

HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont

1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 15-17. Tel: (+36) 1 391-9322 www.csfk.org

Válaszok Prof. Horváth László opponensi véleményére

Köszönöm Prof. Horváth Lászlónak, hogy ilyen alaposan átnézte és véleményezte az MTA doktori disszertációm. Hálás vagyok a dolgozattal kapcsolatos elismerő szavaiért és kritikai észrevételeiért. Az alábbiakban szeretném megválaszolni kérdéseit pontról-pontra.

Hogyan vezethető le a lokális csapadékvízvonalakból a globális csapadékvízvonal?

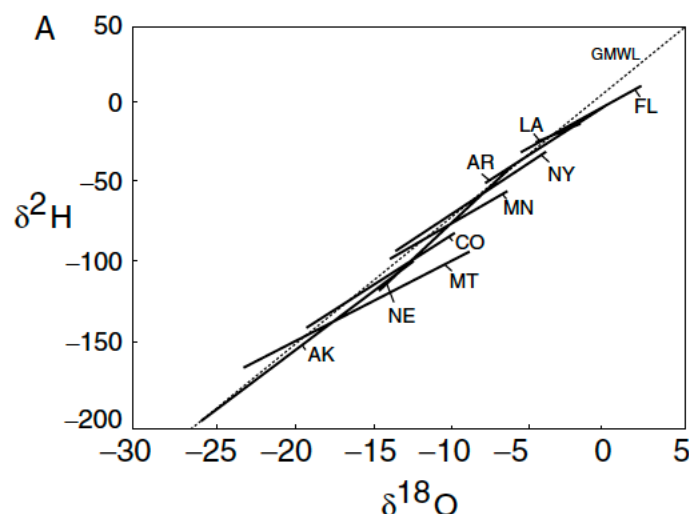
Válasz: Craig (1961) közel 400 saját vízmintájából mért $\delta^{18}\text{O}$ és $\delta^2\text{H}$ értékekre illesztett legjobb ('best-fit') egyenes egyenletével írta le először az összefüggést, amit ma globális csapadékvízvonalaként (GCsVV) ismerünk (E. 1). Általában ez használatos referenciaként.

$$\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (\text{Craig, 1961}) \quad (1)$$

Ezt az összefüggést az évtizedek alatt többször is pontosították, frissítették. Ezek közül a leggyakrabban használt a Rozanski és mtsai. (1993) által a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség globális havi csapadék $\delta^{18}\text{O}$ és $\delta^2\text{H}$ méréseinek éves átlagaira illesztett GCsVV (E. 2).

$$\delta^2\text{H} = 8,20 (\pm 0,07) \times \delta^{18}\text{O} + 11,27 (\pm 0,65) \quad (2)$$

A lokális csapadékvízvonal (LCsVV) a hidrogén és oxigén izotóp-összetételek helyspecifikus, hosszútávú kovarianciáját írja le. Ezek összessége adja a globális csapadékvízvonalat, amit jól illusztrál Kendall és Coplen (2001) tanulmányának ábrája (1. ábra), amelyen az Egyesült Államok különböző államaiból származó helyi csapadékvízvonalakat látunk a GCsVV-val együtt. Az adatok amelyekből az egyes LCsVV-k készültek, államonként eltérnek, de együttesük gyakorlatilag „kifeszíti” a GCsVV-t.



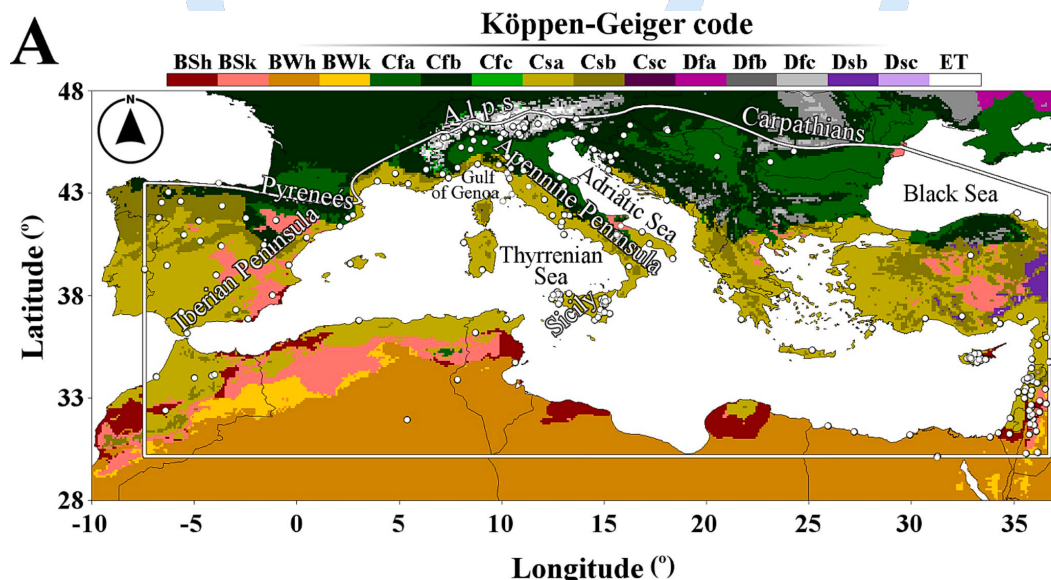
1. ábra. USA egyes államainak LCsVV-i. Az ábra szemlélteti a LCsVV-k átfedő jellegét a GCsVV-hez viszonyítva. Az egyenesek hossza az egyes államokra vonatkozó **maximális és minimális értékek** alapján van rögzítve; Kendall és Coplen, 2001 szerint.

- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), 1702–1703.
- Kendall, C., és Coplen, T. B. (2001). Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States. *Hydrological Processes*, 15, 1363-1393.
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L., és Gonfiantini, R. (1993). Isotopic patterns in modern global precipitation. In P. K. Swart, K. C. Lohmann, J. McKenzie, S. Savin (Eds.), *Climate Change in Continental Isotopic Records*.

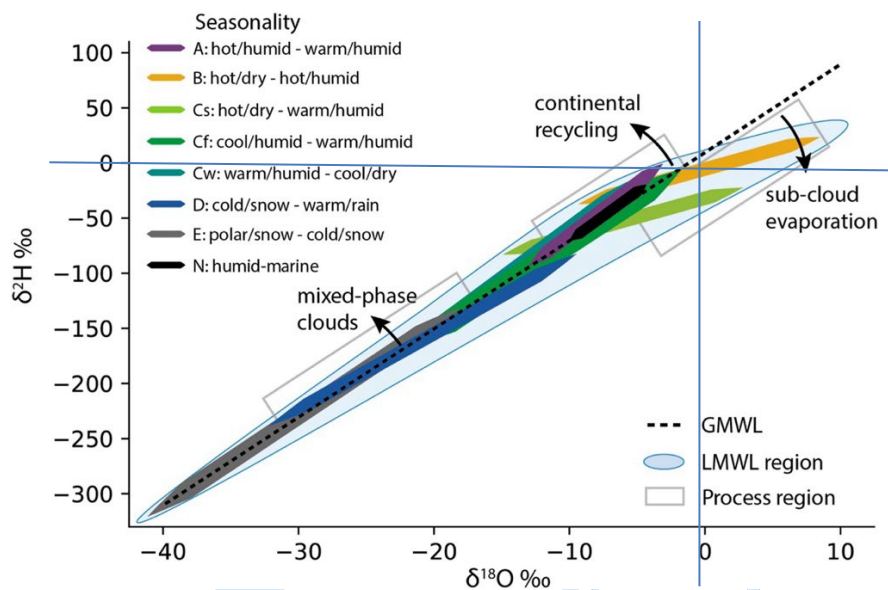
A 4.3.2. fejezetben említett vízvonál-mereedség és tengelymetszet különbségek a mediterrán térségben milyen fizikai folyamatokra utalnak? A mellékelt cikkekben nyilván van erre információ, de a disszertációban is meg kellett volna említeni legalább egy mondatban.

Válasz: A Mediterrán térség csapadék stabilizotópos összetétele, és a $\delta^{18}\text{O}$ és $\delta^2\text{H}$ lineáris kapcsolata nagyban különbözik a kontinentális Európában megfigyeltektől. A régiónak három fő páraforrása van: a Földközi-tenger, az Atlanti-óceán és a szárazföldi visszapárolgás. Ezek a páraforrások nagyban különböznek egymástól klimatikus jellemzőikben, ami meghatározza a vízvonalak tengelymetszete és mereedsége közötti regionális eltéréseket.

Ezt jól szemlélteti a Hatvani és mtsai. (2023)-ból vett Köppen-Geiger diagram (2. ábra) és a Putman és mtsai. (2019)-ből vett diagram (3. ábra). Utóbbi bemutatja, hogy a különböző Köppen-zónákból származó vízminták esetén a δ - δ összefüggés mereksége és tengelymetszete hogyan változhat és térhet el a GCsVV-től, illetve, hogy az itt jelzett folyamatok milyen irányba tolják el a minták δ - δ összetételét a GCsVV-hez képest (3. ábra).



2. ábra. A mediterrán térség Köppen-féle éghajlati zónái (Kottek és mtsai., 2006) és csapadék stabilizotópos összetételét mérő monitoringállomások elhelyezkedése.



3. ábra. A δ - δ ($\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$) diagram a lokális meteoritikus vízvonalakkal (LMWL = LCsVV), valamint ezek elhelyezkedésével a globális meteoritikus vízvonalhoz (GMWL = GCsVV) viszonyítva Putman és mtsai. (2019) szerint. Az ábra szemlélteti, hogy a különböző Köppen-féle éghajlati zónákhoz tartozó LCsVV-k hogyan viszonyulnak a GCsVV-hez. Minden vonal egy idealizált hidroklimatikus forgatókönyvet jelképez. A grafikon azon régióit, amelyeket az elemzett folyamatok a leginkább befolyásolnak, egy keret és egy nyíl emeli ki, jelezve, hogy az adott folyamat milyen irányba téríti el az LCsVV-eket a GCsVV-hez képest.

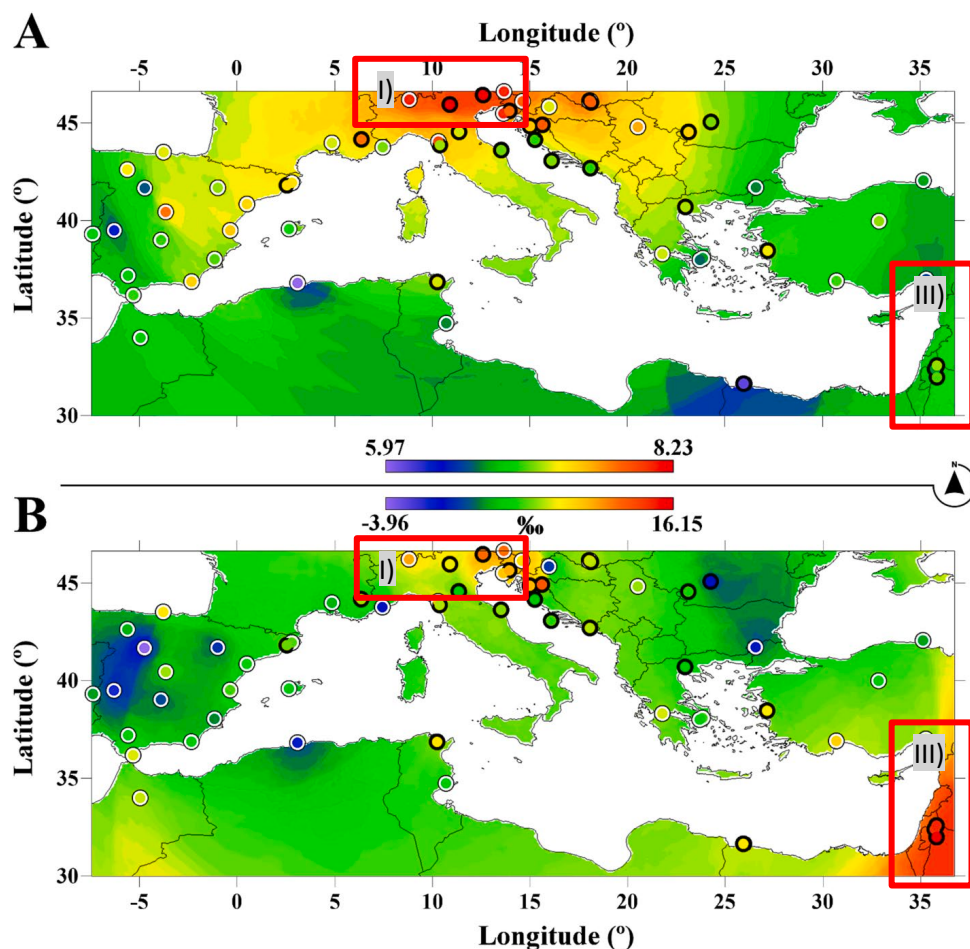
A Tisztelt Bíráló kérdésére adott konkrét válaszom, hogy a mediterrán térségben a vízvonal-mereedség és tengelymetszet eltérései elsősorban az alábbi fizikai folyamatokra utalnak:

I) Egyensúlyi frakcionáció (Rozanski és mtsai., 1993), ez a folyamat jellemzi pl. Olaszország északi részét az Alpok előterében, ahol a vízvonal tengelymetszete és a mereedsége a GCsVV értékeihez közelít (4. ábra: I).

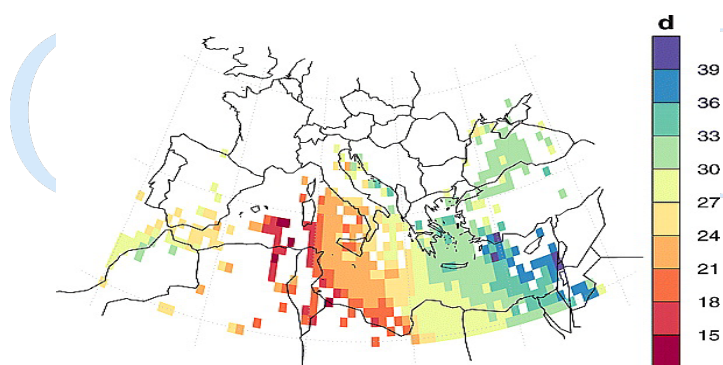
II) Felhőszint alatti párolgás (sub-cloud evaporation), ez a folyamat jellemzi azokat a régiókat, ahol a mereedség 8 alatti, a tengelymetszet pedig szintén kicsi (pl. Wang és mtsai., 2016; 2018). A jelenség lényege, hogy a csapadékhullás során a felhőréteg aljáról a felszín felé hulló esőcseppek áthaladnak egy telítetlen levegőrétegen, ahol részlegesen elpárolognak. Mivel a vízmolekulák izotópos frakcionációját a párolgáskor elsősorban a molekulatömegtől függő diffúzió határozza meg. Ezért a párolgás során a nehezebb izotópokat tartalmazó molekulák közül is a $^1\text{H}^1\text{H}^{18}\text{O}$ jobban dúsul a vízfázisban, mint a $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$, ami kinetikus (nem-egyensúlyi) frakcionálódást eredményez. A párolgással érintett vizek vízvonalára az egyensúlyi-frakcionálódásra jellemző értéknél (~ 8) kisebb mereedség jellemző. Általánosságban ez a folyamat a vizsgált régióra a legjellemzőbb.

III) A Kelet-Mediterráneum (Levant) egy különleges térség, ahol a vízvonal mereedsége relatíve kicsi, ugyanakkor a tengelymetszet nemcsak regionális, hanem világviszonylatban is az egyik legmagasabb (4. ábra: III). Az itt jellemző hidrometeorológiai körülmények miatt a meleg tengerfelszín felett rendkívül száraz levegőbe történik a párolgás, ami kivételesen magas d-többséget

(Dansgaard, 1964) eredményez a párában (5. ábra; Pfahl és Wernli, 2008). Ez a jelenség a vízvonal jellemzőiben magasabb tengelymetszetként jelenik meg.



4. ábra. A vizsgált mediterrán makrorégióba modellezett LCsVV-k meredekségének (A) és tengelymetszetének (B) pontbeli értékei és a RFsp-ele modellel kapott interpolált térképek. A színes pontok a csapadékmérő állomásokat jelölik. További részletek a rövid értekezés 4.3.1. fejezetében és Hatvani és mtsai. (2023)-ban olvashatók.



5. ábra. A modellezett d-többslet értékek a légköri vízpárában a Földközi-tenger térségében kb. 980 hPa nyomáson, 2001. november 18-án. Pfahl és Wernli (2008) szerint.

- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- 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.
- Kottek, M., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263.
- Pfahl, S. és Wernli, H. (2008). Air parcel trajectory analysis of stable isotopes in water vapor in the eastern Mediterranean. *Journal of Geophysical Research*, 113, D20104.
- Putman A. L., Fiorella, R. P., Bowen, G. J., Cai, Z. (2019). A global perspective on local meteoric water lines: Meta-analytic insight into fundamental controls and practical constraints. *Water Resources Research*, 55, 6896–6910
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L., Gonfiantini, R. (1993). Isotopic patterns in modern global precipitation. In P.K. Swart, K.C. Lohmann, J. Mckenzie, & S. Savin (Eds.), *Climate Change in Continental Isotopic Records*.
- Wang, S., Zhang, M., Che, Y., Zhu, X., Liu, X. (2016). Influence of below-cloud evaporation on deuterium excess in precipitation of arid Central Asia and its meteorological controls. *Journal of Hydrometeorology*, 17, 1973–1984.
- Wang, S., Zhang, M., Hughes, C.E., Crawford, J. és mtsai. (2018). Meteoric water lines in arid Central Asia using event-based and monthly data. *Journal of Hydrology*, 562, 435-445.

Mennyire tartja elhanyagolhatónak a légkörből száraz, illetve nedves ülepedéssel a Balatonba jutó nitrogén mennyiségét a vízminőség szempontjából? Erre vonatkozóan nincs a tanulmányban utalás. Különböző, egymásnak ellentmondó vizsgálatok szerint a múlt évtizedekben a légkörből 600-1500 t/év nitrogén vegyület származott N-ben kifejezve. Ezek a paraméterek nem szerepelnek a táblázatban a megfigyelték között.

Válasz: Köszönöm, hogy a Tisztelt Bíráló felhívta figyelmem erre a tényezőre is, hiszen a légköri nitrogénterhelést mindeddig nem vizsgáltam.

Kugler és mtsai. (2008) munkáját megelőzően csak becslések álltak rendelkezésre a Balaton légköri N terhelésére vonatkozóan, és már ezek a becslések is egy nagyságrenddel nagyobbra tették ennek mértékét a P terheléshez képest (Jolánkai és Bíró, 2005). Az, hogy a tó trofikus állapotának szempontjából melyik tápanyag a kritikusabb - a P vagy a N -, alapvetően a N:P aránytól függ, és a 2010-es években már együttesen voltak meghatározóak (N:P arány kb. 10:1) (Durand és mtsai., 2011).

2000 és 2004 között nagyjából nettó $730 \text{ mg N m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ érkezett a Balatonba a légkörből (Kugler és mtsai., 2008: Table 1), amelynek közel kétharmada az algák számára inkább hozzáférhető nitrát formájában jutott a rendszerbe. E nettó fluxus kb. 10%-a száraz és 90%-a nedves ülepedésből származott. Ha ezt az értéket felszorozzuk a Balaton vízfelületére (kb. 596 km^2), akkor becslésem szerint az említett öt éves időszakban átlagosan $\sim 435 \text{ t N év}^{-1}$ volt az input a légkörből a Balatonba. Ez a mennyiség a rendszerváltás előtti évtized éves átlagos összes N terhelésének (Kugler, 2014: 1.3. táblázat 1981 - 1990) hozzávetőleg 15%-át tenné ki. Egy évtizeddel később, 2012-ben, már csak 315 mg összes N m^{-2} jutott a Balatonba, ami több mint 50%-os csökkenést jelent. Ez kb.

190 t N év^{-1} , amennyiben a siófoki adatokat reprezentatívnak tekintjük az egész tóra. A 2024-es adatokat elkértem a HungaroMettől, azonban 2024 júliusától szeptember végéig a mintavevő nem működött és novemberből nem volt adat, így ennek az évnek az adataival nem tudtam számolni. A 2023-as értékeket pedig a bírálói válaszok leadásáig nem kaptam meg.

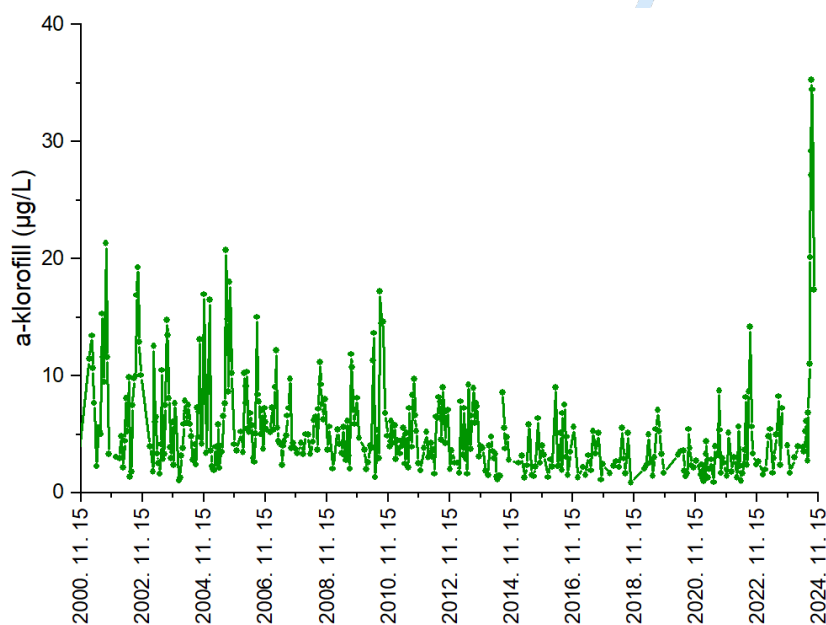
A fent leírt jelentősnek mondható értékek ellenére úgy gondolom, hogy továbbra is a P maradt a limitáló tényező a Balaton esetében. A N esetében ugyanis az ammónia pufferként viselkedik a tó nitrogénmérlegében. Nagyobb N-terhelés esetén megnöveli az ún. kompenzációs-pont koncentrációt, emiatt nő a kibocsátás, ami csökkentheti az ülepedés hatását. Mivel a Balaton vizének pH-ja 8,3–8,9 között mozog, így egyszerre lehet jelen oldott ammóniagáz és ammóniumion a vízben, ami lehetővé teszi, mind az ammónia ülepedését, mind felszabadulását a tóból. Az ammónia nettó fluxusát számtalan tényező mellett a víz ammónia+ammónium és a levegő ammónia koncentrációja határozza meg. Ilyen formán egy a Balatont érő nagyobb nitrogénterhelés esetén a kompenzációs-pont koncentráció megnő, így az ammónia kibocsátás megnövekszik. Nagyságrendnyi terhelésnövekedés nagyságrendnyi kibocsátás növekedéssel járhat (Kugler et al., 2015). Ha ez a folyamat nem lenne (ilyen mértékben) jelen a Balatonban sokkal kritikusabb lenne a légköri N ülepedés kérdése a tó trofikus állapota szempontjából. Megjegyzem azonban, hogy a folyamatos, jól működő monitoring elengedhetetlen, mivel egyensúlyi folyamatokról van szó, így ha azok egyik eleme is nagymértékben megváltozik, az az egész rendszer működését befolyásolhatja

- Durand, P., Breuer, L., Johnes, P.J., Billen, G., Butturini, A., Pinay, G., van Grinsven, H., Garnier, J., Rivett, M., Reay, D.S., Curtis, C., Siemens, J., Maberly, S., Kaste, O., Humborg, C., Loeb, R., de Klein, J., Hejzlar, J., Skoulikidis, N., Kortelainen, P., Lepistö, A., Wright, R. (2011): Nitrogen processes in aquatic ecosystems. In: *The European Nitrogen Assessment* eds. Sutton, M.A., Howard, C.M., Erismann, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grinsven, H., Grizzetti, B. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 126–146.
- Jolánkai G., Bíró I. (2005): *A Balaton tápanyag terhelésének mérlege, mérése és modellezése, 2004. A munka második részének zárójelentése.* Témaszám: 714/31/648601. VITUKI Kht. Vízminőség-védelmi Szakágazat. 77p.
- Kugler, Sz. (2014). *A Balaton és légkör közötti nitrogénforgalom meghatározása.* PhD dolgozat, ELTE TTK.
- Kugler, Sz., Horváth, L., Machon, A. (2008). Estimation of nitrogen balance between the atmosphere and Lake Balaton and a semi natural grassland in Hungary. *Environmental Pollution* 154, 498–503
- Kugler, Sz., Horváth, L., Weidinger, T. (2015). Felelős-e a légköri nitrogén a balatoni tápanyagdúsulásért? *Természet világa*, 146 (11) 495–499

Az első tézispontban történt megállapítás, miszerint „a pontforrás eredetű szennyvízhez köthető folyamatok szerepét átvették a természeti folyamatokat inkább jellemző háttértényezők (pl. vízhőmérséklet)” összefüggésbe hozható-e a 2024 évben megfigyelt pikoalga elszaporodáshoz?

Válasz: Köszönöm szépen a kérdést. 2024-ben valóban rendhagyó algavirágzás volt tapasztalható a Balatonban, ahogy azt a Tisztelt Bíráló is megjegyzi. Ez különösen a Siófoki-medencében volt

kritikus, ahol a fitoplankton biomassza jelentős részét rendszerint pikoalgák alkotják. 2024-ben azonban nem ezek, hanem a *Cylindropermopsis raciborskii* szaporodott el. A vízvirágzás szokatlan jellegét az adta, hogy míg a Siófoki-medencére általában 10–15 $\mu\text{g l}^{-1}$ közötti klorofill-a koncentráció a jellemző, addig 2024-ben ennek csúcsa elérte a 35 $\mu\text{g l}^{-1}$ körüli értéket (6. ábra és Mádlné Szőnyi Judit 2.3 #2 kérdésére adott válasz táblázata). Ez az érték inkább a Keszthelyi-medencére szokott jellemző lenni (Hatvani és mtsai. (2020): Table A1). Ezzel párhuzamosan a Keszthelyi-medencében nem jelentkezett a 2019-eshez hasonló, rekordméretű algavirágzás (Mádlné Szőnyi Judit 2.3 #2 kérdésére adott válasz táblázata; Somogyi és Vörös, 2024).



6. ábra. A klorofill-a koncentráció időszora Tihanyánál. Forrás: Somogyi Boglárka (HUN-REN BLKI), pers. comm.

A 2015-ös tanulmányomban azt mutattam be, hogy „... a diffúz mezőgazdasági terheléshez és jellemzően pontforrás eredetű szennyvízhez köthető folyamatok szerepét átvették a természeti folyamatokat inkább jellemző háttértényezők (pl. vízhőmérséklet).” (1. tétel). A 2019-es rekord vízvirágzás kiváltó okai között szerepelt a magas vízállás amely – bár időszakosan megszakítva – lehetővé tette a rétegzettség kialakulását a Keszthelyi-medencében, az alsóbb rétegekben kialakult hypoxia, az üledékből felszabaduló foszfor, valamint a kifejezetten magas vízhőmérséklet. Tehát a belső terhelés és a klímaváltozás miatt előállt, precedens nélküli körülmények együttese okozta a 2019-es nagymértékű algavirágzást (Istvánovics és mtsai, 2022). Ezen körülményeket figyelembe véve, ha a 2015-ös kutatást most végeztük volna el, a megfogalmazásom a következőképp módosult volna:

...a diffúz mezőgazdasági terheléshez és jellemzően pontforrás eredetű szennyvízhez köthető folyamatok szerepét átvették a természeti folyamatokat **(beleértve a klímaváltozás hatásait)** inkább jellemző háttértényezők (pl. vízhőmérséklet).

- Istvánovics, V., Honti, M., Torma, P., Kousal, J. (2022). Record-setting algal bloom in polymictic Lake Balaton (Hungary): A synergistic impact of climate change and (mis)management. *Freshwater Biology*, 67(6), 1091-1106.
- Somogyi, B. és Vörös, L. (2024). Váratlan és előre nem látható változások a Balaton mikroszkopikus algavilágában. <https://www.blki.hun-ren.hu/node/15533> Megnyitva: 2025.03.03.
- Somogyi, B. és Vörös, L. (2021). Balaton, algák– összefoglaló az idei nyár algológiai történéseiről. <https://www.blki.hun-ren.hu/node/14838> Megnyitva: 2025.04.07.

Végezetül szeretném még egyszer megköszönni Prof. Horváth Lászlónak részletes és alapos bírálatát és konstruktív kérdéseit.

Budapest, 2025. 04. 14.


Dr. Hatvani István Gábor