

Éghajlatváltozás hatása sekély tavak hőmérsékleti és rétegződési viszonyaira

Török Sebestyén Dániel, Torma Péter

Víztudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Kivonat

Az éghajlatváltozással párhuzamosan, a tavi belső folyamatok, mint például a hőmérsékleti rétegződés időtartama vagy intenzitása is megváltoznak, ami a biológiai folyamatok kiszámíthatatlanabbá válását okozza. Ez a hatás sekély tavakban esetében, mint amilyen a Balaton vagy a Velencei-tó, jóval súlyosabb, mivel az ilyen típusú tavak sokkal érzékenyebbek lehetnek a külső változásokra. A Balatonnál 2019-ben kialakuló rekordot jelentő algavirágzás, 25 év sikeres eutrofizáció-kezelés után alakult ki, melynek oka részben, a szokatlanul hosszú időszakos rétegződés volt. Mivel az éghajlatváltozás okozta hőmérsékleti rétegződéssel kapcsolatos vizsgálatok jellemzően a mély tavakra összpontosítanak, ebben a tanulmányban egy sekély polimiktikus tónak, a Balatonnak elemezzük a 40 éves szimulált vízhőmérséklet-idősorát, továbbá számszerűsítjük hőmérsékleti rétegződésének és a hőszerkezetének változásait. Az elmúlt négy évtized szimulálásához az egydimenziós General Ocean Turbulence Model (GOTM) modellt használtuk, melyet bias-korrigált ECMWF ERA5 reanalízis idősorokkal hajtottunk meg. A modell kalibrálása és validálása nyílt vízi nagyfrekvenciás hidrometeorológiai megfigyelések lapján történt. A mérések 2019-től napjainkig állnak rendelkezésre, a tavasztól ősziig terjedő időszakokra.

Kulcsszavak

Éghajlatváltozás, hőmérsékleti rétegződés, sekély tavak, Balaton

BEVEZETÉS

A Balaton Keszthelyi-medencéjében 2019-ben kialakuló rekord méretű algavirágzás majd 25 évvel az eutrofizáció sikeres megfékezése után alakult ki. Az algaprodukciónak részbeni oka a tó szokatlanul hosszú, időszakos hőmérsékleti rétegződése volt. A rétegződés következtében az üledékfelszínen anoxikus állapot tudott kialakulni, ami aztán az üledékben tárolt foszfor felszabadulásához vezetett, ezzel megnövelve a tó belső tápanyagterhelését, illetve elérhetővé téve az algák számára a növekedésüket limitáló tényezőt, a foszfort.

A tavak hőmérsékletét, illetve rétegződését a meteorológia hajtóerők alakítják. Ezek közül a legfontosabb a napsugárzás, amely növeli mind a vízhőmérsékletet, mind pedig a rétegzettség intenzitását, illetve a szél, ami a keveredés fő meghajtója. Az éghajlatváltozás következtében ezen meghajtó folyamatok megváltozhattak, s ezáltal a tó rétegződési és keveredési jellemzői is. Ezen hatások sekély tavakban esetében, mint amilyen a Balaton vagy a Velencei-tó, jóval súlyosabbak lehetnek, mivel az ilyen típusú tavak kis mélységükből eredő kitettségük miatt érzékenyebben reagálhatnak a külső változásokra. A Balaton esetében a meteorológiai meghajtók mellett a vízállás is számottevően változott az elmúlt évtizedek során végbemenő természetes és mesterséges behatások következtében. A meteorológiai mellett a vízállás is közvetlenül befolyásolja a tó hőmérsékleti és rétegződési jellemzőit, hiszen minél nagyobb a vízmélység, annál hosszantartóbb és erősebb rétegzettség tud kialakulni. Mindezek okán, jelen tanulmány során arra keressük a választ, hogy a Balaton hőmérsékleti és rétegzettség viszonyai milyen módon változtak meg az elmúlt négy évtizedben, és hogy ebben mekkora szerepet játszott az éghajlatváltozás.

MÓDSZERTAN

A Balaton elmúlt 40 évének hőmérsékleti és rétegzettségi viszonyainak feltárására nem állnak rendelkezésre mérési adatok, így numerikus modellszimulációra tudunk támaszkodni. A vizsgálatot egy egydimenziós hőmérsékleti és keveredési modellel végezzük el, amely a vízoszlop függélye mentén határozza meg a hőmérsékletet és a keveredési mutatókat. Az alkalmazott modell a General Ocean Turbulence Model (GOTM), amely $k-\epsilon$ turbulencia modellt használ (Umlauf és Burchard 2005). A modell kalibrálásához, illetve validálásához a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéke által, az ELTE Meteorológiai Tanszékének és a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóságának a közreműködésével működtetett mérőállomás adatai szolgáltak alapul (Lükő és társai 2022, Istvánovics és társai 2022). A mérőállomás 2019 és 2022 között üzemelt a Keszthelyi-medence közepén a késő tavaszi - kora őszi időszakban, jellemzően május végétől október elejéig. A mérőállomás mind a víz hőmérsékletek függély menti eloszlását, mind a meghajtó meteorológiai változókat nagy időfelbontással rögzítette.

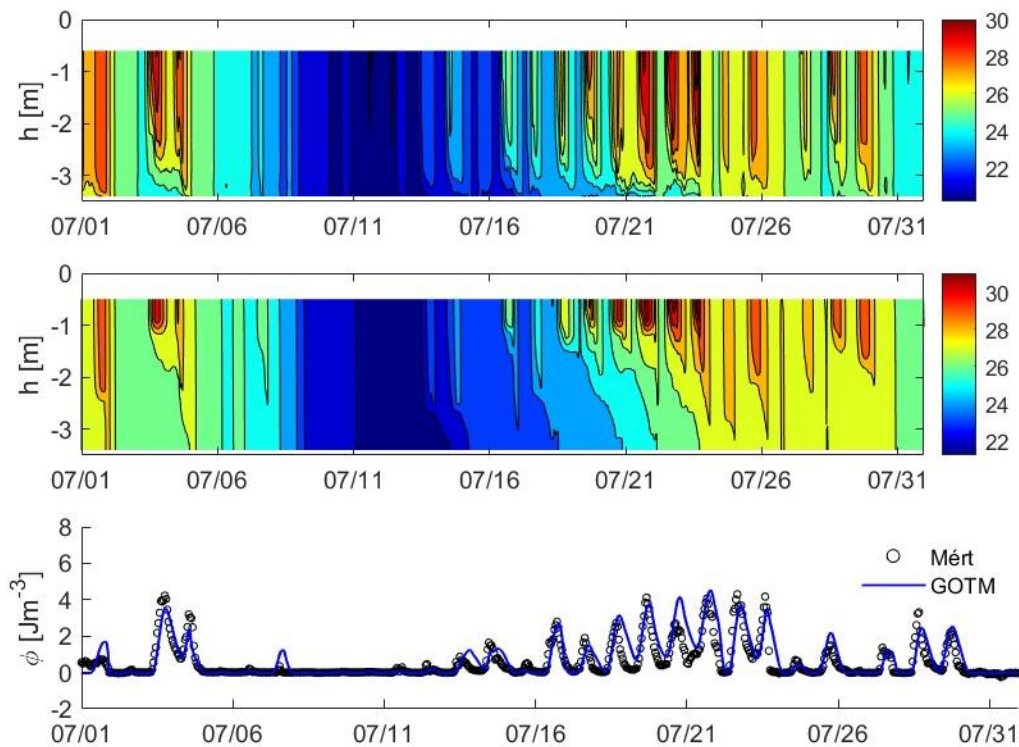
A 40 évre visszanyúló szimulációhoz szükséges bemeneti meteorológiai adatokat az ECMWF ERA5 reanalízis idősorok szolgáltatták. Ezek a szélesség, légnyomás, léghőmérséklet, relatív páratartalom, és rövidhullámú sugárzás. Mivel a reanalízis idősorokat szolgáltató szinoptikus állomások a szárazföldön helyezkednek el, míg a vizsgálati helyszín a nyílt vízfelület, így a meteorológiai adatok bias-korrigáláson estek át, aminek keretén belül a szélességet és a bejövő rövidhullámú sugárzást kellett korrigálni. A bias korrekciót az elmúlt évek saját mérései alapján végeztük el. A modell kalibrálandó paramétere a fénykioltási együttható volt, amit konstans értékkel közelítettünk, értéke 0.4 m^{-1} -re adódott a kalibráció során. A bejövő hosszuhullámú sugárzás számításához a felhőborítottság szükséges, amit a tiszta égbolt esetén beérkező és a mért sugárzás hányadosának segítségével határoztunk meg.

A modellezett időszak 1981-től 2020-ig volt, a májustól októberig terjedő, öt hónapos időszakot szimuláltuk. A modellezés során a vízmélységet a Balaton átlagos havi vízszintjének megfelelően hónapról hónapra változtattuk, hogy annak hatása is számszerűsíthetővé váljon. A futtatást követően a modelledményeket felhasználva kiszámítottuk a vízoszlop függély menti átlagos hőmérsékletét (T_w), illetve a rétegződés erősségének jellemzésére a potenciális energiaanomáliát (Simpson és társai 2014, Wiles és társai 2006) használtuk. A potenciális energiaanomália (ϕ) azt fejezi ki, hogy rétegzett vízoszlop teljes átkeveredéséhez szükséges mekkora energiamennyiségre (Jm^{-3}) van szükség.

EREDMÉNYEK

Kalibráció és validáció

A modellszimulációkkal tehát a mélység menti hőmérsékleteloszlást határoztuk meg, amely esetében azt tapasztaltuk, hogy a modell jól leköveti az egyes rétegződési periódusokat, illetve azok erősségét. Erre mutat példát az 1. ábra, amelyen a 2022. július hónap során mért és modellezett víz hőmérsékleteket jelenítjük meg.



1. ábra: Mért (felső ábra) és modellezett (középső ábra) mélység menti hőmérsékleteloszlások, és a potenciális energiaanomália értékének (ϕ) mért és szimulált idősorai (alsó ábra) 2022. július hónapjára.

A modell kalibrálása és validálása a T_w és ϕ változókra lett elvégezve. A kalibráció a 2019. évi, míg a validálás a 2022-es mérésekre történt. Minden esetben meghatároztuk a Nash-Sutcliffe féle hatékonysági mutatót (NS), és az átlagos négyzetes hibát (RMSE). Ezen értékeket az 1. táblázat foglalja össze. Az eredmények alapján látható, hogy a modell a tó vízhőmérsékletét 1.4 °C -on belül, míg a rétegzettség erősség leíró potenciális energiaanomáliát 0.72 Jm^{-3} -en belül képes visszaadni.

	T_w [°C]		ϕ [Jm ⁻³]	
	RMSE	NS	RMSE	NS
Kalibráció	1.37	0.81	0.72	0.55
Validáció	0.96	0.91	0.57	0.58

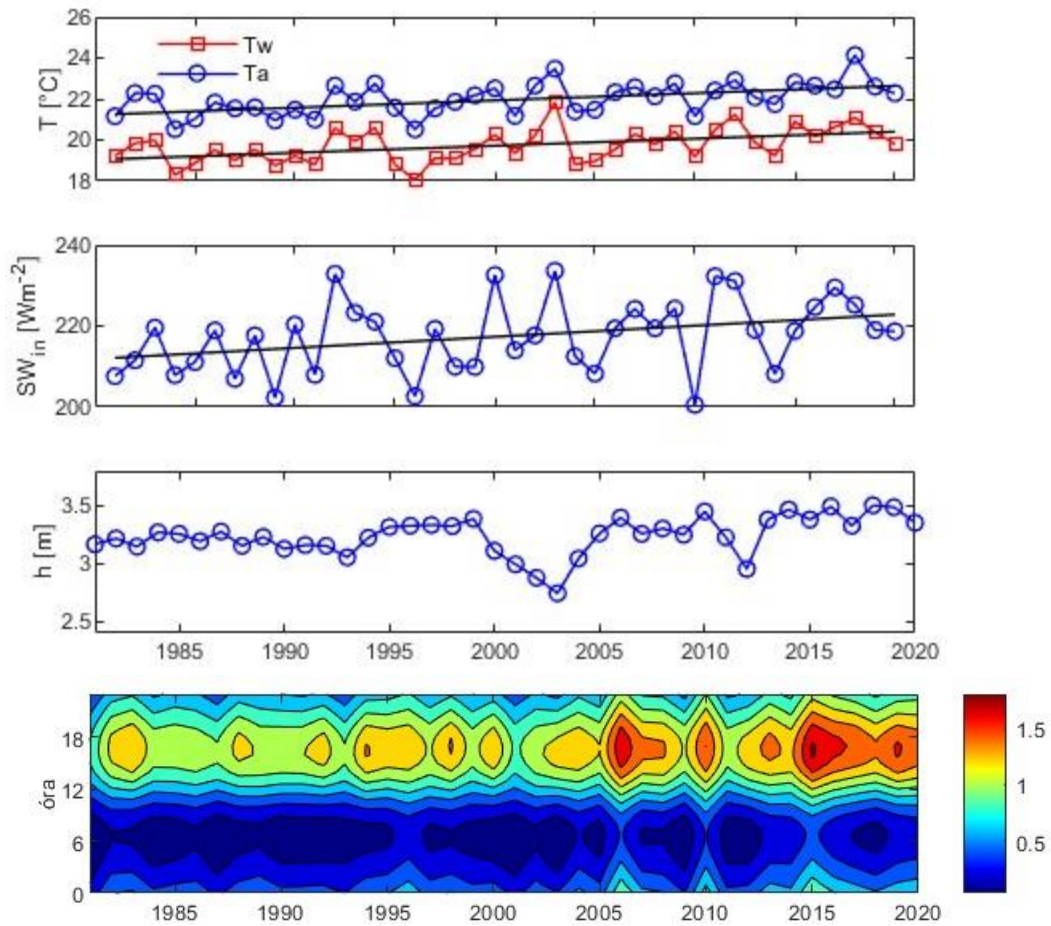
1. táblázat: Modell kalibrációjához (2019) és validációjához (2022) tartozó RMSE és NS értékek

Mindezek alapján megállapítható, hogy a modell kellő pontossággal képes számítani a vízhőmérsékletek mélység menti eloszlását és az abból eredő rétegzettséget az ECMWF reanalízis meteorológiai adatsorok, mint meghajtók alapján.

Rétegzettséget befolyásoló tényezők

Mint említettük a Balaton hőmérsékleti rétegzettséget alapvetően a meteorológia és a vízmélység befolyásolja. A meteorológiánál a vizsgált időszakot tekintve egy növekvő trend figyelhető meg mind a beérkező rövidhullámú sugárzás (2/b ábra), $2.7 \text{ Wm}^{-2}/10 \text{ év}$, mind pedig a léghőmérséklet tekintetében (2/a ábra), $0.3 \text{ °C}/10 \text{ év}$. A vízmélység kapcsán szintén egy növekvő tendencia látható (2/c ábra), ami a tó vízszintszabályozására vezethető vissza. A vízszint megemelése két ütemben történt, először 2003-ban, mikor a szabályozási vízszint felső korlátját 110 cm-re emelték, majd 2016-ban, mikor azt 120 cm-re változtatták. A 2003-as emelés kapcsán azt érdemes kiemelni, hogy bár a felső korlátot 110 cm-re változtatták, azt csak 2005 szeptemberére érte el a Balaton vízszintje (Kravinszkaja és Varga, 2019). Ebből adódóan, az emelés tényleges hatásáról 2006-tól kezdődően tudunk beszélni.

A Balatonra napi ciklusú hőmérsékleti rétegződés jellemző, miszerint reggeltől a napsugárzás hatására megjelenik majd felerősödik a rétegzettség. A napsugárzás megszűnésével a hosszuhullámú kisugárzás és a látens (párolgási) hőáramnak köszönhetően a víz felszíne lehűl és az ezzel járó sűrűsénövekedés hatására alábukik, átkeverve a vízoszlopot. A napi ciklikusság miatt a ϕ változón keresztül néztük, hogy a rétegzettség a napon belül hogyan változott meg az elmúlt 40 évben (2/d. ábra). A vízállással való kapcsolat vizsgálatára az 1981 - 2020-ig tartó időszakot három részre osztottuk fel: 1) 1981-2005, mikor még nem volt vízszintemelés, illetve annak hatása még nem jelentkezett; 2) 2006-2015, mikor a szabályozási vízszint felső korlátját 110 cm-re növelték; 3) 2016-2020, 120 cm-re való átállás. Az 1) időszakban látható, hogy a rétegzett periódusok száma enyhén megnőtt, emiatt a ϕ értékekben is egy növekedés volt tapasztalható, $\sim 1.1 \text{ Jm}^{-3}$ -ről $\sim 1.3 \text{ Jm}^{-3}$ -re, vagyis kis mértékben nőtt a rétegzettség stabilitása. Például a 90-es évek első felében a vízállás enyhe csökkenő tendenciája mellé növekvő rétegződés társul, amely a növekvő sugárzás és léghőmérséklet következménye. A 2) időszakban egy hirtelen ugrás látható a ϕ értékeiben, 1.3 Jm^{-3} -ről $1.4\text{-}1.45 \text{ Jm}^{-3}$ -re nőnek, vagyis a vízszint növelésével a rétegzettség is megnőtt. Továbbá, a rétegzettség ideje is kitolódott, hajnali 1-2 órakor még jelentős nagyságú rétegzettség tudott fennmaradni, illetve a rétegződési periódusok száma is tovább nőtt. A 3) időszak folyamán szintén tapasztalható a hirtelen növekedés ϕ értékeiben, 1.45 Jm^{-3} -ről $1.55\text{-}1.6 \text{ Jm}^{-3}$ -re, vagyis a 2) időszakban tapasztalt hatások tovább erősödtek, ami természetesen nemcsak a vízállás, hanem a változó éghajlat együttes eredménye.

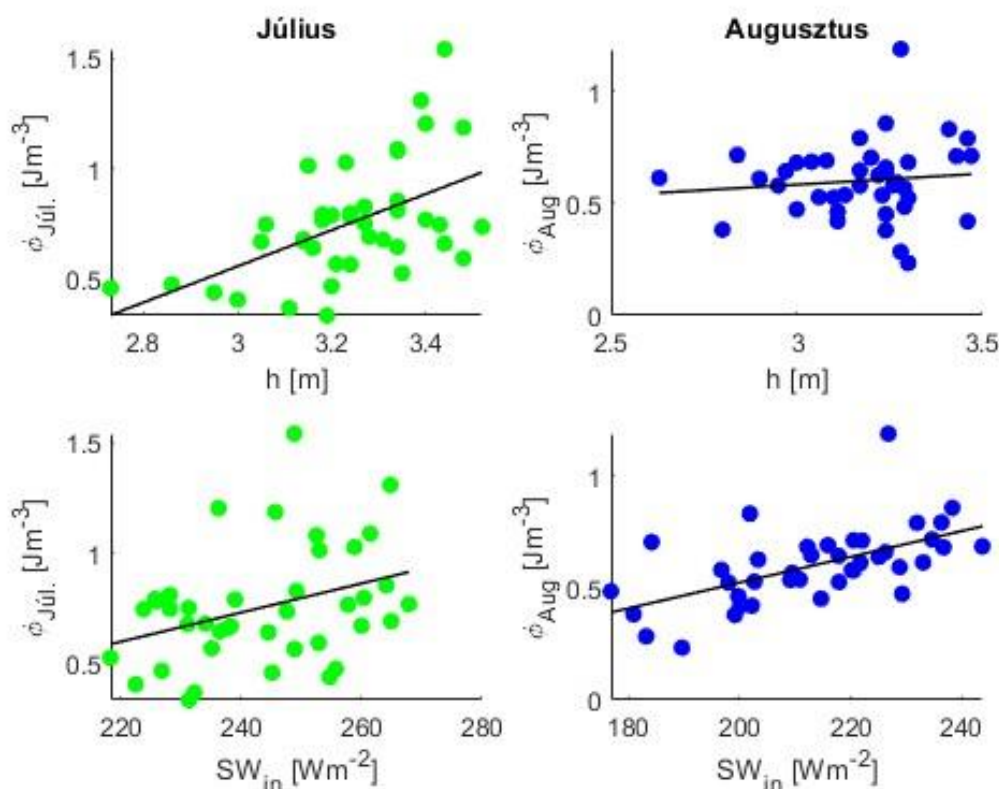


2. ábra: Lég- és vízhőmérsékelt (2/a), rövidhullámú sugárzás (2/b), vízmélység (2/c), és potenciális energiaanomália értékének (ϕ) napon belüli alakulása (2/d) a futtatási időszakra

A vízmélység és rétegzettség közti kapcsolat pontosabb feltárása érdekében megnéztük, hogyan alakult a vízállás (h) és ϕ kapcsolata az egyes hónapokban (3. ábra). Az tapasztaltuk, hogy a két tényező közti kapcsolat június is július hónapokban igen jelentős, ellenben augusztusban majdhogynem elhanyagolható. A kapcsolatok erősségének számszerűsítése érdekében kiszámítottuk az r^2 -ket (2. táblázat). A legerősebb kapcsolatot július hónapra kaptuk. Ezt követően a beérkező rövidhullámú sugárzás (SW_{in}) és ϕ közötti kapcsolatot néztük meg a különböző hónapokra, ahol azt tapasztaltuk, hogy minden hónapban jelentős a kapcsolat, ellenben júliusban számottevően gyengébb, mint a többi esetében (2. táblázat). A vízállás tekintetében fontos észrevenni az adatsorokra illesztett trendvonalakat tekintve, hogy augusztusban volt a legkisebb a görbe meredeksége (3. ábra), ami azt jelenti, hogy augusztusban a növekvő mélységgel is csak kevéssel nő a rétegzettség stabilitása. Ezzel egyidejűleg a legerősebb SW_{in} - ϕ kapcsolatot augusztus hónapra kaptuk. Ez alapján azt mondhatjuk el a havi átlagos viselkedésről, hogy míg júliusban a vízállás és a besugárzás hasonló szerepet játszik a rétegzettség átlagos alakulásában, addig augusztusban a besugárzás veszi át a kulcs szerepet.

	Május	Június	Július	Augusztus	Szeptember
$h - \phi$	0.01	0.11	0.28	0.01	0.09
$SW_{in} - \phi$	0.22	0.26	0.12	0.34	0.32

2. táblázat: A $h-\phi$ és $SW_{in}-\phi$ kapcsolat erősségét leíró r^2 értékek a modellezett hónapokra 40 év alapján.



3. ábra: A $h-\phi$ és $SW_{in}-\phi$ tényezők közötti kapcsolatot július és augusztus hónapokra 40 év alapján.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az éghajlatváltozás következtében a tavi keveredési folyamatok és ezáltal a hőmérsékleti rétegződés időtartama vagy intenzitása is megváltoznak, ami az ökológiai folyamatokra közvetlenül kihat és kiszámíthatatlanabbá teszi az adott ökoszisztéma jövőjét. Miután éghajlatváltozás okozta rétegződéssel kapcsolatos vizsgálatok jellemzően a mély tavakra összpontosítanak, jelen a tanulmányban egy sekély polimiktikus tónak, a Balatonnak elemeztük a 40 éves víz hőmérséklet-idősorát és annak mélység menti eloszlását numerikus modellszimulációk alapján. Továbbá számszerűsítettük hőmérsékleti rétegződésének és a hőszerkezetének változásait.

A vizsgálatok során azt kaptuk, hogy az éghajlatváltozás következtében egyrészt megnövekedett a rétegzett periódusok száma, másrészt pedig a rétegzettség ereje is megnőtt, aminek trendje $\sim 0.08 \text{ Jm}^{-3}/10 \text{ év}$. A vízmélység hatását tekintve, a vízszint növelésével egy hirtelen növekedés volt tapasztalható a rétegzettség stabilitását jellemző ϕ értékekben. 10 cm-es vízállásemelkedés esetén ez $0.1-0.15 \text{ Jm}^{-3}$ volt. A vízszintemeléssel a

legalább 24 órán át fennmaradó rétegzettségek száma is megnőtt, az első vízállásnövekedésnél ez évi átlagos 3-ról 4-re, majd a másodikonál évi 4-ről 5-re emelkedett. Megállapítottuk továbbá, hogy rétegzettséget meghatározó tényezők hónapról hónapra változnak. Júniusban és augusztusban ez a napsugárzás, míg júliusban a vízmélység.

Elmondható tehát, hogy mind az éghajlatváltozásnak, mind a vízmélységnek látható és jelentős szerepe van a sekély tavak hőszerkezetének és hőmérsékleti rétegzettségének alakulásában. A vízmélységet tekintve egy olyan ellentmondáshoz jutunk, hogy bár az aszály ellen a vízszint megemelésével próbálunk küzdeni, ezzel azonban a tó rétegzettségére való lehetőségét nagyban megnöveljük, ami pedig belső tápanyagterheléshez vezethet. Emiatt átgondolandó, hogy valóban a vízszint megemelése a jó megoldás a jelenlegi problémákra, vagy van-e más alternatíva is.

IRODALOMJEGYZÉK

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. <https://doi.org/10.1111/fwb.13903>

Kravinszkaja G., Varga Gy. (2019). A Balaton új vízszint-szabályozási rendjének előzményei, Magyar Hidrológiai Társaság XXXVII. Országos Vándorgyűlés, Pécs, 2019. július 3-5., p. 12.

Lükő G., Torma P., Weidinger T., Krámer T. (2022). Air-Lake Momentum and Heat Exchange in Very Young Waves Using Energy and Water Budget Closure. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(12). <https://doi.org/10.1029/2021JD036099>

Simpson J. H., Lucas N.S., Powell B., Maberly S. C. (2014). Dissipation and mixing during the onset of stratification in a temperate lake, Windermere. *Limnology and Oceanography*, 60(1), 29-41. <https://doi.org/10.1002/lno.10008>

Umlauf L., Burchard H. (2005). Second-order turbulence closure models for geophysical boundary layers. A review of recent work. *Continental Shelf Research*, 25(7-8), 795-827. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.08.004>

Wiles P. J., van Duren L. A., Häse C., Larsen J., Simpson J. H. (2006). Stratification and mixing in the Limfjorden in relation to mussel culture. *Journal of Marine Systems*, 60(1-2), 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.09.009>