

A Tisza 1D hidrodinamikai modellezése: kihívások, eredmények, nehézségek

Dr. Liptay Zoltán Árpád

Országos Vízeljáró Szolgálat, 1012 Budapest, Márvány utca 1/d., email: liptay.zoltan@ovf.hu

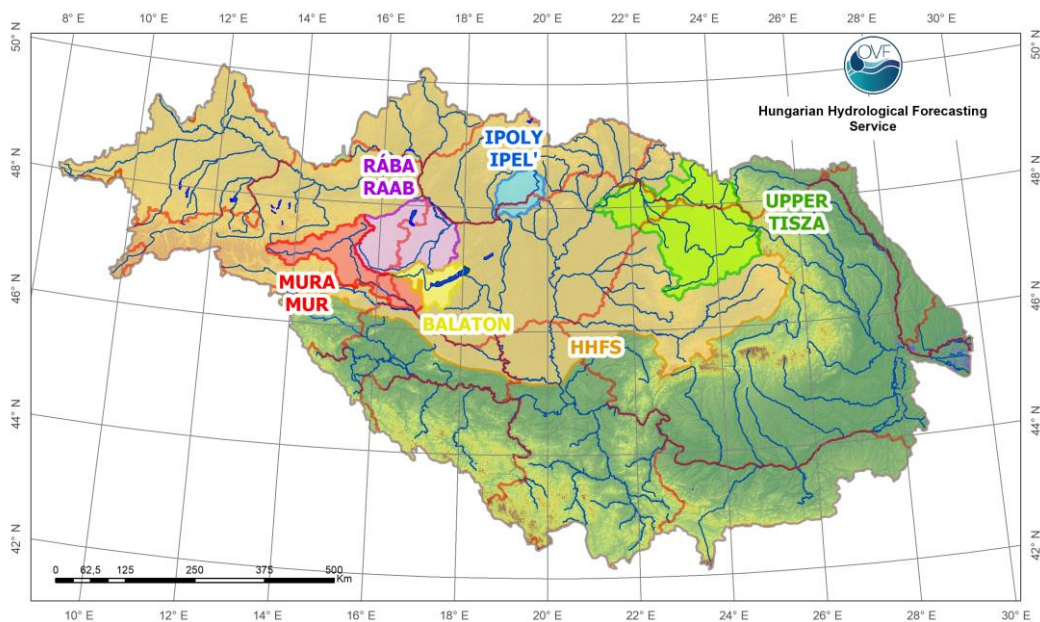
Kivonat: Az Országos Vízeljáró Szolgálat 2020 januárjában helyezte üzembe saját fejlesztésű 1 dimenziós hidrodinamikai modelljét a Duna hazai szakaszára, és az idei év elejére elkészült a Tisza modellje is. A cél az évtizedek óta használatban lévő kaszkádmódel támogatása egy hidrodinamikai alapú megközelítéssel, ami egy pontosabb előrejelzés alapja lehet. Az elkészült modell tartalmazza a Tiszát Tiszabecstől Újbecséig, valamint a mellékvízfolyásainak hazai szakaszát, és folyamatban van a külföldi folyószakaszokra történő adatgyűjtés és kiépítés. A Tisza vízgyűjtő hidrológiája komplex, emiatt különböző szakaszain egyidejű tetőzések alakulnak ki. Ennek oka többek között, hogy mellékvízfolyásainak vízjátéka igen nagy, akár egy időben is számottevő vízhozamot hozhatnak részvízgyűjtőikről. A vízrendszer természetes lefolyási viszonyai a vízlépcsők hatására megváltoztak, így mind a torkolatok környéki, mind pedig a vízlépcsők feletti duzzasztott szakaszok figyelembe vétele szükséges az árhullámok megfelelő transzformációjához. Ez magával hozza a vízszintszabályozó műtárgyak helyes leképezését olyan hidraulikai egyenletek formájában, amelyek behelyettesíthetők a Saint Venant egyenletekből álló egyenletrendszerbe. Dolgozatomban bemutatom a modell felépítését, a modellépítés során felmerült nehézségeket, az elért eredményeket, összehasonlítom a TÁREK módel, valamint az OVSZ által kiadott előrejelzések és szimulációs eredményeivel, valamint részletezem azokat a kihívásokat, melyekkel egy ilyen módel operatív használata során szembesül az előrejelző.

Kulcsszavak: hidrológia, hidrodinamika, 1D, modellezés, Tisza, előrejelzés

BEVEZETÉS

Az elmúlt években a nagyvizek előrejelzése mellett egyre fontosabb lett a kisvízi vízállások minél pontosabb előrejelzése is. Ezt a vízhiányos időszakok súlyosbodása, és egyre gyakoribb előfordulása indokolja. Egy hosszabb időelőny mellett is megbízható előrejelzéssel időben felismerhető a kockázat, és a védekezés tervezésével és végrehajtásával mérsékelhető a kár. Így a szakmai döntéshozás részéről mind gyakrabban elvárás a hazai hidrológiai előrejelző rendszereinkkel szemben a folyamatos üzem, azaz a megbízható üzemelés, és kielégítő jóságú előrejelzés a vízjárás teljes tartományában. Ez az adott vízfolyás hidrológiai folyamatainak ismeretét, megfelelő adatellátottságot, és egy kellően kidolgozott előrejelző rendszert igényel. Hazánkban több valósidejű előrejelző rendszer üzemel, melyek különböző módszerekkel, más-más időelőnnyel jeleznek előre. Mindközül a legnagyobb kiterjedésű az Országos Vízeljáró Szolgálat (OVSZ) által fejlesztett és üzemeltetett OLSER rendszer (1. ábra). Ez a rendszer a Duna Tisza torkolat feletti teljes vízgyűjtőjét lefedi, és 6 napos időelőnnyel, 6 órás időlépcsőkben szolgáltat előrejelzést a főbb hazai vízmércékre. Az OLSER-rel (Országos Lefolyás Szimulációs és Előrejelző Rendszer) végzett számítások során a hidrológiai transzformáció diszkrét lineáris kaszkádmódel (DLKM) történik (Kalinin és Milyukov 1957, Nash 1960, Szilágyi és Szöllősi-Nagy 2008, Szilágyi és Laurinyecz (2014), melynek előnyei a gyorsaság, a könnyű paraméterezhetőség, hátrányai a merev modellszerkezet, a paraméterek függése az időlépcsőtől. A kaszkádmódel rendkívül jól illeszthető a hazai folyókra, de mivel a vízhozamok transzformációját végzi, a vízállásokat pedig utólag permanens módon számítjuk, így minden olyan esetben romlik a pontossága, amikor a vízfelszín esése jelentős

szerepet játszik. A leggyakoribb ilyen esetek a duzzasztott vízterek, mint a vízlépcsők felvizen lévő mércék, vagy a mellékvízfolyások torkolat közeli szakaszai. Ilyen mérceszelvényekben a duzzasztott vízszint számítása utólagos korrekcióval történik.



1. ábra: Hazai hidrológiai előrejelző rendszerek

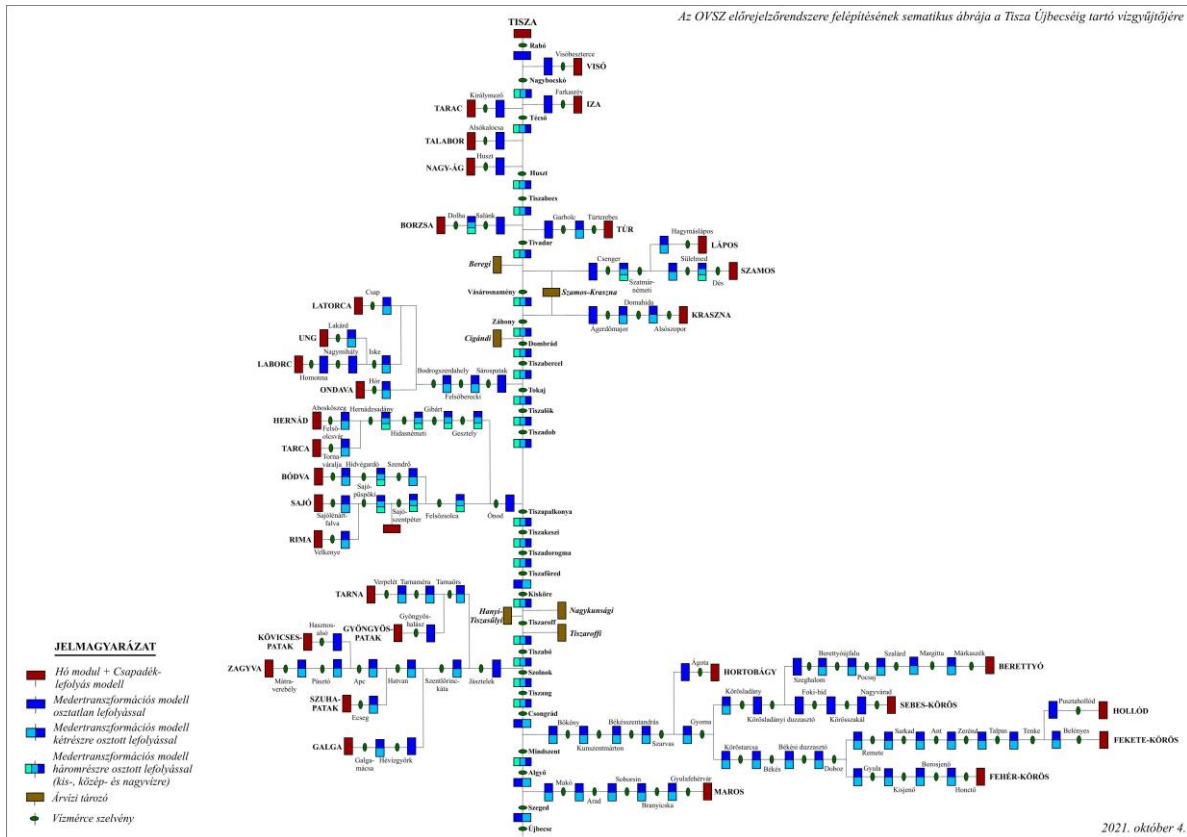
Az OLSER két alrendszerre tagolódik, a Duna és Tisza részmodellekre. A tiszai részmodellt a 2. ábra szemlélteti. A Tisza vízrendszerének több olyan jellegzetessége is van, ami nehezíti a kaszkádmódel használatát, így a módel pontossága elmarad a Duna módelától. Ilyenek például a vízszintszabályozó műtárgyak, beduzzasztott folyótorkolatok, vagy akár az egyidejű, egymásra ható árhullámok levonulása.

Az OLSER kiegészítéseként a 2020-as év januárjában üzembe állt egy szintén saját fejlesztésű 1 dimenziós hidrodinamikai módel (Liptay és Gauzer 2021). A módel célja a kaszkádmódel konceptuális megközelítésével szemben egy pontosabb, hidrodinamikai alapú medertranszformációs számítás, ami jelentősen növelheti az előrejelzés jóságát. A közel két és fél év tapasztalatai alapján, a Dunán a két módszer közel azonos teljesítményt mutat (1. Táblázat), az általuk számított előrejelzések négyzetes középhibája csak milliméterekben tér el, többnyire a kaszkádmódel javára.

1. Táblázat: A vízállás előrejelzés négyzetes középhibái Budapestnél a 2021, 2022, és 2023 években, 1-6 napos időelőnyre

módszer	1 nap	2 nap	3 nap	4 nap	5 nap	6 nap
2021 (01.01.-12.31.)						
DLCM	4,479	12,54	21,11	27,08	31,84	35,23
1D	4,55	13,94	22,85	28,91	33,96	37,25
2022 (01.01.-12.31.)						
DLCM	3,526	9,388	14,15	20,54	25,75	28,99
1D	4,206	11,34	16,11	21,14	25,88	28,97
2023 (01.01.-05.02.)						
DLCM	3,633	9,787	18,08	25,06	29,57	31,94
1D	4,588	10,59	17,71	26,18	31,50	33,70

Az eltérés oka feltehetőleg a két módszer eltérő hibakorrektúrája. Míg az 1D modell az előrejelzés időpontjában számolt hibát konstansként végigviszi a teljes időelőnyön, addig a kaszkádmódel finomultabb korrekciós eljárásai változtatják a hiba mértékét a vízjárás függvényében. Ezen eljárások áttemelése az 1D modellbe folyamatban van.



2. ábra: Az OLSER Tisza részmodellje

Jelen dolgozat célja a Tisza modell építése során tapasztalt nehézségek és kihívások ismertetése, és az aktuális eredmények bemutatása.

ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

Alapegyenletek

Az OVSZ által fejlesztett 1 dimenziós hidrodinamikai modell a Saint Venant egyenletrendszer az implicit Preissmann séma Verwey-féle változatával diskretizálja, és a végül linearizált egyenletrendszer a double sweep módszerrel oldja meg (Preissmann 1961, Abbott 1979, Cunge et al. 1980, Abbott és Basco 1989).

A folytonossági egyenlet ismert alakja:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

A dinamikai egyenlet:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + S_f + S_e \right) = 0 \quad (2)$$

Ahol h a vízmélység [m], Q a vízhozam [m^3/s], β a momentum korrekciós együttható [-], B a vízfelszín szélessége [m], A a nedvesített szelvényterület [m^2], Δx a keresztaszelvények távolsága [m], Δt az időlépés [s], g a nehézségi gyorsulás [$\approx 9.80665 \text{ m/s}^2$], S_0 a fenékesés [-], S_f a súrlódásból származó esés [-], S_e az energiavonal kontrakcióból és expanzióból származó esése [-], K a vezetőképesség [m^3/s], R a hidraulikus sugár [m], q a hozzáfolyás [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$].

A vezetőképesség, a súrlódásából származó esés, és az energiavonal esése az alábbiak szerint írható fel:

$$K = kAR^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

$$S_f = \frac{Q|Q|}{K^2} \quad (4)$$

$$S_e = \frac{K_{ec}}{2g} \frac{\partial \left(\frac{Q}{A} \right)^2}{\partial x} \quad (5)$$

Ahol k a meder simasági tényezője [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$], K_{ec} az expanziós vagy kontrakciós együttható [-].

A parciális deriváltak diszkrétizálása a Preissmann séma szerint:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \theta \frac{f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1}}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{f_{i+1}^j - f_i^j}{\Delta x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \psi \frac{f_i^{j+1} - f_i^j}{\Delta t} + (1 - \psi) \frac{f_{i+1}^{j+1} - f_{i+1}^j}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\bar{f} \approx \frac{\theta}{2} (f_{i+1}^{j+1} + f_i^{j+1}) + \frac{1 - \theta}{2} (f_{i+1}^j + f_i^j) \quad (8)$$

Ahol θ és ψ súlyszámok [-], értékük 0 és 1 közötti.

Verwey a dinamikai egyenlet nemlineáris tagjainak kompakt és robusztus közelítését javasolta. A konvektív gyorsulás az ő felírása szerint:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) \approx \beta \left[\theta \frac{Q_{i+1}^j \times Q_{i+1}^{j+1}}{\Delta x \cdot A_{i+1}^{j+1/2}} - (1 - \theta) \frac{Q_i^j \times Q_i^{j+1}}{\Delta x \cdot A_i^{j+1/2}} \right] \quad (9)$$

A fenéksúrlódás:

$$gA \frac{Q|Q|}{K^2} \approx g \left[\psi \cdot A_{i+1}^{j+1/2} \frac{Q_{i+1}^{j+1}|Q_{i+1}^j|}{(K_{i+1}^{j+1/2})^2} + (1 - \psi) \cdot A_i^{j+1/2} \frac{Q_i^{j+1}|Q_i^j|}{(K_i^{j+1/2})^2} \right] \quad (10)$$

A double sweep módszer egy széles körben elterjedt eljárás lineáris egyenletrendszerek megoldásához. A diszkrétizált alapegyenletünket átrendezzük úgy, hogy megkapjuk az ismeretlen pentadiagonális mátrixát $(Q_{i+1}^{j+1}, h_{i+1}^{j+1}, Q_i^{j+1}, h_i^{j+1})$, és az ismert változók vektorát $(Q_{i+1}^j, h_{i+1}^j, Q_i^j, h_i^j)$. Általános vektoriális alakban a linearizált rendszer így írható fel:

$$\bar{P} \cdot \bar{f}_i^{j+1} = \bar{E}_i^j \quad (11)$$

Ahol $\bar{f}_i^{j+1} = \begin{bmatrix} Q_i \\ h_i \end{bmatrix}^{j+1}$ és $\bar{E}_i^j = \begin{bmatrix} E1_i \\ E2_i \end{bmatrix}$, \bar{P} az együtthatómátrix. A módszer két új egyenlet bevezetését igényli, ezek:

$$Q_i^{j+1} = F1_i h_i^{j+1} + G1_i \quad (12)$$

$$h_i^{j+1} = P1_i Q_{i+1}^{j+1} + Q1_i h_{i+1}^{j+1} + R1_i \quad (13)$$

Ahol $F1$, $G1$, $P1$, $Q1$, és $R1$ a linearizált együtthatókból származtatható rekurzív változók. A számítás minden részlete megtalálható Cunge et al. (1980) és Abbott és Basco (1989) munkáiban.

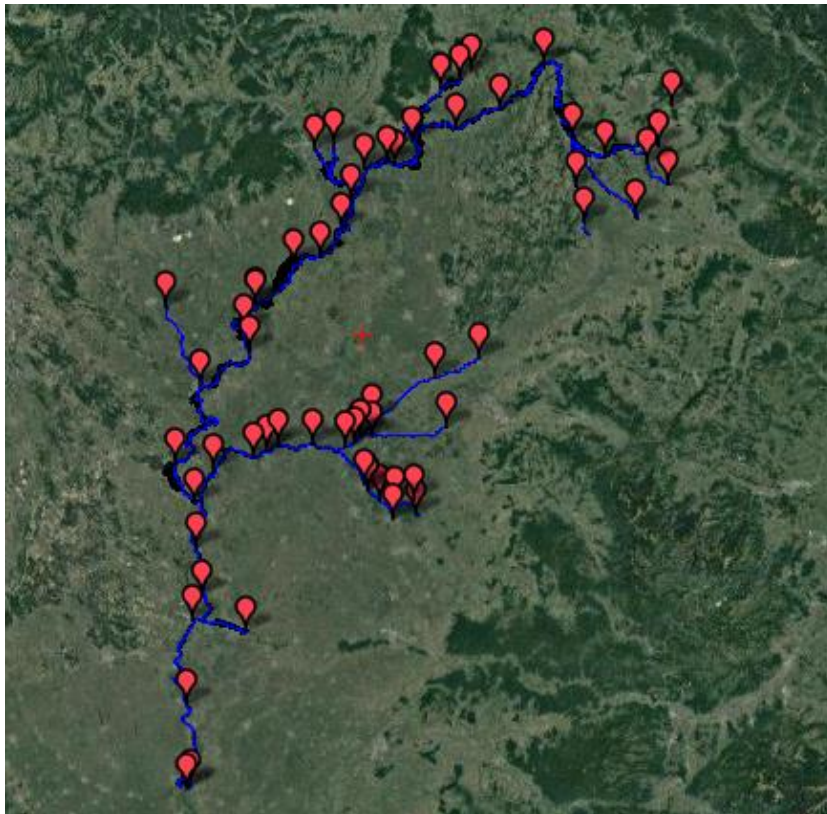
Az alapegyenletek megoldásán túl a modell számos kiegészítést tartalmaz, ezek például:

- a keresztaszelvény adatok feldolgozása és kezelése,
- a komplex topológiák kezelése a csomóponti törvények segítségével,
- érdekességek hosszirányú és vertikális változásának leírása,
- a kiszáradt meder kezelése szelvényterület megtartó Abbott-slot segítségével (Abbott és Basco 1989),
- a rohanó vízmozgás számítása a lokális parciális inercia módszerrel (Fread és Lewis 1998),
- a műtárgyak számítása hidraulikai összefüggésekkel,
- a mért vízállás adatok hosszmentén folytonos asszimilációja és hibakorrekció,
- párhuzamos számítás többmagos számítógépeken,
- és autokalibrációs eljárás egy mesterséges neurális háló segítségével, ami az észlelések alapján számolt hibák és az érdekességek közötti kapcsolat felállításával optimalizálja a modellt.

Felhasznált adatok

Az 1D hidrodinamikai modellnek két fajta adatszükséglete van, egyik a keresztaszelvények adatbázisa, a másik pedig egy vízrajzi adatbázis a mellékfeltételek előállításához. A keresztaszelvények nyers adatai a TÁREK rendszerben üzemelő HEC-RAS modellből származnak, de ezek a feldolgozás során átesnek egy automatikus ellenőrzésen, ami

kiválasztja az előírt sűrűségű szelvényeket, levágja a felesleges szelvényvégeket, kijelöli a középvízi meder határait, valamint a hullámtérhez tartozó átlagos szintet. A feldolgozási folyamat során előáll egy több dimenziós mátrix, amely szelvényenként tartalmazza a későbbi számításhoz szükséges hidraulikai paramétereket 25 cm-es vertikális felosztással. Így az olyan egyszerű változók meghatározása, mint például a nedvesített szelvényterület, vagy a hidraulikus sugár, nem igényel összetett számítási műveletet, csak két érték kiolvasását a mátrixból és a köztük történő lineáris interpolációt a tényleges vízszint alapján. Ez jelentős mértékben gyorsítja a számítási algoritmust, és közben a vertikális egyszerűsítés sem ront az eredményeken.



3. ábra: A modellezett vízrendszer vázlatos helyszínrajza (piros jelölők - vízmércék)

A modell a helyszínrajzi vonalvezetés megadását nem igényli, mert a keresztaszelvények pontjainak koordinátáiból ábrázolni tudja a folyórendszert (3. ábra), az ágak kiosztását és a kapcsolódásukat a modellező a vezérlő fájlban definiálja.

A Tisza modell jelenleg 4220 szelvényt tartalmaz, az átlagos szelvénytávolság a Tiszán 100-200 méter, a mellékfolyókon 300-1000 méter. A modellezett vízrendszer az alábbi folyószakaszokat tartalmazza:

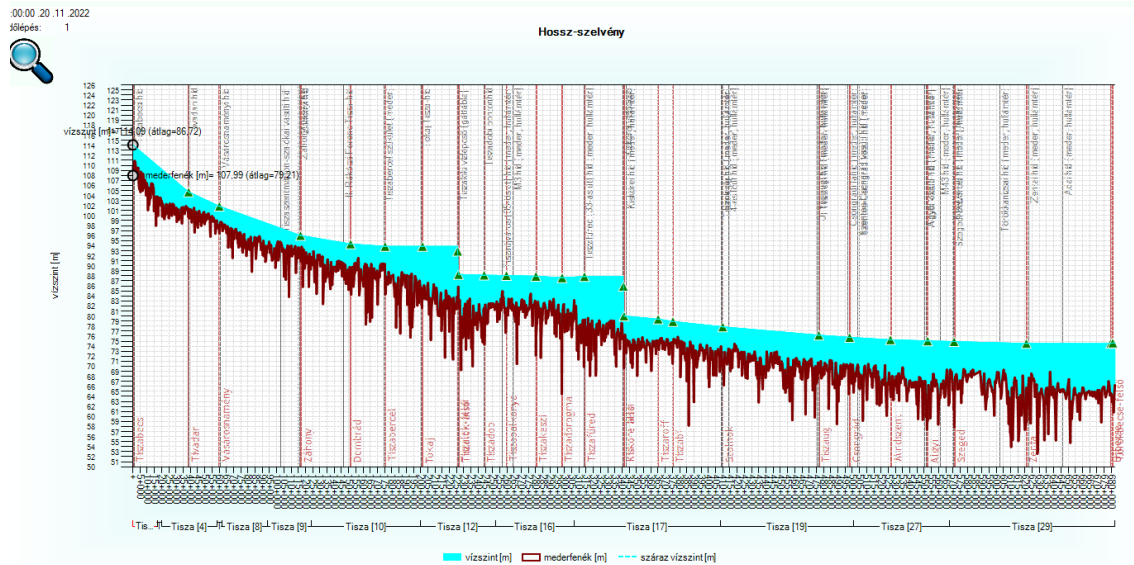
2. Táblázat: A modellezett vízrendszer szakaszai

#	név	fkm-től	fkm-ig
0	Tisza	727,2	744,3
1	Borzsa	0,87	32,07
2	Tisza	724,024	727,2
3	Túr	0,089	29,808
4	Tisza	685,8	724,024

5	Szamos	0,142	49,996
6	Tisza	682,4	685,8
7	Kraszna	0,375	46,205
8	Tisza	650,897	682,4
9	Tisza	620	650,897
10	Tisza	544,607	620
11	Bodrog	0,88	47,74
12	Tisza	492	544,607
13	Sajó	31,631	51,172
14	Hernád	0,1	25,198
15	Sajó	0	31,631
16	Tisza	437,594	492
17	Tisza	335,706	437,594
18	Zagyva	0,06	54,947
19	Tisza	243,395	335,706
20	Berettyó	0,134	68,193
21	Sebes-Körös	14,399	54,799
22	Sebes-Körös	0,102	14,399
23	Fekete-Körös	0,094	20,4
24	Fehér-Körös	0,149	4,796
25	Kettős-Körös	0,096	37,316
26	Hármas-Körös	0,8	91,2
27	Tisza	176,86	243,395
28	Maros	0,076	24,5
29	Tisza	61,728	176,86

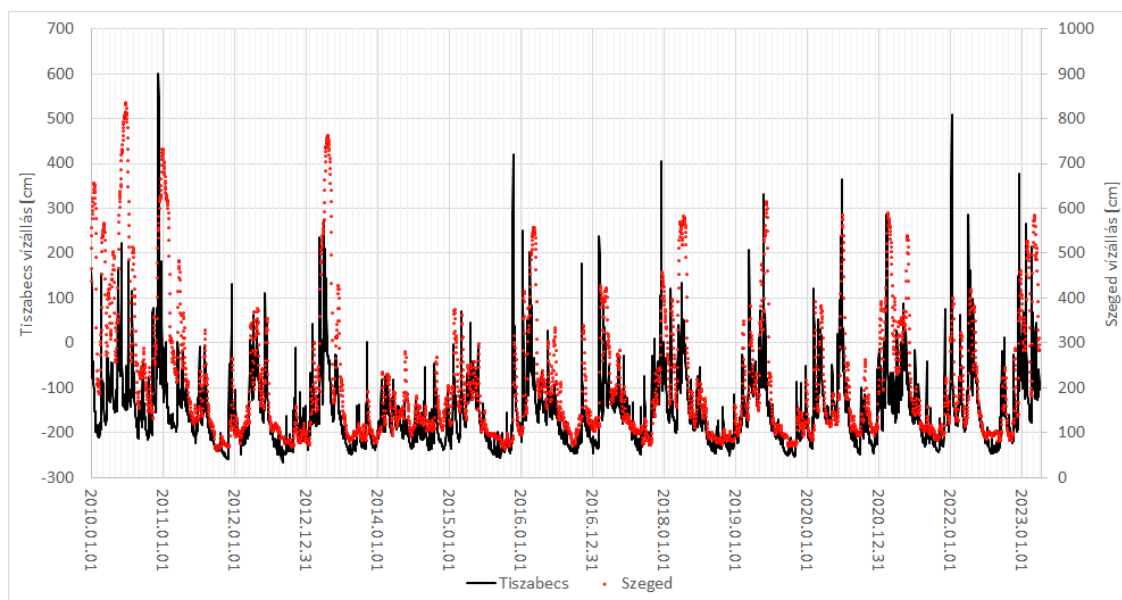
A modell a Tiszán Tiszabecstől a törökbecsei duzzasztóig tart, és tartalmazza valamennyi lényeges mellékvízfolyás hazai szakaszát az országhatárhoz legközelebb eső magyar mérceszelvényig. A ritkább szelvénykiosztás mellett az egyszerű modellszerkezet is azt a célt szolgálja, hogy a számítást minden esetben stabilan, minél nagyobb időlépcsővel el lehessen végezni. Mivel nem esettanulmányról, hanem egy operatíván használt eszközről van szó, így fontos kritérium a robusztusság és a számítási sebesség, ha több változat gyors kiértékelésére van szükség.

A Tisza modell által felvázolt hossz-szelvényét a felső és alsó határfeltételek, Tiszabecs és Törökbecse között a 4. ábra szemlélteti:



4. ábra: A Tisza hossz-szelvénye a modellben Tiszabecs és Törökbecse között

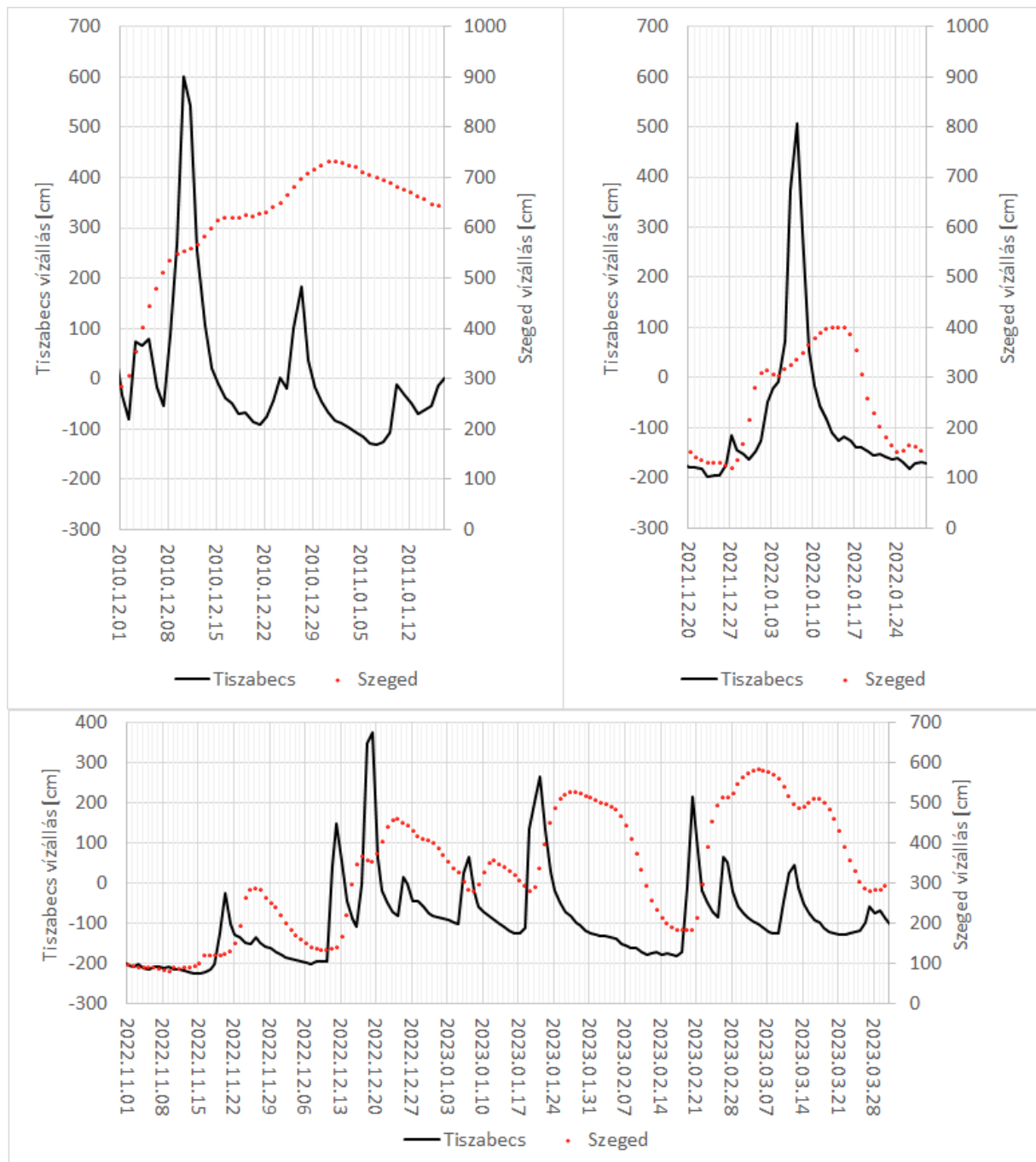
A vízrajzi adatok a modell számára közvetlenül hozzáférhetőek, mert az OVSZ operatív adatokat tartalmazó bináris állományait eléri, így azokból 1994-től tud idősorokat kiolvasni. A modellépítés során 3 különálló időszakot vizsgáltunk: 2010. december, 2021. december, és egy hosszabb időszak több árhullámmal 2022. november 20-tól 2023. március végéig. Nem különböztettünk meg hagyományos értelemben vett kalibrációs és validációs időszakokat, mert az elmúlt 13 évben (5. ábra) a vízgyűjtő az összetett hidrológiája miatt számos egymástól eltérő nagyvízi helyzetet teremtett, így valamennyi új információt először a modell igazolásához, majd további bearányosításához használtunk fel.



5. ábra: A tiszabecsi és szegedi vízállások időszora 2010. január és 2023. március között

A három kiválasztott időszakot a 6. ábra mutatja, és ezen látható, hogy a magas tiszabecsi tetőző vízállás nem feltétlenül jelent magas szegedi tetőzést, a mellékvízfolyások hatása számottevő. Ez a 2022-2023 időszakban a leglátványosabb, amikor a több egymás után

levonuló árhullám egyre alacsonyabb tiszabecsi tetőzéséhez egyre magasabb szegedi tetőzés párosult. Tiszabecsnél a fokozatok 300/400/500 cm, Szegednél 650/750/850 cm.



6. ábra: A modell bearányosításához kiválasztott időszakok

Műtárgyak

A Tisza hazai szakaszán a két nagy műtárgyunk, a Tiszalöki és a Kiskörei vízlépcsők mellett, számos olyan építmény található, ami kisebb-nagyobb mértékben hatással van a lefolyási viszonyokra. Ezeket a keresztiszelvények viszonylag nagy távolsága miatt a Saint Venant egyenletekkel nem tudjuk leírni, így itt kiváltjuk az alapegyenleteinket egy egyszerűsített folytonossági egyenlettel, és a műtárgyhidraulika összefüggéseivel, azaz a bukó és zsilip képletek szabad és alulról befolyásolt eseteivel. A modell jelen állapotában 55 műtárgyat

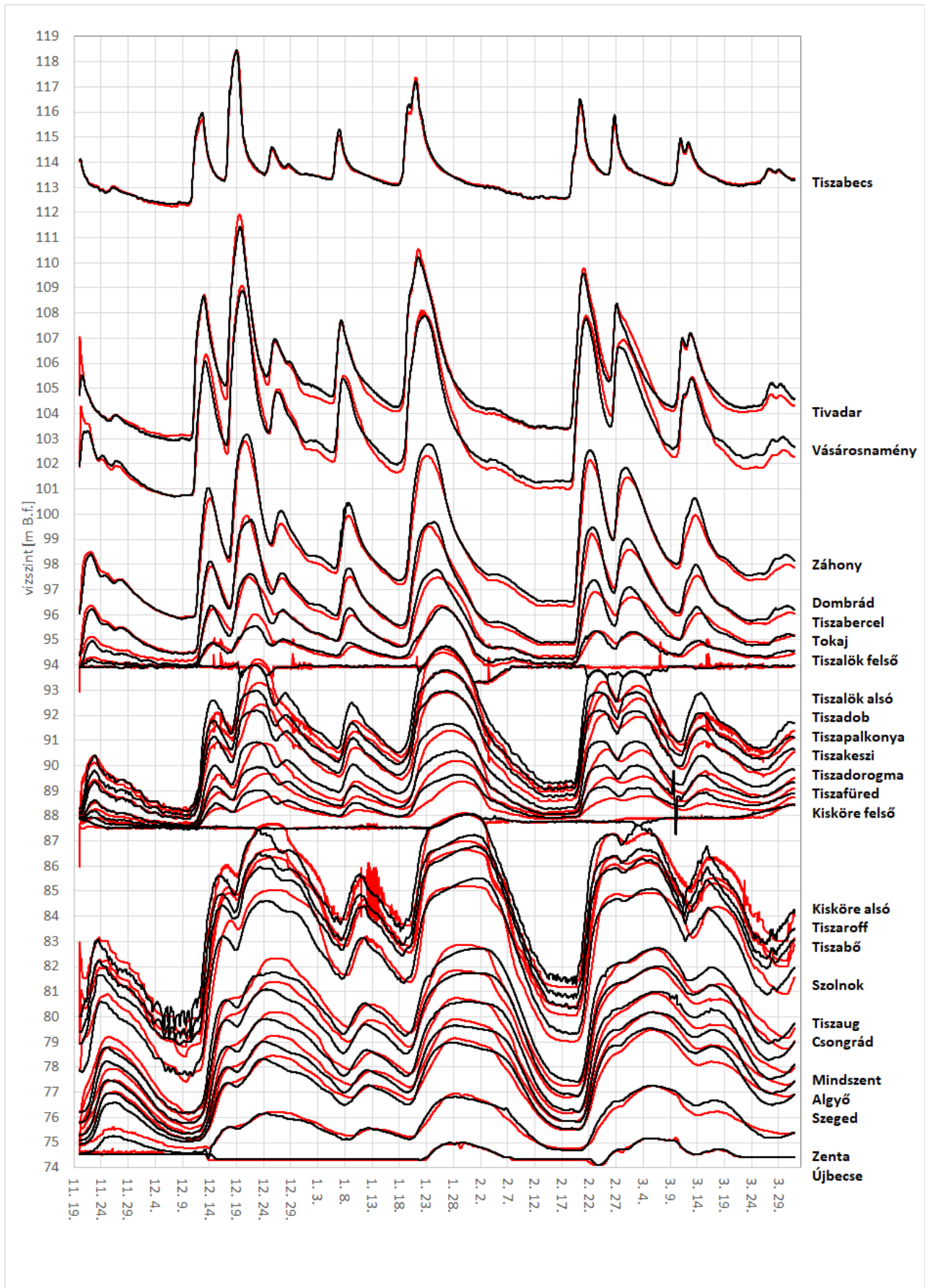
tartalmaz, ebből 9 duzzasztómű, a fennmaradó 46 pedig közúti vagy vasúti híd. A duzzasztóművek az alábbiak:

- Túr nagy-bukó, Túr
- Túr kis-bukó, Túr
- Borzsovai bukó, Borzsa
- Tiszalöki vízlépcső (gáttábla, billenőtábla, vízerőtelep), Tisza
- Kiskörei vízlépcső (gáttábla, vízerőtelep, árapasztó), Tisza
- Békési duzzasztó, Kettős-Körös
- Békésszentandrás duzzasztó, Hármaskörös
- Körösladányi duzzasztó, Sebes-Körös
- Gyulai duzzasztó, Fehér-Körös

A műtárgyak leképezéséhez szükséges azok geometriájának ismerete, és a vízszint-szabályozó műtárgyak esetében elengedhetetlen az üzemi szabályzat is. A két vízlépcsőt komplex műtárgyként kezeli a modell, számítási szelvényeikben összegzi az együtthatók műtárgykepletekből származó értékeit, és a műtárgyak mozgása is összhangban történik. Mivel a számításhoz az egyenleteket nyílásonként írjuk fel, így a modelltől kinyerhető minden nyílás vízhozama és táblamozgása, így pontosan követhető a műtárgyak szimulált viselkedése. Műtárgyaink alapvetően felvízszintet tartanak, így a modell jelenleg ezt tudja kezelni, a paraméterezése a duzzasztási időszakok és a felvízszintek megadásával történik, a táblaállások közvetlen definiálására egyelőre nincs lehetőség. Vízerőtelepek esetén a modell figyelembe veszi, ha adott esés alatt már nincs energiatermelés, esetleg árapasztó céllal a nyílások mégis üzembe állnak, és azt is figyeli, hogy milyen esésnél tud az energiatermelés újra elindulni.

EREDMÉNYEK

A modell eredményeit a vízszint idősorokkal (7. ábra), valamint az egyes idősorok statisztikai jellemzőivel (3. Táblázat) mutatjuk be. Ezek az RMSE, RSR, a hibaszórás, PBIAS, NSE, és NNSE értékek. Az RSR, mint a RMSE mért adatok szórásával normalizált értéke jól mutatja a négyzetes középhiba mértékét az észlelt idősor változásához képest. Így egy duzzasztó felső állomásnál, ahol az idősor szinte állandó, mindössze néhány alkalommal van nagyobb vagy kisebb érték, a négyzetes középhiba alacsony, de az mért idősor szórása is alacsony, így az RSR jobban jellemzi a hibát, mint az RMSE. A PBIAS a felül- vagy alubecslés mutatószáma, míg az NSE, és a 0-1 értéktartományra normalizált NNSE a hidrológia egyik leggyakoribb hatékonysági mutatója.



7. ábra: Mért (fekete) és számított (piros) idősorok a főbb tiszai állomásokon 2022.11.20. és 2023.03.31. között

3. Táblázat: A modell hatékonysági mutatói

állomás	RMSE	RSR	Hibaszórás	PBIAS	NSE	NNSE
Tiszabecs	8,76	0,09	8,42	-0,00033	0,99	0,99
Tivadar	25,01	0,14	24,70	-0,00734	0,98	0,98
Vásárosnamény	33,58	0,18	33,43	0,000235	0,97	0,97
Záhony	29,57	0,17	21,97	0,003692	0,97	0,97
Dombrád	21,25	0,15	19,11	0,00037	0,98	0,98
Tiszabercel	22,29	0,22	22,05	-8,2E-05	0,95	0,95
Tokaj	14,00	0,27	13,87	0,000036	0,93	0,93
Tiszalök-felső	11,69	0,56	11,41	-5,5E-05	0,68	0,76
Tiszalök-alsó	41,80	0,24	33,34	0,001185	0,94	0,94
Tiszadob	29,14	0,19	29,13	0,00003	0,96	0,96
Tiszapalkonya	28,50	0,21	25,81	0,00039	0,96	0,96
Tiszakeszi	39,31	0,37	26,28	0,000847	0,86	0,88
Tiszadorogma	31,24	0,39	23,63	0,000423	0,85	0,87
Tiszafüred	25,27	0,47	18,30	0,000332	0,78	0,82
Kisköre felső	9,05	0,41	9,02	0,00001	0,84	0,86
Kisköre alsó	48,91	0,21	48,90	-1,7E-05	0,96	0,96
Tiszaroff	46,76	0,21	45,86	0,000242	0,96	0,96
Tiszabó	45,48	0,20	45,07	-0,00017	0,96	0,96
Szolnok	47,35	0,21	46,80	-0,0002	0,96	0,96
Tiszaug	38,89	0,20	38,88	0,000036	0,96	0,96
Csongrád	37,30	0,21	35,99	-0,0003	0,96	0,96
Mindszent	33,61	0,20	33,61	-1E-06	0,96	0,96
Algyő	31,69	0,22	31,48	-9,5E-05	0,95	0,95
Szeged	28,74	0,22	28,53	-9,5E-05	0,95	0,95
Zenta	20,56	0,26	20,44	-0,00006	0,93	0,94
Újbecse	4,76	0,20	4,75	0,000012	0,96	0,96
Törökbecse-felső	2,22	0,09	1,21	0,000044	0,99	0,99

A mellékvízfolyások eredményeit jelen dolgozatban nem tárgyaljuk, kalibrációjuk, és az országhatáron túli bővítésük jelenleg is folyamatban van.

DISZKUSSZIÓ

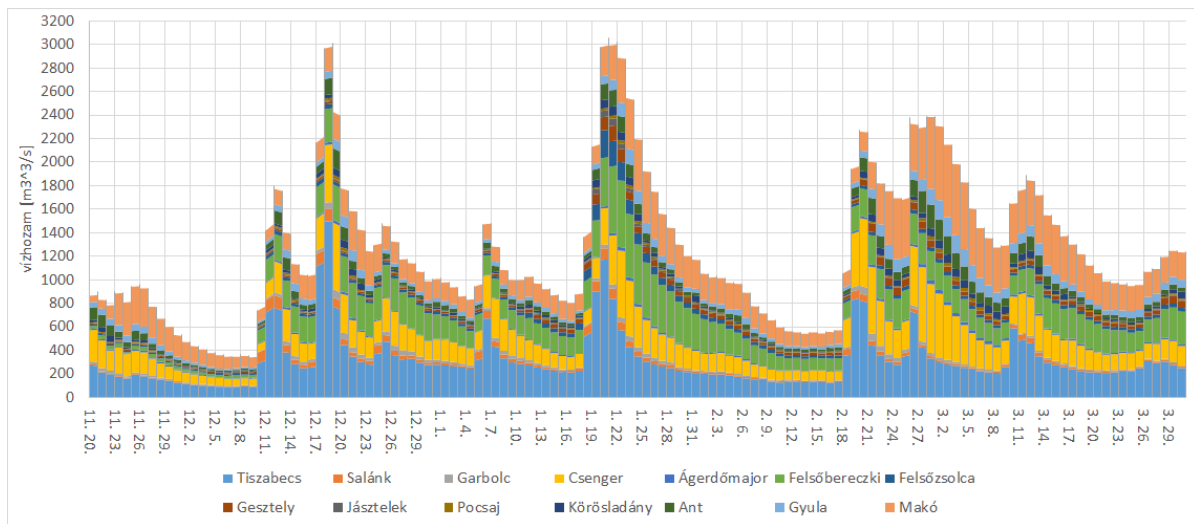
Kihívások és nehézségek

A Tisza vízrendszere átlátható, a mederviszonyok többnyire ismertek, vízmércékkel és adatokkal kellően ellátott, hidrológiája mégis annyira komplex, hogy ilyen nagy kiterjedésű 1 dimenziós modellezése számos nehézséget rejt magában. A Tiszalöki és Kiskörei vízlépcsők meghatározó szerepet játszanak a Tisza haza szakaszának vízjárásában. A mőtárgyak leképezése hidraulikai összefüggésekkel egyértelmű feladat, azonban a mőtárgyon az megy át, ami oda megérkezik, és úgy, ahogy az alvízi viszonyok azt megengedik. Így eljutunk oda, hogy minden mindennel összefügg, például a zentai vízállásra hatással van akár egy rosszul modellezett szakasz a Bodrogon. Így a modell felépítését az alábbi 4 nagy lépésre bontottuk:

1. lépés: a modell felépítése és kalibrációja Tiszabecstől a Tiszalöki vízlépcsőig,
2. lépés: a modell kiegészítése Kisköréig, a Tiszalök és Kisköre közötti szakasz kalibrációja,
3. lépés: a modell kiegészítése Újbecséig, a Kisköre alatti szakasz kalibrációja,
4. lépés: a teljes modell finomhangolása.

Ebben a felosztásban kellő figyelem jutott az egyes szakaszokon lejátszódó részfolyamatokra, és alaposan kiismerhető volt a modell és az észlelések közötti összefüggés.

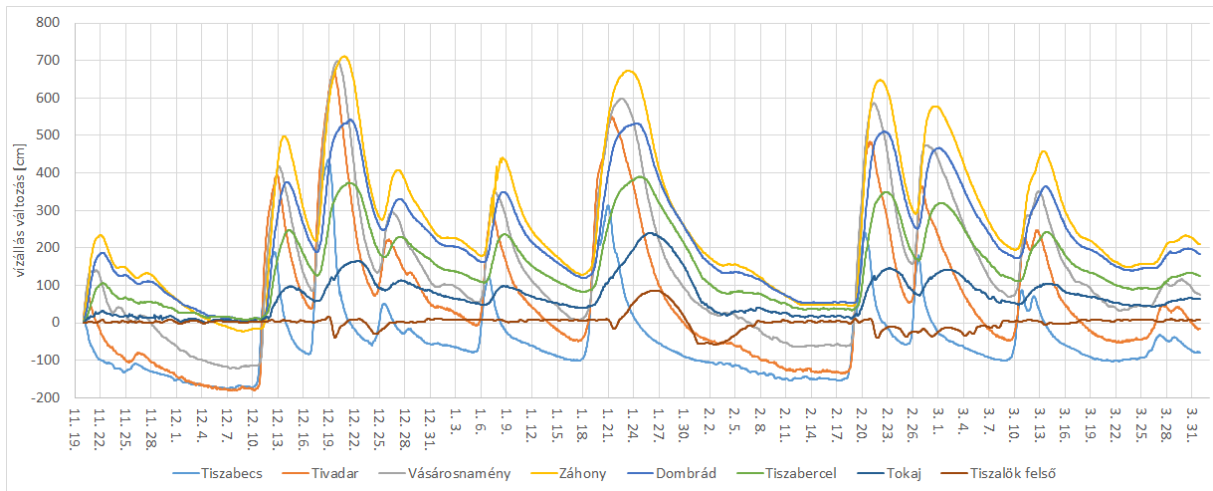
A modell felső peremfeltételein beérkező vízhozamokat a 8. ábra szemlélteti.



8. ábra: Beérkező vízhozamok a felső peremfeltételeken 2022.11.20. és 2023.03.31. között

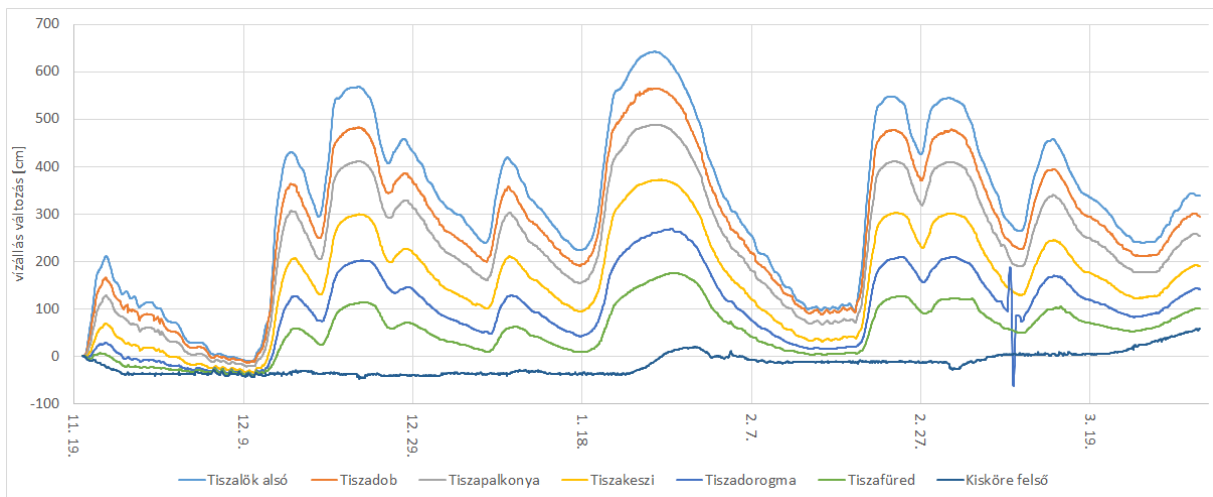
Ha megnézzük a vízállások alakulását Tiszabecstől Tiszalök felsőig (9. ábra), kivonva minden értékből a kezdő vízállást, akkor végig tudjuk követni, hogyan transzformálódnak az árhullámok térben és időben. Az árhullámok legnagyobb amplitúdója Tivadar, Vásárosnamény, és Záhony térségében rajzolódik ki, a 2022. decemberi vizsgált időszakban például 437 cm-es tiszabecsi növekményhez, Tivadarnál 672 cm, Vásárosnaménynál 699 cm, Záhonymnál 712 cm tartozik. Záhony alatt egy erőteljes ellapulás indul meg, Dombrádnál már nincs meg a hegyes tetőzés, az árhullámok csúcsa lekerekedik, és ez a hatás tovább erősödik Tiszalök felé haladva. Az árhullám csúcsának deformációja már kis mértékben Záhonymnál is megfigyelhető. Másik fontos változás az egyes csúcsokat összehasonlítva, hogy míg Dombrádnál a decemberi árhullám magasabban tetőzött, mint a januári, addig Tiszabercelnél már a januári kicsit magasabban, Tokajnál pedig a januári jóval magasabban. Ennek oka, hogy a Bodrog decemberben 300 m³/s körüli csúcs vízhozamot, januárban pedig 580 m³/s körüli tetőző vízhozamot hozott.

Tiszalök felett a Szamos és a Bodrog vízhozama számottevő, míg a többi a Tiszához viszonyítva elenyésző mértékű. Ez indokolja a Záhonyig emelkedő vízállás növekményeket. A Záhony alatti erőteljes ellapulás pedig részben a Tiszalöki vízlépcső visszaduzzasztó hatásának eredménye, ami a hossz-szelvényen (4. ábra) is látható, részben pedig a hullámtéren lejátszódó folyamatok következménye. A Bodrogon érkező nagyobb januári árhullám így Tokajnál már meg is fordítja az arányokat, és ennek a visszaduzzasztó hatása Tokaj felett is megmutatkozik. Hasonló a helyzet Csongrádnál és Szegednél, a Hármaskörös és a Maros torkolatánál is.

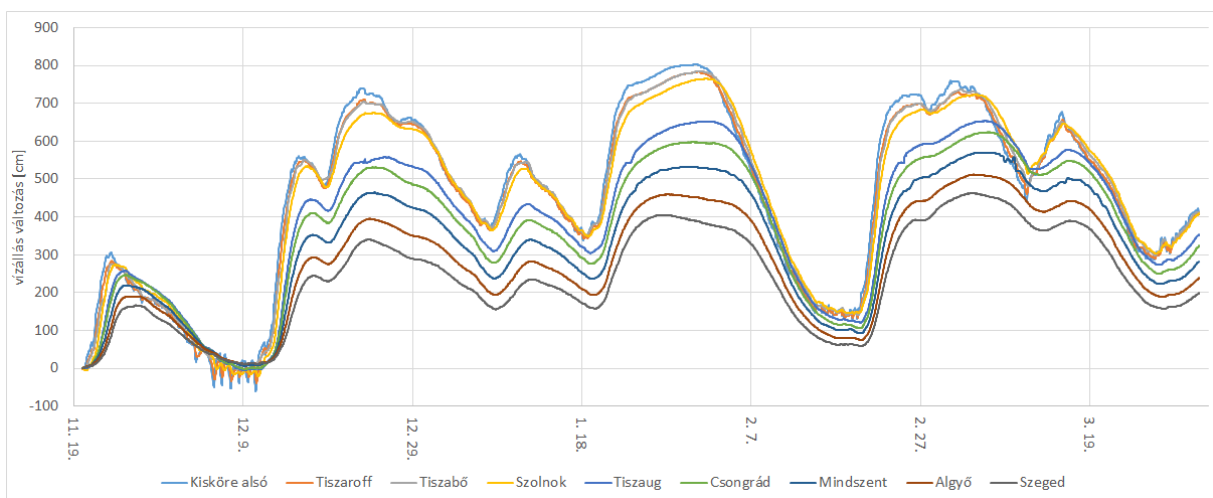


9. ábra: Vízállások változása Tiszabecstől Tiszalök felsőig 2022.11.20. és 2023.03.31. között a kezdőértékhez viszonyítva

A Tiszalök és Kisköre közötti, valamint a Kisköre alatti vízszintváltozásokat a 10. ábra és a 11. ábra szemlélteti:



10. ábra: Vízállások változása Tiszalök alsó és Kisköre felső között 2022.11.20. és 2023.03.31. között a kezdőértékhez viszonyítva



11. ábra: Vízállások változása Kisköre és Szeged között 2022.11.20. és 2023.03.31. között a kezdőértékhez viszonyítva

Egy másik jelentős hatás, ami magyarázatot ad az árhullámok ellapulására, az a hidak jelenléte. A hidak különféleképpen hatnak a folyóra annak függvényében, hogy meder-, hullámtéri pillérek milyen méretűek, mennyi van belőlük, és a hídfők kialakítása mennyiben szűkíti a keresztmetszényt, sőt szélesebb hullámtér esetében az út egy szakaszon töltésben megy, amin nem minden esetben vannak ártéri nyílások. Ezt a Saint Venant egyenletek le tudják írni, de olyan sűrű keresztmetszvény kiosztást igényelne, ami ezeket a geometriai változásokat jól jellemezné. Ez lokálisan magas CFL számot eredményezne, így nem tenné lehetővé nagy időlépés használatát. A modellezési gyakorlatban elterjedt a hidak leírása hidraulikai összefüggésekkel a műtárgyakhoz hasonlóan, így megtartható a nagy időlépcső és szimulálható a hidak hatása is. Ezen elv mentén a hidakat a zsilip képlet segítségével írtuk le, nyílásaik alsó része maga a meder, egészen a hídfők által behatárolt szélességig. Ez tovább bővíthető az ártéri nyílások szelvényterületével. A képletben a kontrakciós tényező a mederfenékhez közeledve nő, így kisvízes időben a hidaknak nincs visszaduzzasztó hatása.

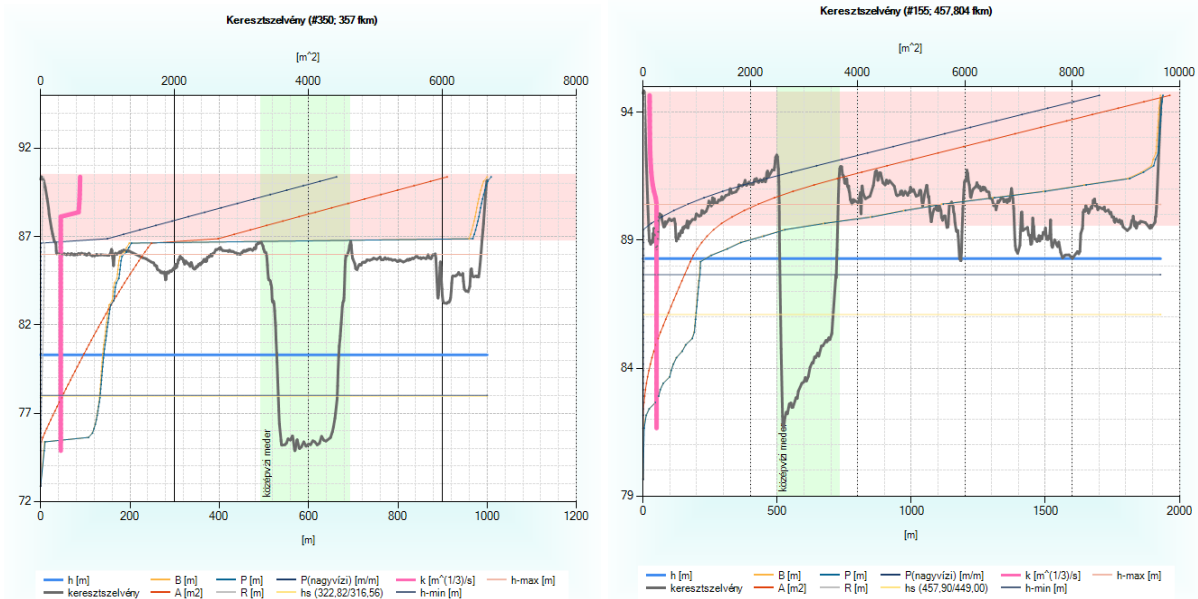


12. ábra: Folyókanyarulat Martfűnél (fekete vonal - keresztmetszvények, kék felület - számított vízfelszín)

Az 1D megközelítés jelentős elhanyagolásokat jelent, mert a Tisza helyenként meanderező medre (12. ábra), kiszélesedő, majd összeszűkülő nagyvízi szelvénye, továbbá a hullámtér jellegzetességei, területhasználati viszonyai nem írhatóak le egy egyszerű hosszirányú hidrodinamikai modellel. Ezek leképezését több módszer segítségével valósítottuk meg:

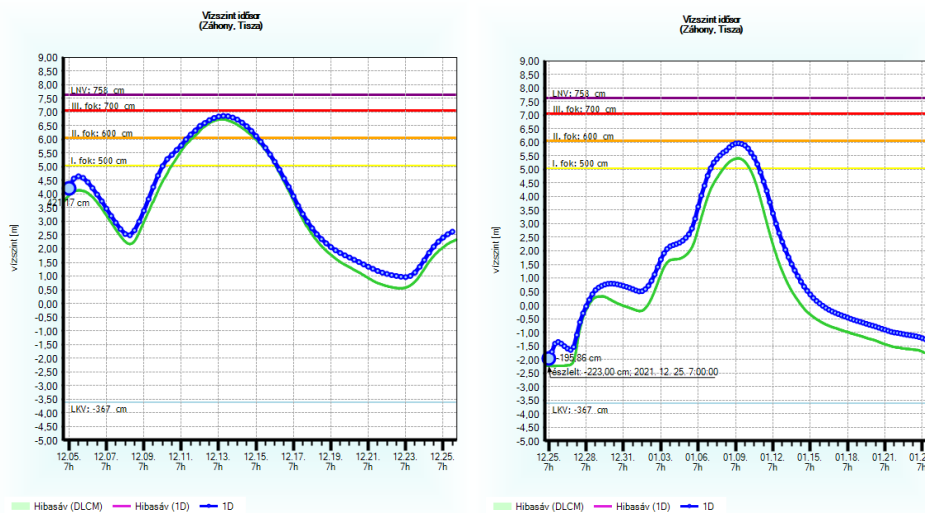
- A keresztmetszvények automatikusvágása a partélek mentén, úgy hogy a hullámtéri részek csak a partél feletti vízszint esetén lépnek be a vízszállításba. Ezt a megkötést helyenként elengedtük, így a hullámtér hamarabb részt vesz az árhullámok levezetésében (13. ábra).

- A keresztmetsvények távolsága, az alapegyenleteink dx változója (1. és 2. egyenletek), alap esetben a szomszédos szelvényekhez tartozó szelvénytávolságokból következik. Azonban meanderező folyó esetén a nagyvízi sodorvonal rövidebb, így az árhullámok csúcsa gyorsabban halad. Ezért a dx távolságot a vízszint függvényeként kezeltük, alapértékétől egészen a két szomszédos szelvény legközelebbi pontjainak távolságáig terjedően.
- Az expanziós és kontrakciós veszteségek tényezője (K_{ec}) (5. egyenletben) szintén jelentősen befolyásolja az árhullámok haladási sebességét. Próbaszámítások után szűkületeknél 0,05, bővületeknél -0,25 értéket használtunk.



13. ábra: Keresztmetsvények parténél levágott (balra), és folyamatos (jobbra) hidraulikai jellemzőkkel

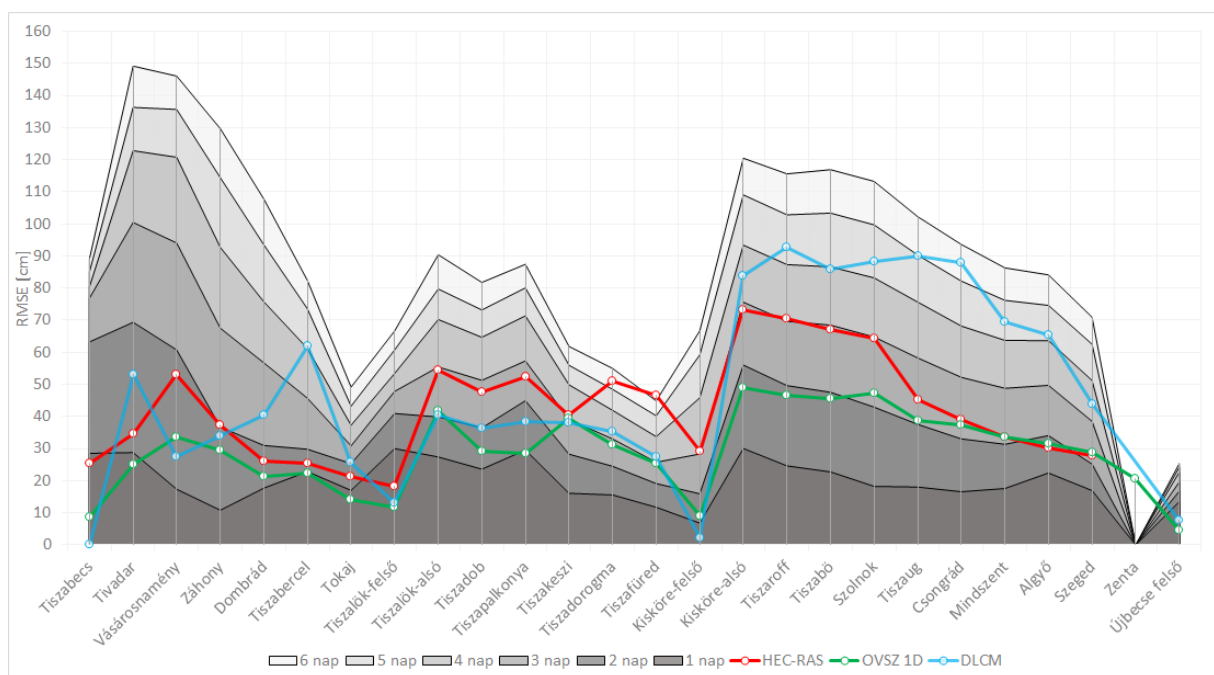
Mindemellett a Tisza esetében számottevő medersüllyedés figyelhető meg. A 2010. decemberi, a három közül a legnagyobb árhullámra végzett kalibráció eredménye így jelentős javításra szorult. A modell a 2021. decemberi időszakban Záhonynál a vízállásokat szinte konstans módon 65 cm-rel túlbecsülte (14. ábra).



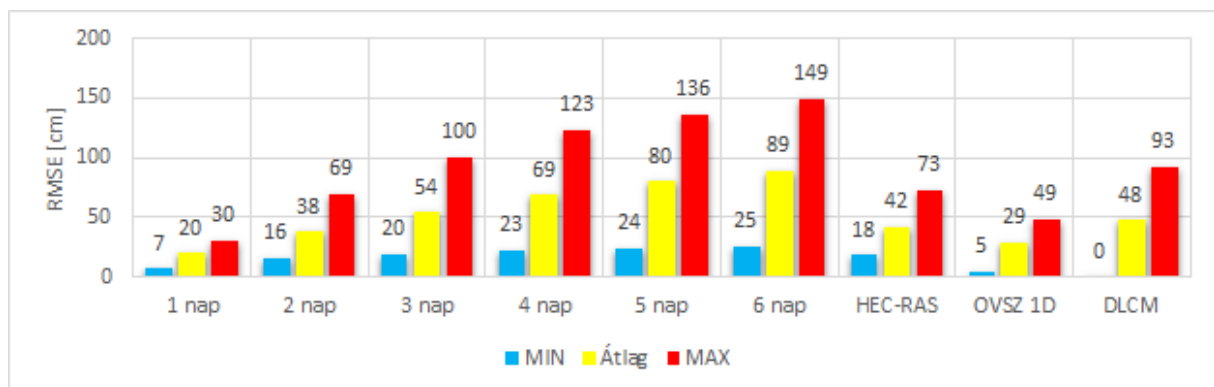
14. ábra: 2010-es kalibráció eredménye Záhonynál (balra), ugyanezzel a modellel a 2021. december (jobbra) Záhonynál

Összehasonlítás az OLSER és a HEC-RAS eredményeivel

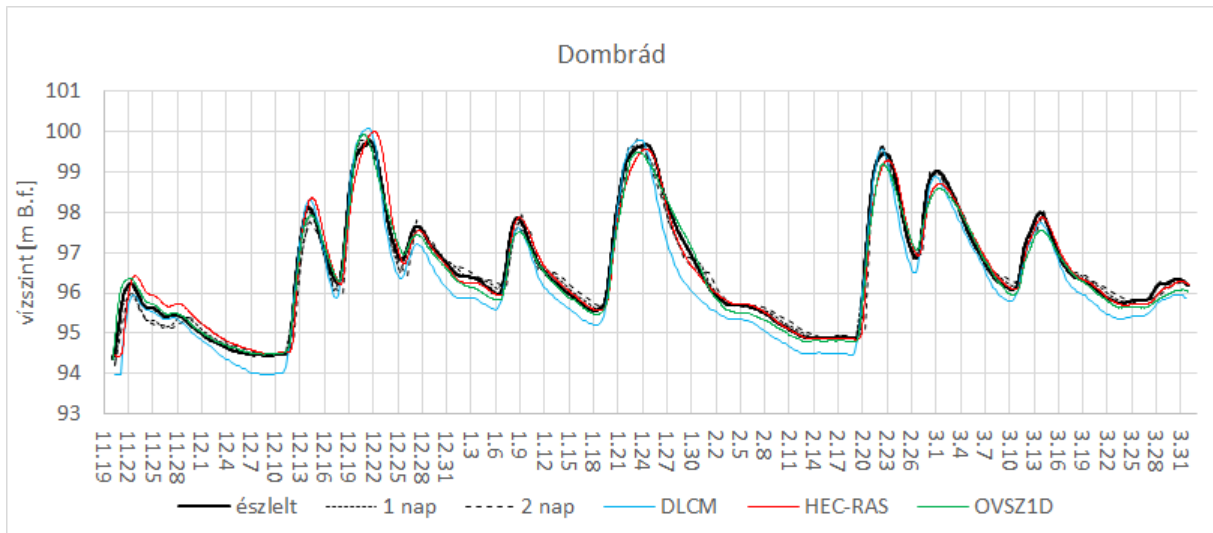
A modell eredményeit összevetettük a HEC-RAS modell eredményeivel, és az OLSER eredményeivel (15. ábra és 16. ábra). A HEC-RAS modellt a KÖTIZIVIZG bocsátotta rendelkezésünkre, ezt változtatás nélkül, az adott időszakra vonatkozó peremfeltételekkel, valamint tiszalöki és kiskörei üzemrendekkel futtattuk. Az OLSER-ből kétféle adatot vettük ki, az egyik az adott időpontra számított és archivált előrejelzések négyzetes középhibái 1-6 napos időelőnyvel, a másik pedig csak az OLSER medertranszformációs moduljával, a diszkrét lineáris kaszkádmoddellel (DLCM) futtatott szimuláció eredménye az 1D modellekkel is vizsgált szakaszon. Így a grafikonon látszik a háromféle medertranszformációs modell eredménye, valamint az, hogy előrejelzési helyzetben a meteorológiai előrejelzések, az észlelések asszimilációja, és a hibakorrekció milyen mértékben határozzák meg az előrejelzett vízállásokat.



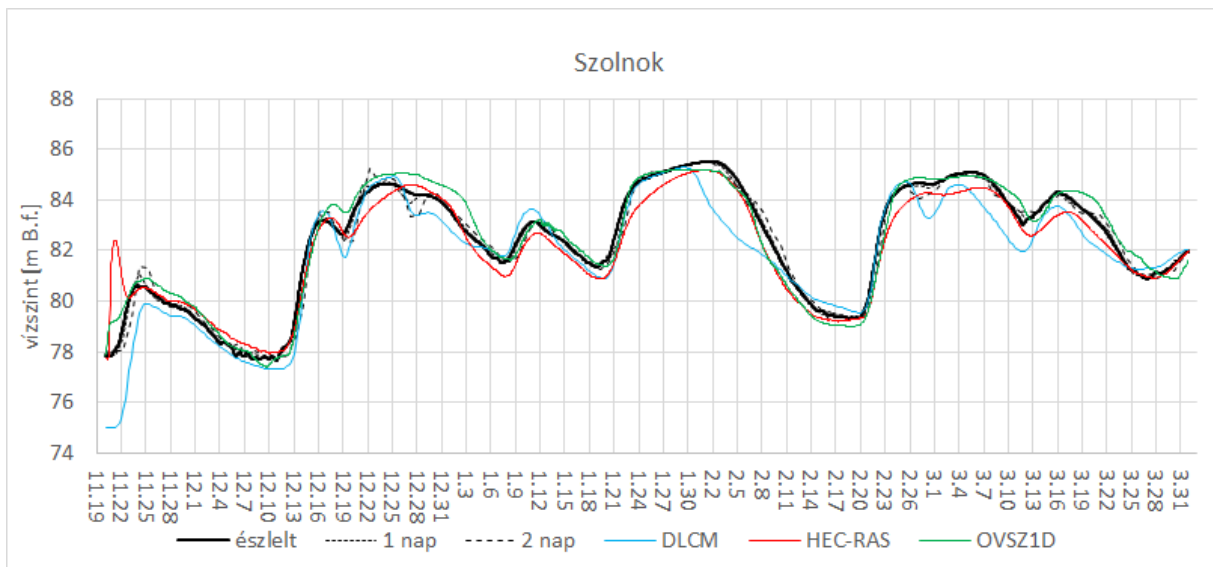
15. ábra: Az OLSER által számított előrejelzések, DLCM, HEC-RAS és OVSZ 1D modelleredmények négyzetes középhibája 2022.11.20. és 2023.03.31. között



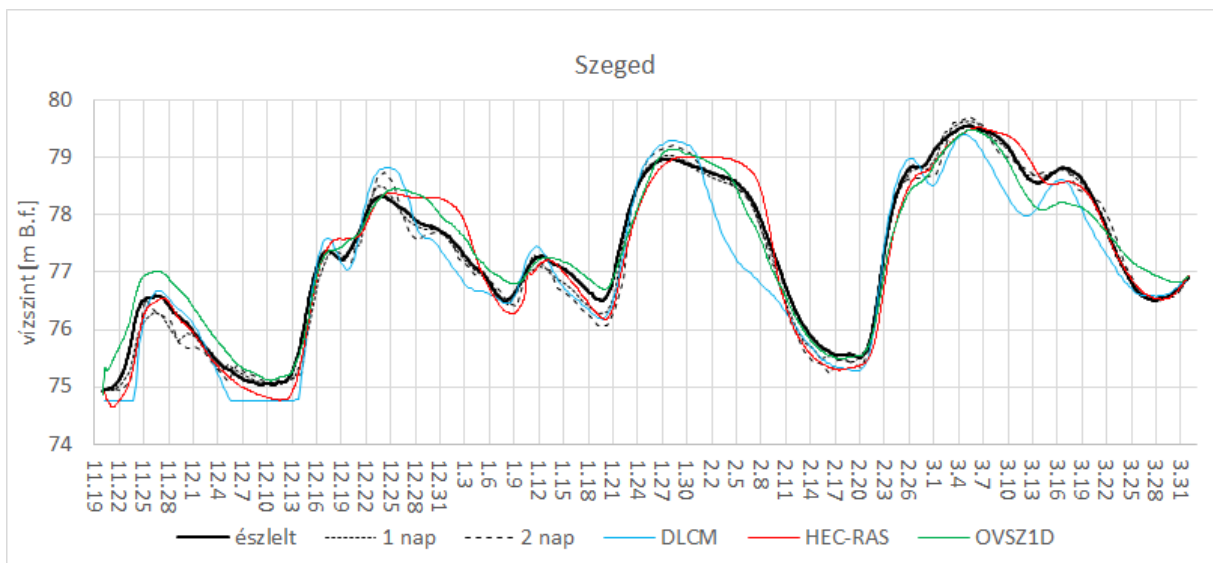
16. ábra: Legkisebb, legnagyobb és átlagos négyzetes középhiba a Tisza teljes vizsgált szakaszára 2022.11.20. és 2023.03.31. között



17. ábra: Észlelt és számított vízszintek a Tiszán Dombrádnál 2022.11.20. és 2023.03.31. között

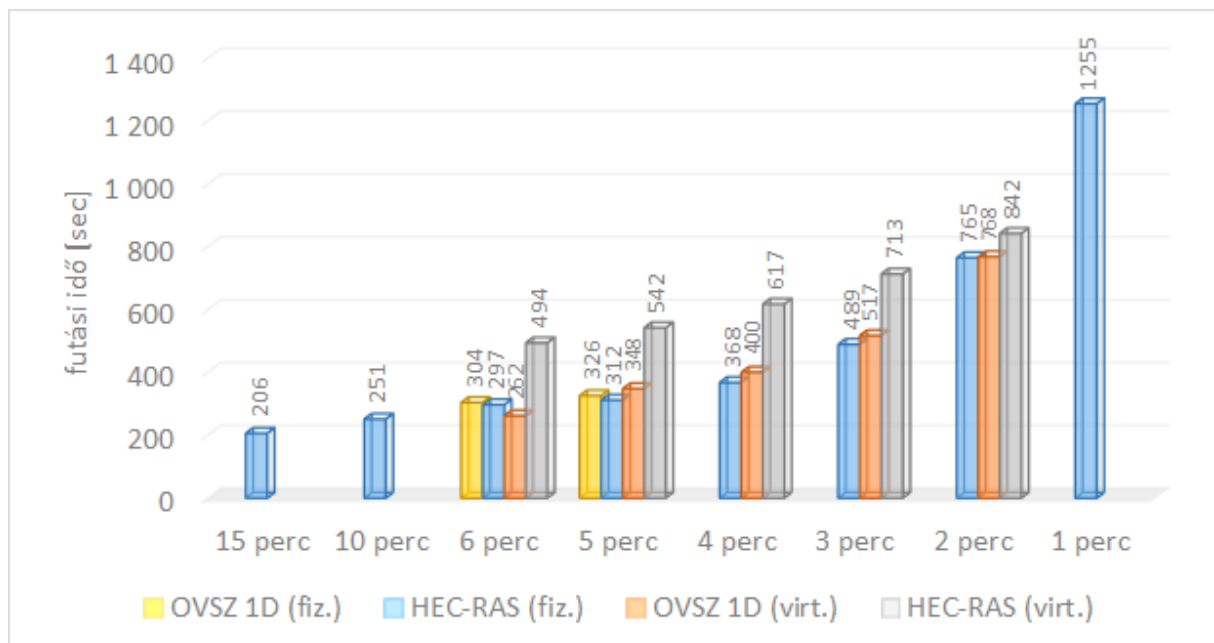


18. ábra: Észlelt és számított vízszintek a Tiszán Szolnoknál 2022.11.20. és 2023.03.31. között



19. ábra: Észlelt és számított vízszintek a Tiszán Szegednél 2022.11.20. és 2023.03.31. között

A két 1D modell között teljesítményben, azaz a szimuláció sebességében is különbség van (20. ábra). Azonos számítógépen, különböző időlépcsőkkel ugyanarra az időszakra és kiterjedésre futtatott szimulációk esetén a futási idők az alábbiak:



20. ábra: A szimuláció ideje különböző időlépcsők mellett a HEC-RAS és OVSZ 1D modellekkel virtuális és fizikai környezetben

A szimulációt virtuális környezetben végeztük (CPU: Intel Xeon Gold 5218R @ 2.10 GHz 16 mag, Memória: 16,0 GB, Merevlemez SCSI Virtual Disk), ami a HEC-RAS számára nem tűnt ideális választásnak. A fizikai gépen végzett (CPU: Intel i7-4790 @ 3.60GHz, Memória: 16,0 GB DDR3, Merevlemez: Samsung SSD 860 EVO 250GB) szimulációk jelentős gyorsulást mutatnak, ami magyarázható az egy-egy processzormag számítási teljesítményének különbségével és az SSD nagyobb írási sebességével. A HEC-RAS a linearizált alapegyenletek mátrixos alakjának ritka, sávos együttható mátrixát tömöríti, egy ún. skyline tárolási sémát használ (Bathe és Wilson 1976), ami csökkenti a szimuláció sebességét, de nem teszi lehetővé az algoritmus párhuzamosítását.

A DLCM az analitikus megoldás miatt azonnali eredményt jelent, így ebben az összehasonlításban nem szerepel. A HEC-RAS a szimuláció során csak a vízszint és vízhozam eredményeket menti, a továbbiakat egy Post Processor végzi, ami néhány másodperces többletet jelent a szimuláció végén. Az OVSZ 1D modell az együttható mátrix elemeit egy párhuzamos ciklusban, több processzormagot kihasználva tölti fel, hiszen ezek az értékek függetlenek egymástól, de nagyszámú művelet elvégzését igénylik. A gyors szimuláció másik feltétele a lehető legkevesebb számú művelet végzése, ezt a hidraulikai jellemzők minél jobb előkészítésével érhetjük el a keresztiszelvények feldolgozása során. A számítás sebességét viszont nagymértékben lassítják a vízszint-szabályozó műtárgyak, mert ezek algoritmusuk több feltételes elágazást tartalmaz, ami ugyanennyi kifejezés kiértékelését jelenti, ráadásul a szimulált üzemelés adatait is eltárolja.

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen feladat során továbbfejlesztettük a már Dunára kiépített 1D hidrodinamikai modellt, hogy alkalmas legyen a Tisza vízrendszerének modellezésére. A modellt kalibráltuk egy 2010, 2021 árhullám, valamint egy hosszabb 2022-23-as időszak alapján. A modell átlagos négyzetes középhibája a vizsgált időszakban kisebb, mint a HEC-RAS modellel, és a DLCM-mel végzett számítások átlagos RMSE értéke. A folyamatos fejlesztés és a paraméterek finomhangolása elengedhetetlen, ahogy a keresztmetszvény adatok rendszeres felülvizsgálata is fontos követelménye a hosszú távú megbízható üzemelésnek. A szimuláció sebessége és stabilitása is kielégítő, alkalmas arra, hogy az OLSEK rendszer részeként a jövőben támogassa a medertranszformációs számításokat, és hozzájáruljon a pontosabb előrejelzésekhez.

IRODALOMJEGYZÉK

1. Abbott, M., B. (1979): Computational Hydraulics. Pittman Publishing Limited, Boston. London, Melbourne.
2. Abbott, M., B., Basco, D., R. (1989): Computational Fluid Dynamics. Longman Scientific & Technical, Harlow.
3. Bathe, K.J., Wilson, E.L. (1976): Numerical Methods in Finite Element Analysis. Prentice Hall, Upper Saddle River.
4. Cunge, J., A., Holly, F., M., Verwey, A. (1980): Practical Aspects of Computational River Hydraulics. London: Pitman
5. DHI (Danish Hydraulic Institute) (2014): MIKE 11, a modelling system for rivers and channels, Reference Manual. Denmark. Danish Hydraulic Institute (DHI)
6. Fread, D., L., Lewis, J., M. (1998): NWS FLDWAV MODEL. NOAA, Hydrologic Research Laboratory, Office of Hydrology.
7. Kalinin, G., P., Milyukov, P., I. (1957): Raschete neustanovivshego- sya dvizheniya vody v otkrytykh ruslakh On the computation of un- steady flow in open channels. Met. i Gydrolgia Zhurnal, 10, 10 – 18 Leningrad.
8. Liptay, Z., Á., Gauzer, B. (2021): Operational river ice and water temperature forecasting on the Hungarian Danube reach, In: Science and practice for an uncertain future
9. Nash, J., E. (1960): A unit hydrograph study, with particular reference to british catchments. Hydraulics Research Station, Department of Scientific and Industrial Research, p.n. 6433
10. Preissmann, A. (1961): Propagation des intumescences dans les canaux et rivières. First Congress of the French Association for Computation, Grenoble, 433-442.
11. Szilágyi, J. és Laurinyecz, P. (2014): Accounting for Backwater Effects in Flow Routing by the Discrete Linear Cascade Model. Journal of Hydrologic Engineering. 19. 69-77. 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000771.
12. Szilágyi, J. és Szöllősi-Nagy, A. (2008): Streamflow forecasting using a physically based state-space approach to flow routing. Budapest, Budapest University of Technology and Economics.
13. Szöllősi-Nagy, A. (1982): The discretization of the continuous linear cascade by means of state-space analysis. J. Hydrol., 58, 223-236