

istvan60_104_23

**A hidrológiai ciklus különböző elemeiből származó
környezeti adatok vizsgálata idősoros és többváltozós
geomatematikai módszerekkel**

MTA rövid doktori értekezés tézisei

Hatvani István Gábor

HUN-REN Csillagászati és Földtudományi
Kutatóközpont Földtani és Geokémiai Intézet

Budapest, 2024

1. Bevezetés és célok

Napjainkban édesvízkészleteink mennyiségét és hozzáférhetőségét negatívan befolyásoló folyamatok erősödése aggodalomra ad okot (Vörösmarty és Sahagian, 2000). Azonban az elmúlt évtizedek problémaközpontú technológiai fejlesztésének hála, egyre növekvő mennyiségben férünk hozzá a hidrológiai ciklus főbb tározóit és a köztük zajló anyagáramlást (Abbott et al., 2019 3. ábrája) leíró adatokhoz, amelyek segíthetnek jobban megérteni a globális léptékű hidrológiai folyamatokat és azoknak a hidrológiai ciklus által érintett szférákra gyakorolt (kölcson)hatását (Koutsoyiannis, 2020). Feladatunk ezek megfelelő szintetizálása, feldolgozása, kiértékelése modern geomatematikai eszközökkel és a kapott tudás megosztása olyan módon, hogy az a lehető legjobban írja le a vizsgált jelenségeket.

Véleményem szerint a hidrológiai ciklus elemeiben bekövetkezett természetes és antropogén eredetű változások észlelése, nyomon követése, enyhítése és előrejelzése a mai környezet- és vízvédelem egyik legégetőbb problémája (Yang et al., 2021), legyen szó általános vízminőségromlásról, vagy valamely specifikus paraméterkörhöz köthető változásról.

Kutatásaimat az Osztrák-Magyar Akció Alapítvány, az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, valamint a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal segítette különböző ösztöndíjakkal. Ezen intézmények támogatásának köszönhetően készülhetett el értekezésem melyben egy egységes rendszerbe foglalt geomatematikai eszköztár

(idősoros, többváltozós és geostatistikai módszerek) alkalmazásával hozok példákat a hidrológiai ciklus teresztriális felszíni víztestjeit érintő (i) általános vízminőségi és trofikus állapotváltozásainak (Hatvani et al., 2017a; Hatvani et al., 2020; Hatvani et al., 2015), és (ii) fekáliás szennyeződési forrópontjainak feltárására (Hatvani et al., 2018; Herzig et al., 2019). Továbbá bemutatom a (iii) modern csapadék stabilizotóp-összetételéből számított csapadékvízvonal meredekségének és tengelymetszetének térbeli becslését a tágabb értelemben vett mediterrán térségre (Hatvani et al., 2023), és végül (iv) egy klasszikus geostatistikai módszerekkel létrehozott izotópos tájképet mutatok be, amely hozzájárul a múltbéli páraáramlási útvonalak feltárásához és a nyugat-antarktiszi jégfurathálózat optimalizálásához (Hatvani et al., 2017b). Dolgozatomban a különböző kutatásokhoz kapcsolódó specifikus célokat az adott fejezetekben taglalom, a vizsgált területek és hozzájuk kapcsolódó tudományos kérdések bemutatása után. Eredményeim számos ponton kapcsolódnak a hidrológia kurrens kutatási kérdéseihez (Blöschl et al., 2019).

2. Anyag és módszer

A vizsgált adatok körét három felszíni víztest, a Zala és hozzá kapcsolódva Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (KBVR), a Balaton és a Fertő, továbbá a tágabb értelemben vett mediterrán térség csapadékainak stabilizotóp-összetételi mintavételi hálózata, végül egy nyugat-antarktiszi jégfurathálózat idősorai szolgáltatják. Dolgozatomban először a mintaterületekről származó adatok körét (3.1. fejezet) és az ezekre alkalmazott, egységes rendszerbe foglalt adatelemző apparátust írom le

(3.2. fejezet), amelyből egy-egy módszer fontosabb jellemzőjét alaposabban is kifejtem.

Az értekezésben bemutatott tanulmányokhoz kapcsolódó adatok száma közel 300 000, amely nem tartalmazza a függetlennek tekintett magyarázó és egyéb prediktor változók mért értékeinek számát (lásd az átfogó képet nyújtó **1. táblázatot**), a pontos részleteket az eredeti tanulmányok tartalmazzák: Hatvani et al. (2015; 2017a,b; 2018; 2020; 2023), melyek teljes terjedelemben a dolgozat végén olvashatók. A felszíni víztestek esetében figyelembe vett vízminőségi változók jellemzőit a dolgozat nem tárgyalja, viszont a csapadék stabilizotópos összetételét leíró paramétereket és a csapadékvízvonalak koncepcióját a disszertáció 1.3-as fejezetben vezetem be, a 3.2.1-es fejezet végén pedig bővebben ki is fejtem.

Elmondható, hogy azon túl, hogy a bemutatott tanulmányok mind a hidrológiai ciklus egy-egy eleméből származó adatokat dolgoznak fel, a vizsgált változók körében és/vagy a feldolgozásukhoz alkalmazott módszertanban is szorosan összekapcsolódnak. Ez már az **1. táblázatból** is kitűnik, és a dolgozat 3.2-es fejezetében egy egységes megközelítés segítségével, az esettanulmányokat a bennük alkalmazott módszereken keresztül is összekötöm.

1. táblázat. A vizsgált adathalmazok jellemzői. Az aláhúzott paraméterek külső magyarázó változók az adott vizsgálatban; további magyarázat a disszertációban.

Paraméterek / módszerek	PCA, Geostatiztika	CCDA, PCA, 'Sen's slope'	DFA	WCA	RMA, IDW, RF, SVM	Geostatiztika (krigeelés)
<i>Víztest/terület (mintavételi pontok száma)</i>	Fertő (26 vmvp) (6 meteorológiai pont)	Balaton (4 vmvp)	Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (1 ill. 4 vmvp) és griddelt meteo adatok		Mediterrán régió (249 csapadék mvp)	Nyugat-Antarktisz (60 jégfurat)
<i>Adat (~db) szűrés előtt</i>	108 000	36 000	31 000	117 000	15 000	3 000
KOI	1992-2013	1985-2017				
BOI ₅						
Cl ⁻						
SO ₄ ²⁻						
HCO ₃ ⁻			1978-2006			
CO ₃ ²⁻						
Mg ²⁺						
Ca ²⁺						
Na ⁺						
K ⁺						
ÖN				1994-2010		
NO ₂ -N						
NH ₄ -N	1992-2013	1985-2017	1978-2006			
NO ₃ -N						
ÖP				1994-2010		
ORP						
Ö Leba						
Fe ³⁺			1978-2006			
Mn ²⁺						
Szerves N						
Old P						
PP			1978-2006			
Chl-a						
Oldott O	1992-2013	1985-2017	1978-2006			
pH						
Zala ÖP						
Wulka ill. Zala Q			1978-2006	1994-2010		
Enterococcus	1992-2013					
E-Coli						
δ ¹⁸ O					2000-2015	1970-1988
δ ² H						
Talaj P- és N-többlet			1978-2006			
Vezetőképesség		1985-2017				
Secchi-mélység						
Szélesség						
Napos órák száma	1992-2013					
Besugárzás				1994-2010		
Levegő-hőmérséklet						
Vízhőmérséklet		1985-2017	1978-2006			
Csapadék			1979-2006	1994-2010		
Szennyvíz P			1978-2006			
Felhőborítottság				1994-2010		
Köppen-Gegier-klimazonakódok (Kottek et al. 2006)						
Lat - Lon (EPSG: 3857)						
ELE						
Felhasznált program(ok)	R, IBM SPSS 26, Sufer 15, GS+ 10	R, IBM SPSS 26		R	R, Surfer 15,	GS+ 10

3. Tudományos eredmények, tézispontok

Egy kis vízhozamú vízfolyás (Zala)–eutróf tó (Hidvégi-tó)–vizes élőhely (Ingói- és Zimányi-berkek)–sekély tó (Balaton) kaszkárendszerhez kapcsolódó tézisek.

1. tézis: dinamikus faktoranalízissel (Kovács et al., 2004) időben változó intenzitású és egyben eltolt korrelációs struktúrájú háttértényezőket határoztam meg egy kis vízhozamú vízfolyás–eutróf tó–wetland–sekély tó fő bemeneti pontján (Hatvani et al., 2015).

a) Kimutattam, hogy e kaszkárendszer bemeneti oldalán a diffúz mezőgazdasági terheléshez és jellemzően pontforrás eredetű szennyvízhez köthető folyamatok szerepét átvették a természeti folyamatokat inkább jellemző háttértényezők (pl. vízhőmérséklet).

b) Megállapítottam, hogy a tapasztalt jelenség háttérben elsősorban a vízminőség-védelmi intézkedések és az antropogén tevékenység csökkenése, az 1990-es években bekövetkezett nagymértékű mezőgazdasági átrendeződés áll.

c) Módszertani szemszögből megállapítottam, hogy a Zala folyó vízgyűjtőjéről érkező terhelések és azok megjelenése a KBVR-en, beleértve a vízgyűjtőre ható külső tényezőket, időben eltolva jelennek meg, és az ilyen folyamatok vizsgálata a dinamikus faktoranalízist követelik meg, mivel ez képes figyelembe venni az eltolt korrelációs struktúrákat.

2. tézis: egy kis vízhozamú vízfolyás–eutróf tó–„zavartalan wetland”–„zavart wetland” alkotta rendszer különböző élőhelyein wavelet-koherenciaanalízissel kimutattam, hogy az elsődleges tápanyagformák jelentősen eltérő mértékben mutatnak hidro(geo)kémiai évszakosságot (Tanos et al., 2015). Az eutróf tóban zajló folyamatok voltak képesek a

legjelentősebb mértékben tükrözni a meteorológiai változók évszakosságát. Az ún. „zavart wetland” pedig a Zalához hasonló viselkedést mutat, mert a Marót-völgyi-csatorna, a Zala–Somogyi-csatorna és az Egyesített-övcatorna 40%-nyi vízhozamtöbblete rendszertelenül érkezett az Ingói-berekbe (Hatvani et al., 2017a).

3. tézis: harmincévnyi, vízminőséget és egyben trofikus állapotokat leíró adat elemzése nyomán az eddigi irodalommal egybecsengő kép rajzolódik ki a Balaton trofikus állapotát illetően (Hatvani et al., 2020). Megállapítottam, hogy

a) a Balaton trofikus állapota a nyugati medencék hipertróf állapotából a Siófoki-medencében már oligotróf állapotokat is mutatott klorofill-a alapján. Ez a javuló trend pedig az egész tóra jellemző az 1990-es évek közepétől kezdődően, amely azonban időben késleltetve jelent meg a medencékben kelet felé haladva. Ezt megerősítette a vizsgált időszakok szétválása és a nemparaméteres Sen-féle hosszú távú trendvizsgálat is (Sen, 1968).

b) a vízminőségi változókon végzett főkomponens-analízis faktoraiban kelet felé csökkent a tápanyagok szerepe, és ezzel párhuzamosan gyengült a főkomponensek korrelációja a Zalából érkező összesfoszfor-terheléssel, azt jelezve, hogy a medencék térben is máshogyan reagáltak a terhelésekre.

Európa legnyugatibb sekély szikes tava, a Fertő fekáliás szennyződésének feltárására vonatkozó tézisek.

4. tézis: a főkomponens-analízis egy új megközelítésű alkalmazásával meghatároztam a Fertő fekáliás forrópontjait és ezek hajtótényezőit, amelyek elsősorban

településekhez, ill. az ottani antropogén tevékenységhez köthetők (Hatvani et al., 2018; Herzig et al., 2019). Ilyen források pl. Ruszt (Rust) és a tavon álló hétvégi házak, amelyek környékén csapadékeseménykor csökken a szennyezés mértéke, mivel akkor nem zajlik illegális szennyvízürítés; Pátfalu (Podersdorf), ahol vihareseménykor az északi szél rátolja a vizet a szennyvíztisztító kifolyójára, túltölti azt, és így a szennyvíz bekerül a tóba, továbbá fekáliás indikátorbaktériumok (SFIB) a felkevert üledékből is visszajutnak a vízbe; vagy Védeny (Weiden) és Nyulas (Jois), ahol a gyakorta megemelkedett SFIB-érték szintén a nyaralók nem megfelelő szennyvízelvezetésére vezethető vissza. Ezzel szemben a nyílt vízen nem találtunk SFIB-forráspontot, és csak alkalmanként jelent meg fekáliás szennyezés.

5. tézis: geostatistikai vizsgálatokkal megállapítottam, hogy a jelenlegi mintavételi hálózattal nem ajánlott interpolálni SFIB-re (Hatvani et al., 2018), így javaslom, hogy egy intenzív térbeli mintavételezési kampánnyal reprezentatívan mérjék fel a tó különböző élőhelyeit és antropogén tevékenységnek fokozottan kitett területeit, figyelembe véve a tó áramlási viszonyait és az uralkodó északi szélirányt (Antal et al., 1991; Józsa et al., 2008). Az így kapott adatok alapján a tavon egy térben hatékonyabb és SFIB-re reprezentatívabb mintavételezési hálózat tudna üzemelni. Az eredmények felhívták a figyelmet több, feltételezhetően jogsértő és környezetkárosító tevékenységre, amelyek megszüntetésével az UNESCO védelme alatt is álló Fertő vízminősége és a helyi turizmus nagyban fog profitálni.

A modern csapadék $\delta^2\text{H}$ - és $\delta^{18}\text{O}$ -értékei közötti lineáris kapcsolat alakulása a Mediterráneumban.

6. tézis: a kiszámított modellek eredményeinek összevetése és független („out-of-sample”) validációja alapján bemutattam, hogy a mediterrán térség modern δ_p -adataiból ’reduced major axis’ regresszióval (IAEA, 1992) számolt lokális csapadékvízvonalak (LCsVV-k) meredekségének és tengelymetszetének térbeli interpolációjára az állomások távostárgymátrixának és tengerszint feletti magasságának figyelembevételével végzett véletlen erdő (random forest) eljárás (Liu et al., 2012) a legalkalmasabb a figyelembe vett modellek közül (Hatvani et al., 2023).

7. tézis: a LCsVV-k paramétereinek térben folytonos becslésével bemutattam, hogy

a) a Földközi-tenger tágabb medencéjében számos kistérségi mintázat jelenik meg, mind meredekség, mind tengelymetszet tekintetében (Hatvani et al., 2023). Ezek pedig rávilágítanak annak fontosságára, hogy a csapadékvízvonalakra vonatkozóan finom skálájú, térben folyamatos becsléseket kell levezetni, és nem pedig egymástól több száz vagy akár több ezer kilométerre lévő állomás adatait kell összesíteni.

b) Mivel a Földközi-tenger nyugati medencéjében nem volt egységes az LCsVV-k paramétereinek mintázata, az eredmények kétségbe vonják egy regionális csapadékvízvonal meghatározását (Hatvani et al., 2023). Ez pedig megkérdőjelezi a korábban definiált nyugat-mediterrán csapadékvízvonal mint izotóp-hidrologiai referencia (Celle-Jeanton et al., 2001) további használhatóságát a modern csapadéokra.

A $\delta^2\text{H}$ - és $\delta^{18}\text{O}$ -értékek alakulása felszíni hó- és firnrétegekben egy antarktisi makrorégióban.

8. tézis: a nyugat-antarktisi makrorégióban található hó/firn oxigénizotóp-összetétel adatsorainak vizsgálatával

a) kimutattam, hogy a területen a hó/firn $\delta^{18}\text{O}$ értékeinek térbeli varianciáját leginkább a földrajzi hosszúság, a tengerszint feletti magasság és a parttól való távolság határozza meg;

b) lehatároltam azon területeket a régióon belül, amelyeket a jelenlegi jégfurathálózat hó/firn $\delta^{18}\text{O}$ összetételének térbeli varianciája (a 350 km-es térbeli hatástávolsággal) nem fed le (Hatvani et al., 2017b).

4. Irodalomjegyzék

A tézisek alapjául szolgáló publikációk (a PhD-fokozatszerzés óta)

Hatvani, I.G., Kovács, J., Márkus, L., Clement, A., Hoffmann, R., Korponai, J., 2015. Assessing the relationship of background factors governing the water quality of an agricultural watershed with changes in catchment property (W-Hungary). *Journal of Hydrology* 521: 460-469.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.078>

Hatvani, I.G., de Barros, V.D., Tanos, P., Kovács, J., Székely Kovács, I., Clement, A., 2020. Spatiotemporal changes and drivers of trophic status over three decades in the largest shallow lake in Central Europe, Lake Balaton. *Ecological Engineering* 151: 105861.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105861>

Hatvani, I.G., Smati, A.E., Erdélyi, D., Szatmári, G., Vreča, P., Kern, Z., 2023. Modeling the spatial distribution of the meteoric water line of modern precipitation across the broader Mediterranean region. *Journal of Hydrology* 617: 128925.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128925>

Hatvani, I.G., Clement, A., Korponai, J., Kern, Z., Kovács, J., 2017a. Periodic signals of climatic variables and water quality in a river – eutrophic pond – wetland cascade ecosystem tracked by wavelet coherence analysis. *Ecological Indicators* 83: 21-31.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.018>

Hatvani, I.G., Kirschner, A.K.T., Farnleitner, A.H., Tanos, P., Herzig, A., 2018. Hotspots and main drivers of fecal pollution in Neusiedler See, a large shallow lake in Central Europe. *Environmental Science and Pollution Research* 25(29): 28884-28898.

<https://doi.org/10.1007/s11356-018-2783-7>

Hatvani, I.G., Leuenberger, M., Kohán, B., Kern, Z., 2017b. Geostatistical analysis and isoscape of ice core derived water stable isotope records in an Antarctic macro region. *Polar Science*, 13: 23-32.

<https://doi.org/10.1016/j.polar.2017.04.001>

További hivatkozott irodalmak (a téziseket bizonyító publikációk nélkül)

- Abbott, B.W. et al., 2019. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience*, 12(7): 533-540
- Antal, E. et al., 1991. Das Klima des Neusiedler Sees. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien - Budapest. ISBN: 2310004317850
- Blöschl, G. et al., 2019. Twenty-three unsolved problems in hydrology (uph) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64(10): 1141-1158.
- Celle-Jeanton, H., et al., 2001. Isotopic typology of the precipitation in the Western Mediterranean Region at three different time scales. *Geophysical Research Letters* 28(7): 1215-1218.
- Herzig, A., **Hatvani, I.G.**, et al., 2019. Mikrobiologisch-hygienische Untersuchungen am Neusiedler See – von der Einzeluntersuchung zum Gesamtkonzept. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 71(11): 537-555.
- IAEA (Nemzetközi Atomenergia Ügynökség), 1992. Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation. Technical report series International Atomic Energy Agency, Vienna, 781 p. ISBN: 9201008929
- Józsa, J., et al., 2008. Wind-induced hydrodynamics and sediment transport of Lake Neusiedl - Hungarian-Austrian-Finnish research cooperation from lake-wide to bay-wide scale. Budapest University of Technology and Economics, Department of Hydraulic and Water Resources Engineering, Budapest, p. 132.
- Koutsoyiannis, D., 2020. Revisiting the global

- hydrological cycle: Is it intensifying? *Hydrology and Earth System Sciences* 24(8): 3899-3932
- Kovács, J., et al., 2004. Dynamic factor analysis for quantifying aquifer vulnerability. *Acta Geologica Hungarica*, 47(1): 1-17.
- Liu, Y., et al., 2012. New machine learning algorithm: Random forest. In: Liu, B., Ma, M., Chang, J. (Eds.), *Information Computing and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 246-252. ISBN:9783642275036.
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324): 1379-1389.
- Tanos, P., Kovács, J., Kovács, S., Anda, A., **Hatvani, I.G**, 2015. Optimization of the monitoring network on the River Tisza (Central Europe, Hungary) using Combined Cluster and Discriminant Analysis, taking seasonality into account. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(9): 575 1-14.
- Vörösmarty, C.J., Sahagian, D., 2000. Anthropogenic Disturbance of the Terrestrial Water Cycle, *BioScience*, 50(9): 753–765.
- Yang, D., et al., 2021. "Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review." *Geography and Sustainability* 2(2): 115-122.