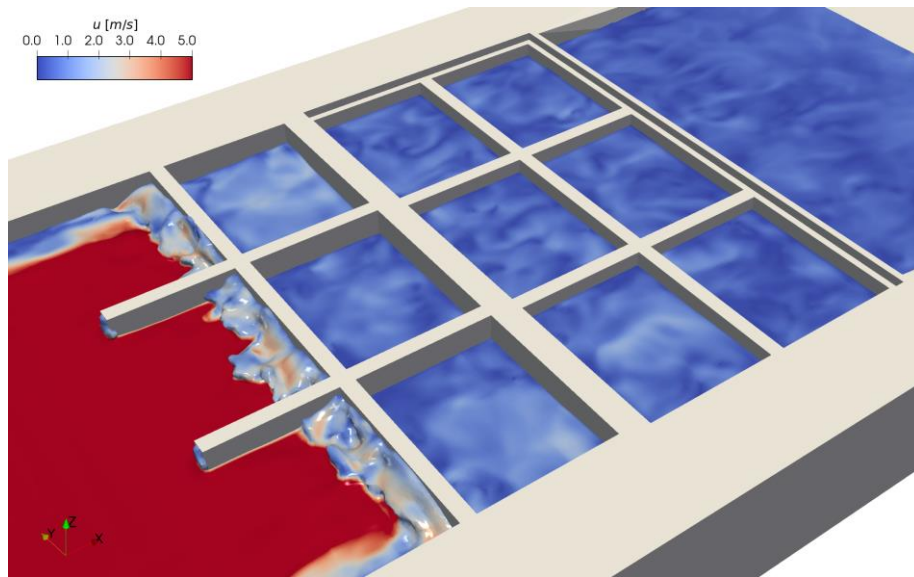
4 Összefoglalás

A munka során korszerű numerikus modellezési (CFD) technikákat alkalmaztuk egy összetett energiatörő műtárgy hidraulikai viselkedésének elemzésére. A terepi mérések és a modell eredményei azt mutatják, hogy a részletes háromdimenziós szabadfelszíni megközelítés elengedhetetlen a hatékony elemzéshez. A REEF3D-ben implementált Level Set Method hatékonynak bizonyult erre a célra, mivel a segítségével valóságghű szabadfelszíneket modellezhettünk.

A dolgozatban használt kontroll fájlok mintája a függelékben található.

A modellt egy rácskonvergenca-vizsgálattal értékeltük, és különböző módszerekkel, többek között a vízszintek helyszíni méréseivel és LSPIV-adatokkal validáltuk. Ezek egy olyan modell változatot eredményeztek, amely képes a műtárgyat különböző működési feltételek mellett elemezni, miközben a futási ideje kevesebb mint két nap, így a mérnöki munkák számára praktikusán alkalmazható.

Az elemzett scenáriók értékes betekintést nyújtottak az energiatörő műtárgy működésébe. A modell bemutatta, hogy a vízszintek változása hogyan befolyásolja a szerkezetre gyakorolt nyomást és az áramlások eloszlását a különböző útvonalakon. Pontosabb eredményekhez azonban további scenáriókat kell vizsgálni, mivel mind a magas mind az alacsony vízállás feltételei megváltoztak az eredeti tervezés óta, és a szélsőséges vízállások is egyre gyakoribbak. Az alkalmazott RANS-turbulenciamodell meglehetősen pontos eredményeket adott, hatékonyan reprodukálva a hidraulikus vízugrásokat és a feláramlásokat. A modellből adódó, időbeni kiegyenlítő hatás azonban korlátozza a bonyolult turbulens áramlási részletek megjelenítését. Az olyan jelenségek esetében, ahol ezek a turbulens áramlások kritikusak, egy alternatív megközelítés, például a Large Eddy szimuláció megfelelőbb lehet. Ennek bemutatására egy próbamodellt futtattunk LES segítségével (21. ábra).



21. ábra Sebességnagyságok egy LES modell alapján.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm konzulensemnek, Dr. Fleit Gábornak a dolgozat elkészítése során nyújtott segítségét és a szakmai támogatását. Segített továbbá betekintést nyerni a hidraulikai modellezés egy új ágába. Köszönettel tartozom az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság munkatársainak, hogy rendelkezésre bocsátották a drónvideókat, amelyek nagyban hozzájárultak a validálási folyamathoz. Hálás vagyok továbbá családomnak és barátaimnak a rendületlen támogatásukért és bátorításukért, amely nélkül ez a dolgozat nem jöhetett volna létre.

Irodalomjegyzék

- Alfonsi, G. (2009). Reynolds-averaged Navier–Stokes equations for turbulence modeling.
- Berthelsen, P. A., & Faltinsen, O. M. (2008). A local directional ghost cell approach for incompressible viscous flow problems with irregular boundaries. *Journal of computational physics*, 227(9), 4354–4397.
- Bihs, H. (2016). *DIVEMesh :: User Guide v16.09*. <https://reef3d.wordpress.com/>.
- Bihs, H., Kamath, A., Alagan Chella, M., & Pakozdi, C. (2017). Complex geometry handling for a cartesian grid based solver. In MekIT'17-Ninth national conference on Computational Mechanics. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).
- Boussinesq, J. (1877). Essai sur la théorie des eaux courantes. *Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences*, 23(1):1–680.
- Chorin, A. (1968). Numerical solution of the Navier-Stokes equations. *Math. Comput.*, 22(745).
- Diskin, B., Thomas, J., Rumsey, C. L., & Schwöppe, A. (2015). Grid convergence for turbulent flows. In *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting* (p. 1746).
- Dobson, D.W., Holland, K. Todd, Calantoni, J., (2014) Fast, large-scale, particle image velocimetry-based estimations of river surface velocity, *Comput. Geosci.* 70 35–43, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.05.007>.
- Fleit, G., & Baranya, S. (2019). An improved particle image velocimetry method for efficient flow analyses. *Flow Measurement and Instrumentation*, 69, 101619.
- Országos Vízügyi Főigazgatóság. (2022). Magyarország vízgyűjtő-gazdálkodási tervének második felülvizsgálata [Hungarian Water Management Plan, Second Review]. Budapest, Hungary: Author. (Attachment 1-1: Felszíni víztestek)
- Osher, S. and Fedkiw, R. P. (2001). Level set methods: An overview and some recent results. *Journal of Computational Physics*, 168:463–502.
- Peng, D., Merriman, B., Osher, S., Zhou, H., and Kang, M. (1999) A PDE-based fast local level set method. *Journal of Computational Physics*, 155(2):410 – 438.
- Wilcox, D. C. (1994). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries Inc., LaCanada, California, U.S.
- van der Vorst, H. (1992). Bi-CGStab: A fast and smoothly converging variant of BICG for the solution of nonsymmetric linear systems. *Sci. Stat. Comput.*, 13:631–644.
- Westerweel, J., Scarano, F. (2005) Universal outlier detection for PIV data, *Exp. Fluids* 39 1096–1100, <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0016-6>.
- Reynolds, O. (1885). On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 186:123–164
- 15/2001. (VI. 6.) KöM rendelet az atomenergia alkalmazása során a levegőbe és vízbe történő radioaktív kibocsátásokról és azok ellenőrzéséről [Regulation on radioactive emissions into air and water and their monitoring during the application of nuclear energy]. (2001). Wolters Kluwer. Available at <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0100015.kom>

Mellékletek

DIVEMesh kontroll fájl (control.txt)

B 1 0.5	<i>cell size</i>
B 2 550 166 110	<i>number of cells in x-, y- and z-direction</i>
B 10 40.0 205.0 0.0 50.0 81.0 98.0	<i>rectangular domain; x_{start} x_{end} y_{start} y_{end} z_{start} z_{end}</i>
C 11 1	<i>left side: inflow</i>
C 12 3	<i>side: symmetry plane</i>
C 13 3	<i>side: symmetry plane</i>
C 14 2	<i>right side: outflow</i>
C 15 21	<i>bottom: wall boundary</i>
C 16 3	<i>top: symmetry plane</i>
S 1 1	<i>read STL file and generate solid</i>
M 10 20	<i>number of processes for parallel computations</i>
M 20 2	<i>decomposition method: improved rectangular base domain</i>

REEF3D control file (ctrl.txt)

B 10 1	<i>use wall functions for the velocities</i>
B 50 0.0005	<i>wall roughness k_s</i>
B 60 1	<i>enable ioFlow for open channel flow: constant inflow</i>
B 77 1	<i>pressure outflow boundary conditions:</i>
	<i>controlled outflow (zero gradient pressure)</i>
D 10 4	<i>convection discretization: WENO5 FLUX</i>
D 20 2	<i>diffusion discretization: implicit</i>
D 30 1	<i>pressure algorithm: PJM CORR</i>
F 30 3	<i>time scheme level set: 3rd-order TVD Runge-Kutta</i>
F 40 23	<i>reinitialization time scheme: 3rd-order TVD Runge-Kutta</i>
F 50 2	<i>fix level set for inflow or outflow: Outflow fixed</i>
F 62 87.8	<i>phase 1 end, z-direction for outflow boundary</i>
F 72 137.5 205 0 50 87.3	<i>regions for free surface elevation x_{start} x_{end} y_{start} y_{end} h_{wl}</i>
F 72 135 137.5 0 50 88.5	<i>set up as like final free surface</i>
F 72 115 135 0 50 90.5	
F 72 40 115 0 50 92.5	
I 10 1	<i>initialize: Velocities with Potential Flow Solver;</i>
	<i>Pressure; Turbulence Model</i>
M 10 20	<i>number of processes for parallel computations</i>
N 40 3	<i>time scheme for the momentum equations: 3rd-order TVD</i>
	<i>Runge-Kutta</i>
N 41 180	<i>maximum modeled time</i>
N 47 0.5	<i>relaxation factor for time step size</i>
P 10 1	<i>print ParaView binary format</i>
P 30 0.2	<i>print Paraview results every ith second</i>
P 51 55.0 25.0	<i>x-location and y-location of height gauges</i>
T 10 2	<i>turbulence model: $k-\omega$ model</i>
T 36 2	<i>FSF boundary condition for turbulent dissipation:</i>
	<i>ON, including distance from the nearest wall</i>
T 37 0.1	<i>virtual origin for distance y' above the free surface</i>
W 10 100	<i>inflow discharge</i>
W 22 -9.81	<i>acceleration due to Gravity, z-component</i>