



## A klímaváltozás lehetséges hatásai a nagy folyóink vízminőségére – a vízminőségi modellezés peremfeltételeinek klímáparaméterezése

Liptay Zoltán, Engloner Attila

Nemzeti Közzolgálati Egyetem, Víz tudományi Kar, liptay.zoltan.arpad@uni-nke.hu

DOI: 10.56474/légkor.2024.K.5

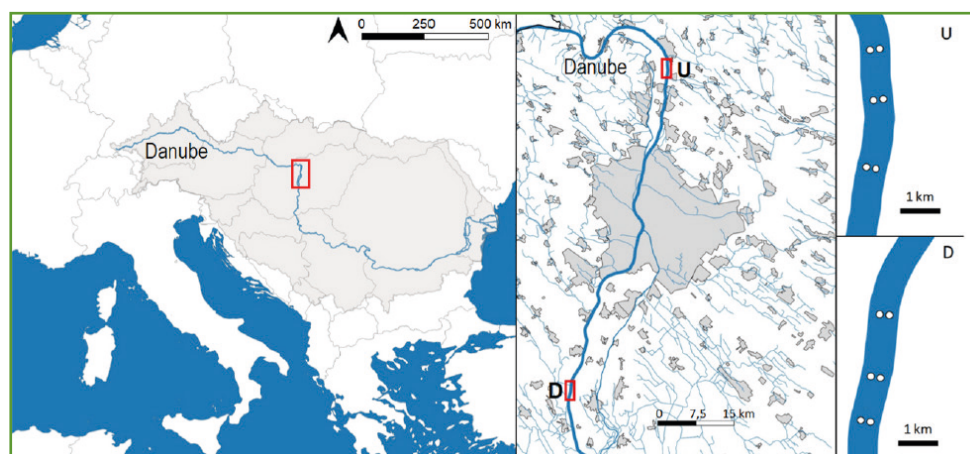
A „Tiszta Ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” elnevezésű projekt keretében többek között 12 hónapon át vizsgálták a Duna vízminőségének változásait Budapest feletti és alatti folyószakaszokon, majd a terepi mérések alapján vízminőségi modellezés is történt. A bearányosított modellek alkalmasak a klímaváltozás hatásainak vizsgálatára. Ehhez a vízhozam és víz hőmérséklet idősorokat két kiválasztott klímascenárió alapján a 2100-as időszakra vetítettük, és a velük elvégzett vízminőségi szimuláció eredményeit összehasonlítottuk a kiindulási eredményekkel. Vizsgáltuk a peremfeltételek hosszú távú kiterjesztésének lehetőségeit, valamint azt, hogy az általunk használt MIKE21FM és EcoLab modell hogyan reagál a peremfeltételek megváltozására.

### The possible effects of climate change on the water quality of our large rivers - climate parameterization of the boundary conditions of water quality modeling

In frame of the „Drinking water: multidisciplinary assessment of secure supply from the source to the consumers” project water quality field measurement were carried out on the Danube for 12 months upstream and downstream of Budapest, and later the measurements were used for building a water quality model. The calibrated models are capable of estimating the effect of climate change. We selected two climate scenarios and projected the discharge and water temperature time series to 2100 and finally compared modelling results to the baseline results. We analysed the possibilities of long term projection of the boundary conditions and compared the changes modelled by MIKE21FM and EcoLab to the conclusions of the field measurements.

A Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal Nemzeti Kiválóság Programjának keretében valósult meg a „Tiszta Ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” elnevezésű projekt, amely az ivóvízbiztonságot veszélyeztető

hatásokat tárja fel partiszűrős rendszereken. A kutatás az ivóvízbázistól kezdve a teljes ellátórendszerre kiterjedt, így többek között 12 hónapon át vizsgálták a Duna vízminőségének változásait Budapest feletti és alatti folyószakaszokon (1. ábra).



1. ábra. A vizsgált területek elhelyezkedése. Baloldalon a Duna vízgyűjtője, középen Budapest és környezete, jobb oldalon pedig a felső (U), és az alsó (D) mintaterület. (Englner et al., 2023).

A vízminőségi adatsorok lehetővé teszik a klímaváltozás lehetséges hatásainak vizsgálatát nemcsak a kutatási időszakra, hanem - megfelelő vízminőségi- és klímamodellek felhasználásával – hosszabb távra is.

A hidrológiai körforgás növekvő intenzitása (Cammalleri et al., 2020; Lhotka et al., 2020; Stagge et al., 2017) miatt kialakuló szélsőséges események újabb kérdéseket vetnek fel. A változó éghajlat azonban nem csak a vizek mennyiségére, és eloszlására van hatással, hanem azok minőségére is, főképp a hőmérsékletfüggő hidrológiai és vízkémiai folyamatok révén. A klímaadaptáció miatt a megváltozó antropogén hatások is befolyásolják a vizeink minőségét. Az elmúlt években számos tanulmány foglalkozott a klímaváltozás vízminőségi aspektusaival. Ilyen például a nitrogénfolyamatok hőmérsékletfüggősége (Gervasio et al., 2022, Liao et al., 2018, Allin et al., 2017, Bernard and Leadley, 2005), vagy a vízhozamok hosszútávú alakulásának becslése (Probst and Mauser, 2023). Munkánk során a terepi mérésekre alapozott numerikus modellel szimuláltuk az oxigén-háztartási, nitrogén és foszfor folyamatokat, majd a bearányosított modellt időben kiterjesztettük a klímaszcenáriókból származtatott hosszú távú változásokkal.

A szakirodalomban számos megközelítést találunk a vízminőségi modellezésre, ezeket átfogóan Ejigu and Amosa (2021) taglalja. Ilyenek például a Telemac 2D és hozzákapcsolható WAQTEL vízminőségi modul (Van et al., 2022; Shettigar et al., 2022), a WASP vízminőségi szimulációs program, ami a HEC-RAS 2D modellel is összeköthető (Shabani et al., 2021), a Delft 3D (Eladawy et al., 2014; Prilop et al., 2014), a CE-QUAL-W2 (Kim et al., 2019, Terry and Lindenschmidt, 2023), az IberWQ (García-Feal, 2020), a RiverFlow2D (Fernández-Pato and García-Navarro,

2021) és a MIKE EcoLab modellje, ami a szoftveren belül tetszőleges hidrodinamikai vagy hidrológiai modellhez kapcsolható (Xu et al., 2023).

A kutatás két fő kérdése, hogy milyen módszerrel lehetséges a vízminőségi modell peremfeltételeit a klímaváltozás alapján újraparaméterezni, és hogy az új idősorokkal elvégzett szimuláció eredményei mennyire követik a terepi mérések során tapasztalt összefüggéseket.

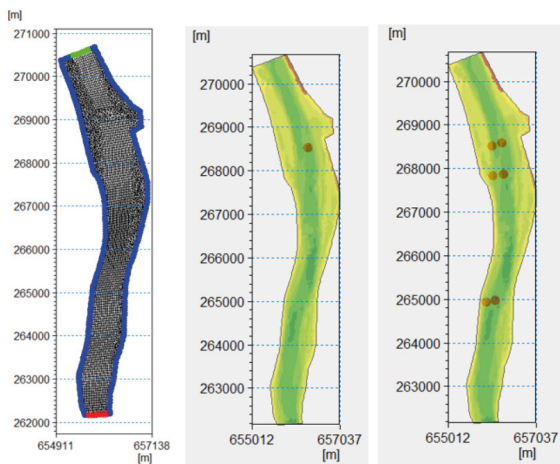
### A hidrodinamikai modell és adatai

Jelen kutatásban a MIKE21 FM modellt használtuk a MIKE EcoLab vízminőségi modullal kiegészítve, a modellépítés a Danish Hydraulic Institute (DHI) közreműködésével történt. A MIKE21 FM 2 a sekélyvízi egyenleteket szabálytalan számítási hálóra írja fel, és a megoldást rugalmas időlépés mellett számítja, így stabilitása és a pontossága is kiváló, rendkívüli skálázhatósága pedig feladatok széles palettájának megoldására teszi alkalmassá. A projekt során a Duna mindkét vizsgált szakaszára készült modellel, de a klímaváltozás hatásainak elemzése során egyelőre csak az északi modellel dolgoztunk (1. ábra, „U” jelű mintaterület).

A modellezett terület 7,7 km<sup>2</sup>, a számítási elemek átlagos oldalmérete 40–60 m, az összes elemszám 5302 (2. ábra). A szimulációs időszak a terepi mérések időszaka, azaz 2019.02.18-tól 2020.02.18-ig. Ezt a 12 hónapot a durvább felbontással a modell viszonylag gyorsan szimulálja, a teljes számítás időigénye 6–7 óra közötti. Az északi terület jellegzetessége a tisztított szennyvíz sodorvonalis bevezetése (2. ábra), ami pontszerű hozzáfolyásként került be a modellbe a szennyvíztisztító által szolgáltatott mennyiségi és minőségi adatok figyelembevételével. A vizsgált szakasz terepi mintavételezési pontjait szintén a 2. ábra mutatja. A 3 pontpárból egy-egy a szennyvízbevezetés

felett és alatt helyezkedik el, a harmadik pedig 3 km-rel délebbre. A pontpárok egy sodorvonal mintavételi pontból és egy partközeli mintavételi pontból állnak. A partközeli mintavétel minden mérésekor az 1 méteres vízmélység függvényében történt, azonban ezt a modellt nem képes kezelni, így egy átlagosan 1 méteres vízmélységű rögzített pont került kijelölésre.

A felépített hidrodinamikai modell két nyitott peremfeltétellel dolgozik, az egyik egy vízhozam típusú felső peremfeltétel, a másik pedig egy vízállás típusú alsó peremfeltétel. Az ezekhez szükséges vízhozam és vízállás idősorokat a Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság szolgáltatta.



2. ábra. A M21FM numerikus modell (balról jobbra: számítási háló, tisztított szennyvíz sodorvonalai beeresztése, mérési pontok).

### A vízminőségi modell és adatai

Az EcoLab modell egy vízminőségi munkafüzet, amiben deklarálhatók meghajtó erők, szabad paraméterek, belső változók és az ezeket összekapcsoló összefüggések. Emellett tartalmaz sablonokat is, amelyek az elmúlt évtizedek szakirodalmára alapozva előre definiálnak bizonyos kérdésköröket. Fontos tulajdonsága, hogy a térdimenziók számától függetlenül kapcsolható más modellekhez, így 1, 2 és 3 dimenziós vízminőségi szimulációk is elvégezhetők. A hidrodinamikai meghajtó erő esetünkben a MIKE21FM modell, tehát a vízminőségi modell eredményeit is annak számítási hálóján kapjuk vissza.

A terepi mintavételezés a Duna két szakaszán történt; Budapesttől északra, Surány térségében, 3 szelvényben, valamint délre, Ráckeve térségében, szintén 3 szelvényben (1. ábra). A mérések során 14 napos időlépcsőkben történt mintavételezés. A vizsgált

nagyszámú komponens közül (Engloner et al., 2023) az alábbiakat használtuk fel a modellhez: vízhőmérséklet, oldott oxigén, összes szerves szén, összes nitrogén,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , összes foszfor,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Zn, E. coli, Carbamazepine, Sulfamethoxazole, és 1H-Benzotriazole. Ezeket az EcoLab külön sablonokban kezeli, a tápanyag-háztartási jellemzőket az ún. Water Quality, a cink koncentrációjának alakulását az ún. Heavy Metals, a szervesetlen mikroszennyezőket (mint a Carbamazepine, Sulfamethoxazole, és Benzotriazole gyógyszermaradványok) pedig az ún. Xenobiotics sablonok segítségével. Jelen kutatásban a tápanyag-háztartásra koncentráltunk, így a továbbiakban az ezzel kapcsolat eredményeket mutatjuk be.

### A vízminőségi modell bearányosítása

A vizsgált szakaszon rendelkezésre álló terepi mérésekből az északi pontpár mintavételi eredményeit a vízminőségi modell felső peremfeltételeként definiáltuk, így a kalibráció a második (ES2 sodorvonal, és EP2 partközeli) és harmadik (ES3, EP3) pontpárok felhasználásával volt lehetséges. Néhány paraméter RMSE és RSE értékeit az alábbi táblázatok (1. és 2. táblázat) szemléltetik.

	ES2	EP2	ES3	EP3
DO	0,178	0,378	0,199	0,22
$\text{NH}_4^+$	0,009	0,011	0,013	0,009
$\text{NO}_2^-$	0,004	0,017	0,003	0,004
$\text{NO}_3^-$	0,081	0,058	0,167	0,128
$\text{PO}_4^{3-}$	0,017	0,025	0,017	0,022

1. táblázat. Kalibrációs RMSE [mg/l].

	ES2	EP2	ES3	EP3
DO	0,14	0,27	0,16	0,31
$\text{NH}_4^+$	1,24	0,75	0,89	2,7
$\text{NO}_2^-$	0,59	0,09	0,14	0,24
$\text{NO}_3^-$	0,02	0,06	0,05	0,07
$\text{PO}_4^{3-}$	0,588	0,485	0,581	0,788

2. táblázat. Kalibrációs RSR [-].

**A klímaváltozás hatása a peremfeltételekre**

A vízben lejátszódó fizikai, kémiai és biológiai folyamatok egy része hőmérsékletfüggő, így többnyire a modell által használt alapegyenletek is tartalmazzák ezt a függőséget. Tehát bizonyos paraméterek esetén a meghajtó erő nem csupán a hidrodinamikai részeredmény, hanem közvetlenül a vízhőmérséklet is. Ez a modell kalibrációja során az észlelt vízhőmérsékletet jelenti, de egyben lehetővé is teszi a bearányosított folyamatok áthelyezését más hőmérsékleti viszonyok közé. Hasonló módon, ám közvetetten a vízhozam és a vízjárás megváltozása is hatást gyakorol a vízminőségi folyamatokra. Ez a hatás a hidrodinamikai modellen keresztül mutatkozik meg. A vízminőségi modell tekintetében tehát két hosszútávon változó paramétert jelöltünk ki, a vízhőmérsékletet és a vízhozamot.

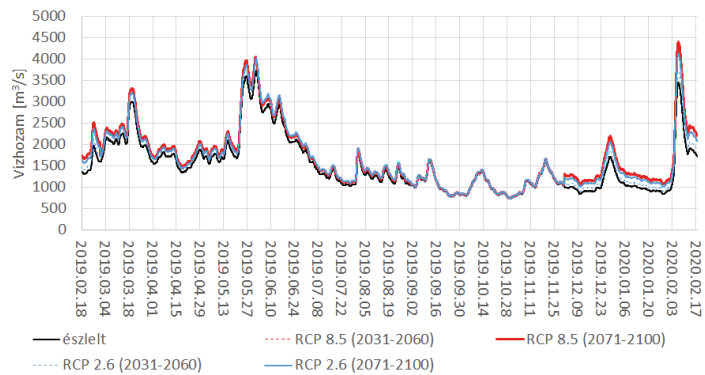
Vízhozam változás az 1971-2000 időszak havi átlagértékeinek százalékában [%]				
hónap	RCP 8.5 2031-2060	RCP 8.5 2071-2100	RCP 2.6 2031-2060	RCP 2.6 2071-2100
1	21,1	27,7	7,8	20,2
2	21,1	27,7	7,8	20,2
3	6,2	10	5,5	6,8
4	6,2	10	5,5	6,8
5	6,2	10	5,5	6,8
6	4,7	6,2	7,9	7,8
7	4,7	6,2	7,9	7,8
8	4,7	6,2	7,9	7,8
9	0,0	2,0	-3,1	2,8
10	0,0	2,0	-3,1	2,8
11	0,0	2,0	-3,1	2,8
12	21,1	27,7	7,8	20,2
<b>Átlag</b>	<b>8</b>	<b>11,5</b>	<b>4,5</b>	<b>9,4</b>

3. táblázat. Probst & Mauser (2023) által becsült vízhozam változás.

Probst and Mauser (2023) hosszú távú hidrológiai modellezéssel közelítette meg a Duna vízgyűjtő vízjárás változásainak feltárását. Munkájukban két klímaszenáriót (IPCC, 2014) vettek alapul, és többek között publikálták a havi átlag vízhozamok változását két időtávon, 2031–2060 és 2071–2100 között. A két vizsgált klímaszenárió:

- **RCP 2.6:** „low emission”, „middle of the road”, azaz alacsony kibocsátású, vagy középút szcenárió. A globális átlagos léghőmérséklet emelkedés 2100-ig kevesebb, mint 2,0 °C.
- **RCP 8.5:** „business as usual”, „high emission”, „worst-case scenario”, azaz magas kibocsátású, legrosszabb eset szcenárió. A globális átlagos léghőmérséklet emelkedés 2100-ig 4,3 °C.

A két időtávra becsült értékeket a 3. táblázat szemlélteti az 1971–2000 havi átlagértékek százalékában. A hidrodinamikai modell felső peremfeltétele a váci vízmérce vízhozam órás idősora, így számunkra ez a referencia idősor. Ezeket az értékeket módosítottuk az RCP 2.6, valamint RCP 8.5 klímaszenáriók közép és hosszú távú változásaival (3. ábra).



3. ábra. Mért és előrejelzett vízhozamok.

A vízhozamhoz hasonlóan a vízhőmérsékletek idősorát is a klímaszenáriók alapján vetítettük előre. Mivel nagyon erős korrelációt mutat egymással a léghőmérséklet és a vízhőmérséklet (Mohseni and Stefan, 1999), így első megközelítésként kigyűjtöttük a KLI-MADAT adatbázisból (HungaroMet Nonprofit Zrt.) a havi átlagos léghőmérséklet értékeket a modellterület rácspontjában (4. táblázat). Ezek az átlagértékek az alábbi két klímaszenárión alapuló két különböző regionális klíma-modell-szimuláció (ALADIN-Climete, REMO) eredményeiből származnak:

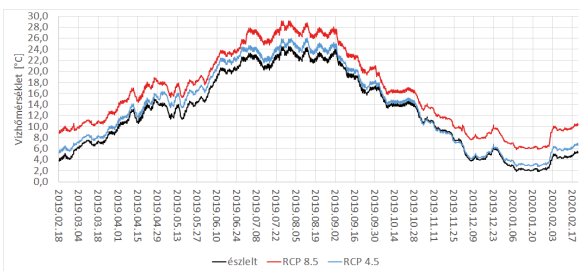
- **RCP 4.5:** „intermediate scenario”, azaz mérsékelt szcenárió, mely szerint az emisszió 2040 környékén tetőzik, majd csökken. A globális átlagos léghőmérséklet emelkedés 2100-ig 2–3 °C közötti.
- **RCP 8.5:** lsd. feljebb.

Az 1991–2020 közötti időszak léghőmérséklet adataihoz viszonyítva meghatároztuk a változás várható mértékét, és ezt közvetlenül érvényesnek tekintettük a vízhőmérsékletekre. A vizsgált Duna szakasz vízmércéi (Vác, Göd) hiányos vízhőmérséklet adatsorral

Léghőmérsékletek [°C]					
hónapok	RCP 8.5	RCP 4.5	1991-2020	változás RCP 8.5	változás RCP 4.5
1	3,9	0,8	-0,1	4	0,9
2	6,6	3,1	1,6	5	1,4
3	9,4	6,8	5,8	3,7	1
4	14,7	11,8	10,9	3,8	1
5	19,0	17,2	15,2	3,9	2,1
6	21,7	20,3	18,6	3,2	1,8
7	26,0	22,8	21,5	4,6	1,4
8	25,7	22,9	21,3	4,4	1,6
9	20,0	17,4	16,4	3,6	1
10	13,7	11,8	11,2	2,5	0,6
11	8,1	5,4	5,8	2,3	-0,3
12	4,6	1,1	0,8	3,8	0,3
<b>Átlag</b>	<b>14,5</b>	<b>11,8</b>	<b>10,7</b>	<b>3,7</b>	<b>1,1</b>

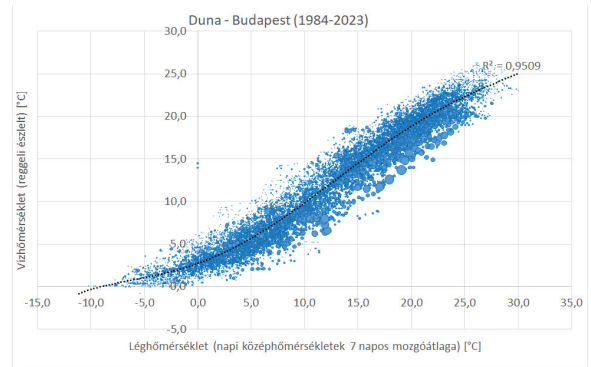
4. táblázat. A KLIMADAT adott rácsontra vonatkozó átlagos havi léghőmérséklet értékei.

rendelkeznek, a legközelebbi összefüggő, és hibától feltehetőleg mentes adatsor a budapesti vízmércén található. Ez 24,5 km-re van a modellterület alsó határától, ezért feltételezzük, hogy ezen a szakaszon a vízhőmérséklet nem változik meg szignifikáns mértékben. Így ezt tekintjük kiindulási alapnak, és ezt az idősort vetítjük előre. A becült értékeket a 4. ábra mutatja.

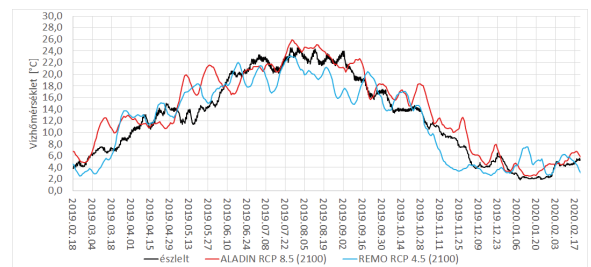


4. ábra. Mért és előrejelzett vízhőmérsékletek (1. módszer).

A második megközelítés szerint a két klímamoddellel (ALADIN RCP8.5 és REMO RCP4.5) 2100. évre becült napi lépésű léghőmérsékleti idősorokat vettük alapul, melyet az Országos Meteorológiai Szolgálat állított elő. A léghőmérséklet és vízhőmérséklet idősorok közötti regressziós polinom (5. ábra) egyenletét felhasználva a klímamodellek idősoraiból számított napi vízhőmérsékleteket állítottunk elő (6. ábra).



5. ábra. Léghőmérsékletek és vízhőmérsékletek kapcsolata (buborék nagysága: vízhozam).



6. ábra. Mért és előrejelzett vízhőmérsékletek (2. módszer).

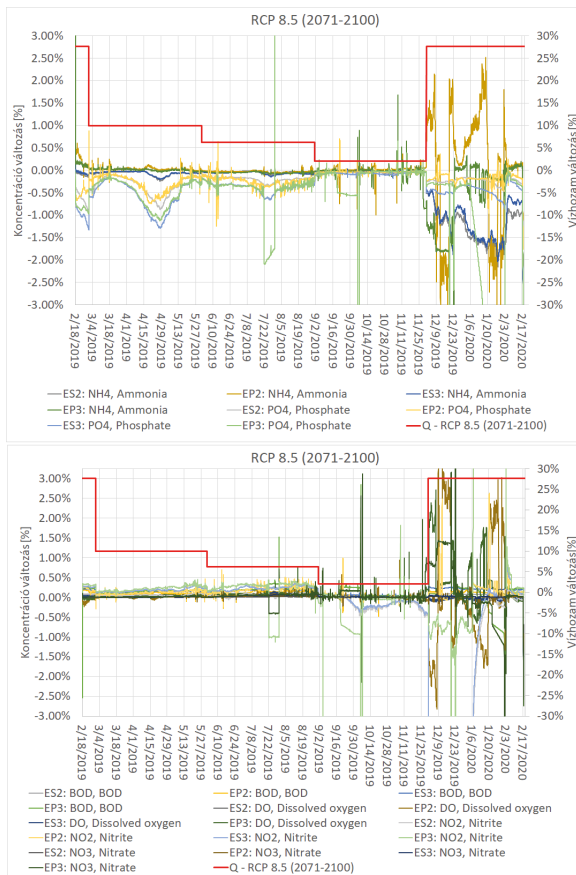
## A klímaváltozás hatása a vízminőségi modell eredményeire

A kutatás ezen része jelenleg is folyamatban van, így az alábbi ábrákon néhány főbb eredményt szemléltetünk. Ezek a szélsőségesebb, azaz az RCP8.5 klímaszcenárióhoz tartozó eredmények, a 7. ábra a megváltozott vízhozam hatását, míg a 8. ábra a megváltozott vízhőmérséklet hatását mutatja. Mindkét ábrapáron felül a jellemzően fordítottan arányos, alul a jellemzően egyenesen arányos komponensek láthatók.

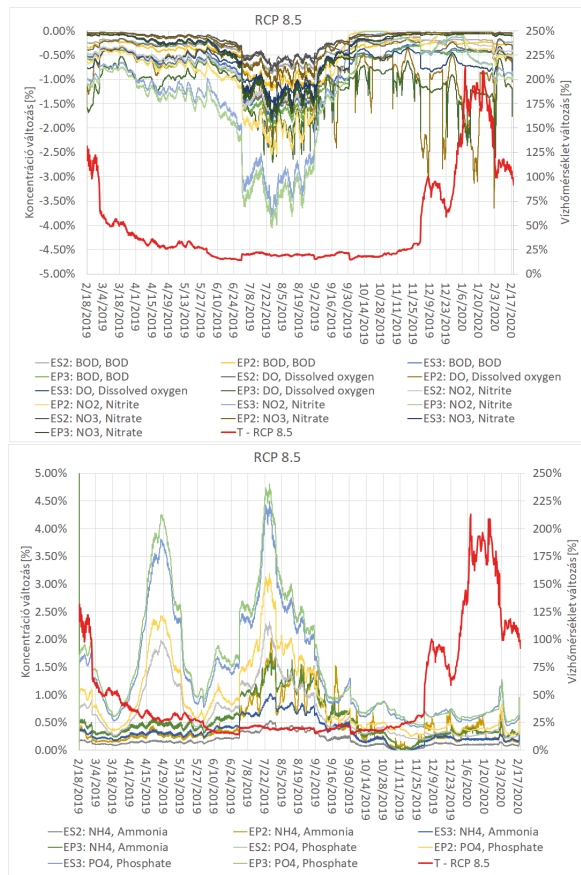
## Diszkusszió

A vízminőségi modell a kalibráció után viszonylag jó egyezést mutat a terepi mérésekkel az oldott oxigén,  $\text{NO}_3^-$  és  $\text{NO}_2^-$  paraméterek esetén, és kevésbé jó egyezést az  $\text{NH}_4^+$  és  $\text{PO}_4^{3-}$  esetén. Ennek oka a leírás módjában keresendő, hiszen az EcoLab tápanyag-háztartás sablonja nagyszámú (43) szabad paraméterrel dolgozik, így ezek együttes kalibrációja komplex feladat. Sőt a vízminőségi alapegyenletek erősen konceptuálisak, többnyire mérlegegyenletek összessége, melyeket arányszámokkal paraméterezhetünk.

A vízhozamok várható alakulásáról jelenleg egyetlen publikált művet találni (Probst and Mauser, 2023), így nincs összehasonlítási lehetőség más eredményekkel.



7. ábra. Vízminőség változása a vízhozam megváltozásának hatására.



8. ábra. Vízminőség változása a vízhőmérséklet megváltozásának hatására.

A középvízhozamok nem jellemzik jól az extrém vízjárési helyzeteket, így ezeket külön kell vizsgálni, mind mennyiségi, mind pedig tartóssági szempontból. A vízhőmérsékletek várható alakulása is nagy bizonytalanságot hordoz magában, amit jól szemléltet a két módszer közötti különbség. Az első módszer viszonylag magas nyári vízhőmérsékleteket eredményezett az RCP 8.5 klímaszcenárió mellett, míg a második módszerrel kapott vízhőmérsékletek nem különböznek jelentős mértékben a terepi mérések során észleltektől. Ennek oka, hogy a 2019. év az átlagosnál melegebb év volt, így ezt tovább növelve túlzóan magas értékeket kapunk. A klímamodellek alapján polinomiális regresszióval számított vízhőmérsékletek kevésbé drasztikus változást mutatnak, de a szezonális változások itt is markánsan jelentkeznek.

A megváltoztatott peremfeltételekkel végzett vízminőségi szimulációk eredményei számos kérdést vetnek fel. Bár az eredmények alapján jól elválasztható egymástól az adott paraméterrel fordítottan vagy egyenesen arányos komponens, sőt az arányosság erőssége is számszerűsíthető, de fontos elvárás,

hogy a terepi mérések ugyan ezeket az összefüggéseket mutassák, azaz ne legyen alapvető ellentmondás a természet és a modell között. Ez tovább vetíti azt a kérdést, hogy egy-egy folyamat milyen összefüggés rendszerrel van szimulálva, és az milyen paraméterezési lehetőséget biztosít. Végso pontban pedig, hogy a paraméterek mennyire határozzák meg a folyamat jellegét, azaz fennáll-e a túltanítás veszélye. Ezek eldöntésére részben a modell dokumentációjában találunk támpontokat, részben pedig a dokumentációban hivatkozott szakirodalomban.

A megfelelő vízminőségi modell kiválasztásának fontos szempontja, hogy mennyire aktuális annak elméleti háttere. A jelen kutatás során használt MIKE EcoLab modell sablonjai számos hiányosságot mutatnak, így a tápanyag-háztartáson túl nem alkalmasak a klímaváltozás hatásainak becslésére, hiszen a többi mért komponens esetén nem veszik figyelembe a vízhőmérsékletet. Mivel a sablonok csak iránymutatók, és szabadon szerkeszthetőek, így kellő szakértelemmel minden további összefüggés beépíthető a modellbe.

## Köszönetnyilvánítás

A kutatást az NKFIH „Tiszta ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” Nemzeti Kiválóság Programja (2018-1.2.1-NKP-2018-00011) támogatta. Köszönjük a DHI Hungary Kft. közreműködését a modellek építésében.

## Irodalomjegyzék

- Allin, A., Schernewski, G., Friedland, R., Neumann, and T., Radtke, H., 2017: Climate change effects on denitrification and associated avoidance costs in three Baltic river basin – coastal sea systems. *J. Coastal Conserv.* 21, 561–569. <https://doi.org/10.1007/S11852-017-0530-8>
- Bernard, R. and Leadley, W., 2005: Global change, nitrification, and denitrification: A review. *Glob. Biogeochem. Cycl.* 19, GB1007. <https://doi.org/10-1029/2004GB002282>
- Cammalleri C., Naumann G., Mentaschi L., Formetta G.(a), Forzieri G., Gosling S.(b), Bisselink B., De Roo A., and Feyen, L., 2020: Global warming and drought impacts in the EU, EUR 29956 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/597045>
- Ejigu, M.T. and Aмоса, M.K., 2021: Overview of water quality modeling. *Cogent Engineer.* 8(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1891711>
- Eladawy, A., Negm, A., Saavedra, O., Nadaoka, K., and El-Shinawy, I., 2014: Coupled Hydrodynamic-Water Quality Model for Pollution Control Scenarios in El-Burullus Lake (Nile Delta, Egypt). *Amer. J. Environ. Sci.* 10. 546-565. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2014.546.565>
- Engloner, A., I., Németh, K., Dobosy, P., and Óvári, M., 2023: Exploring the trend effects of diffuse anthropogenic pollution in a large river passing through a densely populated area. *Helyion* 9(9), e20120. <https://doi.org/10.1016/j.helyion.2023.e20120>
- Fernández-Pato, J. and García-Navarro, P., 2021: An Efficient GPU Implementation of a Coupled Overland-Sewer Hydraulic Model with Pollutant Transport. *Hydrology* 8(4):146. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040146>
- García-Feal, O., Cea, L., González-Cao, J., Domínguez, J.M., and Gómez-Gesteira, M., 2020: IberWQ: A GPU Accelerated Tool for 2D Water Quality Modeling in Rivers and Estuaries. *Water* 12(2):413. <https://doi.org/10.3390/w12020413>
- Gervasio, M., P., Soana, E., Granata, T., Colombo, D., and Castaldelli, G., 2022: An unexpected negative feedback between climate change and eutrophication: higher temperatures increase denitrification and buffer nitrogen loads in the Po River (Northern Italy). *Environ. Res. Lett.* 17, 084031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8497>
- IPCC, 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. in IPCC AR5 Synthesis Report website
- Kim, D., Kim, Y., and Kim, B., 2019: Simulation of eutrophication in a reservoir by CE-QUAL-W2 for the evaluation of the importance of point sources and summer monsoon. *Lake Reservoir Manage.* 35(1), 64–76. <https://doi.org/10.1080/10402381.2018.1530318>
- Liao, R., Miao, Y., Li, J., Li, Y., Wang, Z., Du, J., Li, Y., Li, A., and Shen, H., 2018: Temperature dependence of denitrification microbial communities and functional genes in an expanded granular sludge bed reactor treating nitrate-rich wastewater. *RSC Adv.* 8, 42087–52094. <https://doi.org/10.1039/C8RA08256A>
- Lhotka, O., Trnka, M., Kyseľ, J., Markonis, Y., Balek, J., and Možny, M., 2020: Atmospheric Circulation as a Factor Contributing to Increasing Drought Severity in Central Europe. *J. Geoph. Res. Atmos.* 18. 125. <https://doi.org/10.1029/2019JD032269>
- Mohseni, O. and Stefan, H.G., 1999: Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *J. of Hydrol.* 218, 128-141.
- Prilop, K., Lorenz, M., Le, T. T., H., Hieu, N., Meon, G., Nguyen, H-Q., 2014: A 3D-hydrodynamic and water quality model of the Thi Vai river under strongly tidal effect. Contributions to the 4th International Conference for Environment and Natural Resources, ICENR
- Probst, E., Mauser, W., 2023: Climate Change Impacts on Water Resources in the Danube River Basin: A Hydrological Modelling Study Using EURO-CORDEX Climate Scenarios. *Water* 2023, 15, 8. <https://doi.org/10.3390/w15010008>
- Shabani, A., Woznicki, S., Mehaffey, M., Butcher, J., Wool, T., and Whung, P., 2021: A coupled hydrodynamic (HEC-RAS 2D) and water quality model (WASP) for simulating flood-induced soil, sediment, and contaminant transport. *J. Flood Risk Manage.* 14. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12747>
- Shettigar, N., A., Riom, W., Bi, Q., Toorman, E., 2022: Modelling particle size distribution in TELEMAC- 2D with Population Balance Method. Conference paper. [https://www.researchgate.net/publication/367295146\\_Modelling\\_particle\\_size\\_distribution\\_in\\_TELEMAC-2D\\_with\\_Population\\_Balance\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/367295146_Modelling_particle_size_distribution_in_TELEMAC-2D_with_Population_Balance_Method)
- Stagge, J.H., Kingston, D.G., Tallaksen, L.M., and Hannah, D.M., 2017: Observed drought indices show increasing divergence across Europe. *Sci. Rep.* 7, 14045. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14283-2>
- Terry, J. and Lindenschmidt K-E., 2023: Modelling Climate Change and Water Quality in the Canadian Prairies Using Loosely Coupled WASP and CE-QUAL-W2. *Water* 15(18):3192. <https://doi.org/10.3390/w15183192>
- Van, L-A., Nguyen, K-D., Le Marrec, F., and Jairy, A., 2022: Development of a Tool for Modeling the Fecal Contamination in Rivers with Turbulent Flows—Application to the Seine et Marne Rivers (Parisian Region, France). *Water* 14(8),1191. <https://doi.org/10.3390/w14081191>
- Xu, C., Ren, Z., Huang, S., Li, J., Zi, Y., and Hu, X., 2023: Simulation Study on the Impact of Water Flow Regulation Based on the MIKE 21 Model in a River Water Environment. *Sustainability* 15, 10313. <https://doi.org/10.3390/su151310313>