

A Fertő tó párolgásának vizsgálata párolgászámítási módszerek összehasonlításával

Török Sebestyén Dániel¹, Torma Péter^{1,2}

¹ Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapest (e-mail: toroks@edu.bme.hu)

² HUN-REN-SZTE Fotoakusztikus Környezetifolyamat-megfigyelési Kutatócsoport, Szeged (e-mail: torma.peter@emk.bme.hu)

DOI: 10.59258/hk.18333



Kivonat

Az éghajlatváltozás következtében a Fertő tó vízmérlegét alakító tényezők is megváltoznak, amelyek összegzett hatására csökkenés figyelhető meg a tó vízkészletében. A vízmérleget számos bizonytalanság terheli, és ezáltal a jövőbeli előrejelzéseket is. Ezek közül a legjelentősebb az evapotranszpirációnak, mint fő veszteségtagnak a pontos meghatározásából ered, így kutatásunk célja az ezt terhelő bizonytalanságok vizsgálata volt. A tó párolgása két részből tevődik össze, egyrészt nyílt vízfelületének párolgásából, másrészt nádasállományának párolgotatásából, melyet a meteorológiai folyamatok mellett a vegetációs folyamatok is alakítják, és így bár igen összetett folyamatról beszélünk, a gyakorlatban azt mégis nagyon egyszerű és pontatlan eljárással, az empirikus Meyer-képlet alkalmazásával számítják. Kutatásunkban a Meyer-féle párolgászámítási eljárást hasonlítottuk össze egy energiamérleg elvű eljárással 11 éves időszakra (2012–2022), amely során azt kaptuk, hogy a Meyer-módszer jelentősen túlbecsüli a párolgásokat, illetve annak klimatikus előrejelző képessége is bizonytalan, így használata a Fertő tó esetében megkérdőjelezhető. A tó vízmérlegét tekintve a Meyer-képletnél igen jelentős zárási hiba adódott, átlagosan -243 mm/év, míg az energiamérleg alapú módszernél jóval kisebb, -56 mm/év jött ki, tehát abban az esetben, mikor a párolgások fizikai alapon kerültek meghatározásra, számottevően jobb vízmérleg zárást kaptunk. Ezekből adódóan arra jutottunk, hogy a Fertő tó párolgásának meghatározására energiamérleg elven alapuló számításokat kell alkalmazni, mert azok nemcsak pontosabbak, hanem mivel fizikai alapokon nyugszanak, ezért mérések révén lehetőség van azok közvetett igazolására is.

Kulcsszavak

Fertő tó, párolgászámítás, nyílt vízfelület párolgása, nádas párolgotatása, éghajlatváltozás.

Analysing the evaporation of Lake Fertő and comparing evaporation calculation methods in the context of climate change

Abstract

As a result of climate change, the factors influencing the water balance of Lake Fertő are also changing, leading to a decrease in the lake's water resources. Many uncertainties burden the water balance and, thus, future forecasts. The most significant of them arises from the inaccurate determination of evapotranspiration as the primary loss component. Therefore, our research aimed to analyze the uncertainties associated with evaporation. The lake's evaporation consists of two components: evaporation from the open water surface and transpiration from the reed zones, shaped not only by meteorological factors but also by the physiological processes of the vegetation. We are faced with a complex process, in practice, it is still calculated using a very simple procedure, the empirical Meyer formula. In our research, we compared Meyer's evaporation calculation method with an energy balance-based one over an 11-year-long period (2012–2022). We found that the Meyer method significantly overestimates evaporation, and its climatic forecasting ability is also uncertain, making its use questionable for Lake Fertő. The Meyer formula showed a significant closure error regarding the lake's water balance, averaging -243 mm/year. In contrast, the energy balance-based method resulted in a much smaller one of -56 mm/year. This means that we achieved a significantly better water balance closure when evaporation was determined based on physical principles. As a result, we concluded that for determining the evaporation of Lake Fertő, energy balance-based calculations should be used, as they are more accurate and grounded in physical principles, allowing for verification through measurements.

Keywords

Lake Fertő, calculating evaporation, open water evaporation, evaporation of reed, climate change.

BEVEZETÉS

A Fertő tónál 2022-ben kialakult rekord alacsony vízállás újonnan felhívta a figyelmet a tó vízkészletének folyamatos csökkenésére, rámutatva egyúttal az esetleges jövőbeli vízpótlás kérdésére is. Ennek megválaszolásához elengedhetetlen a tó vízmérlegének pontos ismerete, amelyet jelenleg azonban több bizonytalanság terheli. Egyrészt a tó vízgyűjtő-területének egy részéről méretlen a lefolyás, és hasonló mondható el a felszín alatti hozzáfolyásról és elszívárgásról, amelyet a különböző vízmérleg-számításokban el is hanyagolnak (Soja és társai 2013, Fertő Konzorcium 2019).

Másrésztől számottevő bizonytalanságot okoz a párolgásnak a meghatározása, ami a vízmérleg veszteségének szinte teljes egészéért felelős. Ezt jelenleg a hazai gyakorlat egy egyszerű és pontatlan eljárással, a Meyer-féle összefüggés alkalmazásával határozza meg hazai nagy tavaink esetén (KDTVIZIG 2023, 2024). Míg előbbieket meghatározásához mérések szükségesek, addig a párolgásnál különböző párolgászámítási eljárások állnak rendelkezésre, ezáltal lehetőséget adva annak fizikailag megalapozottabb módon történő számítására, ha rutin meteorológiai és vízrajzi adatok rendelkezésre állnak a tó környezetében.

A Fertő tó párolgása két részből tevődik össze, egyrészt nyílt vízfelületének párolgásából, másrészt nádasállományának párolgotatásából, amelyet a meteorológiai meghajtok mellett a vegetációs folyamatok is alakítanak, így számítása jóval összetettebb és több bizonytalanságot tartalmaz (Kovács és Szilágyi 2009a, 2009b). Ennek ellenére mégis kevesebb figyelmet fordítanak rá, s ezáltal az ilyen irányú mérések is csak korlátozottan állnak rendelkezésre. A 2010-es évek elején történt pár szezonális mérési kampány, amelyek során a nádas evapotranszpirációját közvetlenül mérték (Kiss és Józsa 2014, Kiss és Torma 2014). Erre vonatkozóan a Kis-Balatonnál történtek még mérések, ahol Anda és társai (2014, 2017a, 2017b) többéves mérési sorozat keretén belül vizsgálták a nádas általi párolgotatás folyamatát, illetve annak számíthatóságát. Eredményeikre a Fertő tó esetében is lehet támaszkodni, ahogy ezt később bemutatjuk.

Kutatásunk célja a Fertő tó párolgását terhelő bizonytalanságok feltárása és csökkentése, különböző párolgászámítási módszerek összehasonlítása révén. Vizsgálataink során a teljes párolgás és párolgotatás számítására jelenleg alkalmazott empirikus Meyer-képletet egy összetettebb, fizikai alapokon nyugvó energiamérleg elvű eljárással hasonlítjuk össze, ahol a nyíltvíz és nádas párolgotatását több módszerrel is meghatározzuk. Ezek közül előbbire három számítási eljárást néztünk meg, míg utóbbinál Anda és társai (2014) által alkalmazott módszertant alkalmazuk. A párolgást terhelő bizonytalanságok csökkentésével lehetővé válna a tó vízmérlegének pontosabb becslése. Ez lehetőséget adna pontosabb hosszútávú hidrológiai előrejelzésekre, amely lehetővé tenné a tó esetleges vízpótlásának mennyiségi meghatározását, illetve vízjátékának pontosabb jövőbeli leírását.

ANYAG ÉS MÓDSZERTAN

A Fertő tó egy sekély sztyepptó, amely Magyarország és Ausztria határán helyezkedik el. Átlagos mélysége 1,2 m, míg területe 320 km²-re tehető, melynek körülbelül felét (180 km²-t) borítja nádas (Soja és társai 2013). Teljes területének megközelítőleg 3/4-ed része osztrák, 1/4-ed része pedig magyar részen helyezkedik el. Ez utóbbinak hozzávetőleg 80%-át fedi nádas, míg előbbi esetében a nyílt vízfelület, ami jobban dominál. A tó vízgyűjtőterülete 1120 km², főbb befolyói osztrák részről a Wulka-patak, magyar oldalról pedig a Rákos-patak. A tóból történő lefolyás szabályozott módon, a Fertőszéli zsilipen keresztül történik, míg területén 12 helyen van kihelyezve csapadékmérő állomás, melyek adatait felhasználva nagy pontossággal számítható a tóra hulló csapadékösszeg. Emellett, a térségen számos helyen történnek meteorológiai mérések is.

A párolgászámítási vizsgálatokhoz a vízrajzi adatokat – tóhoz való hozzáfolyás (Q_{be}), leeresztés (Q_{ki}), csapadék (CS), tó vízszintváltozása (ΔH), vízhőmérséklet (T_w) – az Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság szolgáltatta, míg a meteorológiai adatok – szélesség (U), léghőmérséklet (T_a), relatív nedvességtartalom (RH), bejövő rövidhullámú sugárzás (SW_{in}) – a HungaroMet fertőrákosi mérőállomásról származnak. Minkét esetben napi értékek álltak rendelkezésre, így a párolgások is ennek megfelelően napi léptéken lettek meghatározva, amelyekből aztán később a havi és éves összegeket számítottuk. A meteorológiai

adatok a 2004 - 2022 közötti időszakra voltak elérhetőek, míg a vízhőmérsékletek a 2012 - 2022 intervallumra, így ennek megfelelően a párolgásokat is ez utóbbi időszakra tudtuk számítani. Két évre vonatkozóan, 2013-ra és 2017-re, örvény-kovariancia (EC) mérések eredményei – szenzibilis (HT_s) és látens hőáramok (L_vE) – is rendelkezésünkre álltak a nyári – kora őszi időszakokra. 2013-ban mind a nyílt vízfelületen, mind pedig a nádas felett történtek EC mérések, míg 2017-ben csak utóbbinál. Emellett, ezekben az időszakokban nagy időbeli felbontással – órás lépték alatt – vízhőmérséklet mérések is történtek. Ezeket felhasználva, a teljes tó párolgást – nyílt vízfelület és nádas együttes párolgása – három eltérő elven alapuló eljárással határoztuk meg: 1) vízmérlegből való számítással; 2) empirikus úton, Meyer-képlettel; 3) energiamérleg alapján.

Párolgás vízmérlegből való számítása

A vízügyi gyakorlatban egyik leginkább elterjedt módszer az állóvizek párolgásának meghatározására azok vízmérlegéből való számítása. Ilyen esetekben a párolgást a maradéktaggal tesszük egyenlővé, tehát a vízkészletet csökkentő és növelő tagok összegzése után, ami a mérleg-egyenlet zárásához még szükséges, azt mind a párolgásra terheljük. A számítás jellegéből adódóan, ez már magában foglalja a nyíltvíznek és a nádasnak is a párolgását, tehát rögtön a teljes tó párolgást adja eredményül. A Fertő tó vízmérleg egyenleténél egy olyan további egyszerűsítéssel élünk – követve a jelenlegi operatív eljárást –, hogy a felszín alatti hozzáfolyás, illetve elszívárgás hatását elhanyagoljuk (Soja és társai 2013). Ennek fő oka, hogy mérések hiányában, ennek hatása nem állapítható meg kellő pontossággal. Ezek alapján, a Fertő tó esetében használt vízmérleg egyenlet az alábbiakra egyszerűsödik:

$$CS - P + Q_{be} - Q_{ki} - \Delta H = M \quad (1)$$

ahol, P (mm) a teljes tó párolgást, M (mm) pedig a maradéktagot jelöli. Az egyenletben mindegyik vízkészlet-mennyiség tömlemléterben van kifejezve. A tagok közül a csapadék és leeresztés nagy pontossággal mérhető, ellenben a hozzáfolyás számításánál egy jelentős bizonytalanság van. Míg a tó nagyobb befolyóinak (Wulka- és Rákospatak) hozamai mérve vannak, addig a kisebb vízfolyások sok esetben méretlenek, a vízgyűjtő egy részéről érkező hozzáfolyással egyetemben, így azok értékét közelítéssel szokták felvenni. Ennek jelenleg alkalmazott módja, hogy a Rákos-patak hozamának kétszeresét veszik figyelembe a teljes magyarországi felszíni hozzáfolyás összegének meghatározására (Török és Torma 2024a). A tó vízkészletének megváltozása, a jelenlegi vízügyi gyakorlatban, a hónap első és utolsó napján mért vízállások különbségéből kerül kiszámításra, míg a maradéktag értékét zérusnak szokták feltételezni, hogy az egyenletet átrendezve kifejezhetővé váljon a párolgás.

Párolgás Meyer-képlettel való meghatározása

A Meyer-képlet egy empirikus Dalton-típusú összefüggés, amely nyílt vízfelületek havi léptéken való párolgásának számítását teszi lehetővé (Meyer 1942). Alkalmazásához elegendő rutin meteorológiai adatok ismerete, így a vízügyi gyakorlatban igen elterjedt módszernek számít a tavak, köztük a Fertő tó párolgásának a meghatározására. Miután az összefüggés nyílt vízfelületek párolgását adja

meg, az ÉDUVIZIG egy havonta változó nádkonstans bevezetésével (*I. táblázat*), amellyel a nyíltvízi eredményeket szorozzák fel, becsüli a nádas általi párologtatást. Ezáltal a teljes tóparólgás a nyíltvíz párologtatásának és nádas általi párologtatásnak a területtel súlyozott átlagából számítható. A vízügyi gyakorlatban a víz-nádas területére a 0,49-0,51 arányt alkalmazzák, így a továbbiakban mi is ezt vettük alapul. A párologtatás számításánál az ÉDUVIZIG a Meyer-képlet napi léptékre átszámított változatát használja, mely nyíltvíz és nádas esetében az alábbi módon alakul:

1. táblázat. Az ÉDUVIZIG által használt havi nádkonstans értékek a Fertő tóra (Eitzinger és társai 2009)
Table 1. Monthly reed coefficients for Lake Fertő used by ÉDUVIZIG

Hónap	XI - III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
K_n	1,0	1,02	1,11	1,20	1,26	1,21	1,13	1,11

Párologtatás energiamérleg alapú eljárásokkal való számítása

Az energiamérleg alapú eljárások fizikai alapon számítják a párologtatást, a hatérfelületeken zajló energiacsere folyamatok révén. Ebből kifolyólag pontosabbnak számítanak az empirikus módszerekhez képest, ellenben alkalmazásuk gyakran nehezebb a szükséges adatok mennyisége miatt, melyek nem minden esetben állnak rendelkezésre. Vizsgálataink során négy energiamérleg alapú eljárást alkalmaztunk a Fertő tó párologtatásának meghatározására, melyből három a nyíltvíz, egy pedig a nádas párologtatásának a számítására vonatkozott. Ezek közül az egyik leggyakrabban használt eljárás a Penman-Monteith egyenlet, mely nyíltvíz párologtatásának számítása esetén az alábbi formában írható fel (Jensen és társai 2005, Lükő és társai 2022):

$$P_{PM} = \frac{\Delta \cdot (R_n + \Delta S + G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \left(\frac{E_0 - e}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_{TW}} \quad (4)$$

ahol, P_{PM} (mm nap⁻¹) a nyíltvíz napi párologtatása a Penman-Monteith egyenlet alapján, Δ (kPa °C⁻¹) a telítési vízgőznyomás függvény adott hőmérsékletre tartozó meredeksége, R_n (J m⁻² nap⁻¹) a nettó sugárzás, ΔS (J m⁻² nap⁻¹) a víztestben tárolt energia, G (J m⁻² nap⁻¹) a mederhőáram, ρ_a (kg m⁻³) a levegő sűrűsége, c_p (J kg⁻¹ °C⁻¹) a levegő fajhője, r_a (s m⁻¹) az aerodinamikai ellenállás, γ (kPa °C⁻¹) a pszichrometriai konstans, λ (J kg⁻¹) a látens párologtatóhő, ρ_{TW} (kg m⁻³) pedig a víz sűrűsége.

A következő, szintén gyakran használt párologtatási számítás módszer nyílt vízfelületekre a Priestley-Taylor egyenlet, mely a Penman-Monteith-hoz képest annyiban tér el, hogy a légkört leíró változók egy részét, egy konstans együtthatóval közelíti. Ennek megfelelően, az egyenlet a következőképpen írható fel (Metzger és társai 2018):

$$P_{PT} = \alpha \cdot \frac{\Delta \cdot (R_n + \Delta S + G)}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_{TW}} \quad (5)$$

ahol P_{PT} (mm nap⁻¹) a nyíltvíz napi párologtatása a Priestley-Taylor egyenlet alapján, α (-) pedig a Priestley-Taylor együttható, mely értékére 1,26 lett felvéve szakirodalmi ajánlások alapján (Nikolaou és társai 2023).

A harmadik energiamérleg alapú módszer, melyet a nyíltvíz párologtatásának számítására alkalmaztunk az egydimenziós General Ocean Turbulence Model (GOTM) volt,

$$P_{viz} = (E_0 - e) \cdot (0,294 + 0,056 \cdot U) \cdot n \quad (2)$$

$$P_{nád} = (E_0 - e) \cdot (0,294 + 0,056 \cdot U) \cdot n \cdot K_n \quad (3)$$

ahol P_{viz} és $P_{nád}$ (mm nap⁻¹) a nyíltvíz és nádas párologtatás, E_0 (hPa) a telítési vízgőznyomást, e (hPa) az aktuális vízgőznyomást, U (m s⁻¹) a szélesebbséget, n (-) a napok számát a hónapban, K_n (-) pedig a nádkonstans jelöli. Megjegyezzük, hogy az eredeti Meyer-képletben a telítési vízgőznyomás a vízhőmérséklet, míg az aktuális vízgőznyomás a léghőmérséklet függvénye, így számításukkor ezeket használtuk.

mely egy fizikai alapon működő hőmérsékleti és keveredési modell. A GOTM k-ε turbulencia modellt használ a vizsgált vízszlop függőleg menti hőmérsékletének és keveredési mutatóinak a meghatározására, továbbá számítja a levegő-víz határfelületen zajló hőcsere folyamatokat is, beleértve a látens hőáramot, vagyis a tóparólgást (Istvánovics és társai 2022). A modell rutin meteorológiai adatokat használ, amiket a HungaroMet fertőrákosi mérőállomásának idősorai szolgáltatottak, míg a modellparaméterek tekintetében a Balatonnál használt értékek lettek átvéve (Török és Torma 2024b), melyek a Fertő tó esetében is jól használhatónak bizonyultak. A modell a hosszú idejű mért vízhőmérséklet idősorok mellett a 2017-es közvetlen EC-mérések szolgáltatotta látens hőáramokra lett igazolva, míg megbízhatóságát a Nash-Sutcliffe hatékonysági mutató (NS) és az átlagos négyzetes hiba gyöke (RMSE) alapján értékeltük.

A nádas általi párologtatás, mely jelen esetben magába foglalja mind a nádasnak, mind pedig az alatta lévő vízfelületnek a párologtatását, egy referenciapárologtatás és egy nádkonstans szorzataként került kiszámításra (Anda és társai 2014):

$$ET_0 \cdot K_c = ET_m \quad (6)$$

ahol, ET_0 a referenciapárologtatás (mm nap⁻¹), K_c (-) a nádkonstans, ET_m (mm nap⁻¹) pedig a nádas evapotranszpirációját jelöli. A referenciapárologtatás meghatározása a FAO 56 Penman-Monteith egyenlet alapján történt, mely az alábbi formában írható fel (Foken 2006, Török és Torma 2024a):

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot (R_n + \Delta S + G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273,15} \right) \cdot U \cdot (E_0 - e)}{\Delta + \gamma \cdot \Delta \cdot (1 + 0,34 \cdot U)} \quad (7)$$

ahol, T_a (K) a napi átlagos léghőmérséklet jelöli.

A K_c nádkonstans a (6) egyenletet átrendezve kifejezhető a nádas evapotranszpirációjának és a referenciapárologtatásnak a hányadosaként. Előbbi esetben rendelkezésükre álltak a 2013-as örvény-kovariancia mérések a május-június hónapokra (Kiss és Torma 2014), mely során közvetlenül a nádas felett történtek az észlelések, így tehát az ET_m a mért látens hőáramokból meghatározható vált, míg az ET_0 a FAO 56-os egyenletből volt számítható. Ilyen módon az említett két hónapra napi felbontással meg tudtuk határozni nádkonstansokat, melyeket aztán összevetettünk Anda és

társainak (2014) eredményeivel, melyek többéves mérési sorozat eredményeként álltak elő a Kis-Balatonra. Ahogy később részletesen ismertetjük (4. ábra), azt tapasztaltuk,

hogyan az általunk és általuk számított értékek jól egyeznek, így a továbbiakban az általuk levezetett havi értékeket használtuk a teljes időszakra (2. táblázat).

2. táblázat. Anda Angéla és társai (2014) által számított havi nádkonstans értékek normál időjárási viszonyok esetén
Table 2. Monthly reed coefficients calculated by Anda Angéla et al. (2014) in normal weather conditions

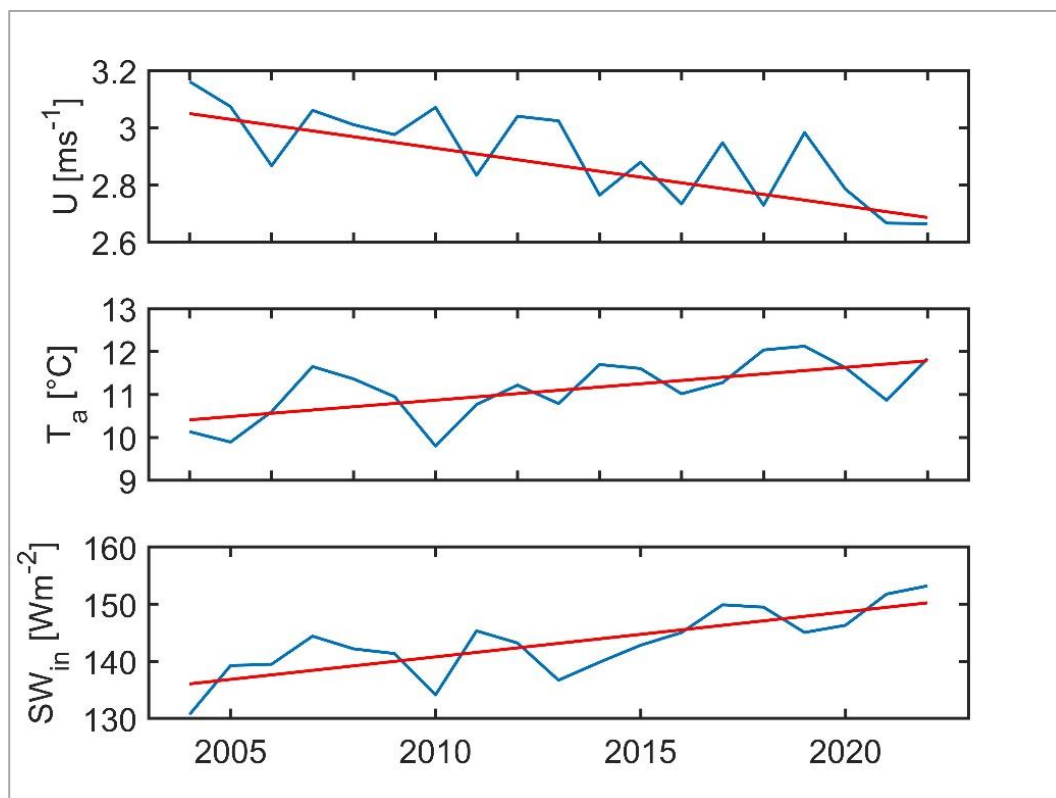
Hónap	IX - III	IV	V	VI	VII	VIII
K_c	0,77	1,03	1,23	1,40	1,51	0,99

EREDMÉNYEK ÉS DISZKUZZIÓ

Fertő tó éghajlatának megváltozása

Az elmúlt közel két évtizedet nézve, jelentős változás figyelhető meg a párolgást befolyásoló meteorológiai változóknál. Az éghajlatváltozás következtében a szélsőségek (U) esetében csökkenő tendencia látható ($-0,19 \text{ m s}^{-1}/10 \text{ év}$), míg a léghőmérsékletnél ($0,72 \text{ °C}/10 \text{ év}$) és beérkező rövidhullámú sugárzásnál ($7,47 \text{ W m}^{-2}/10 \text{ év}$)

számottevő növekedés érzékelhető (1. ábra). Ezek ellentétesen hatnak a párolgásra, mivel míg az átlagszél csökkenő trendje a tó párolgás mértékének csökkenését kellene eredményezze, addig a léghőmérséklet és sugárzás növekedése éppen, hogy annak emelkedését. Ezáltal, csak a meteorológiai meghajtók alapján nem lehet egyértelmű következtetéseket levonni a Fertő tó párolgásának alakulásáról, illetve annak időben történő megváltozásáról.

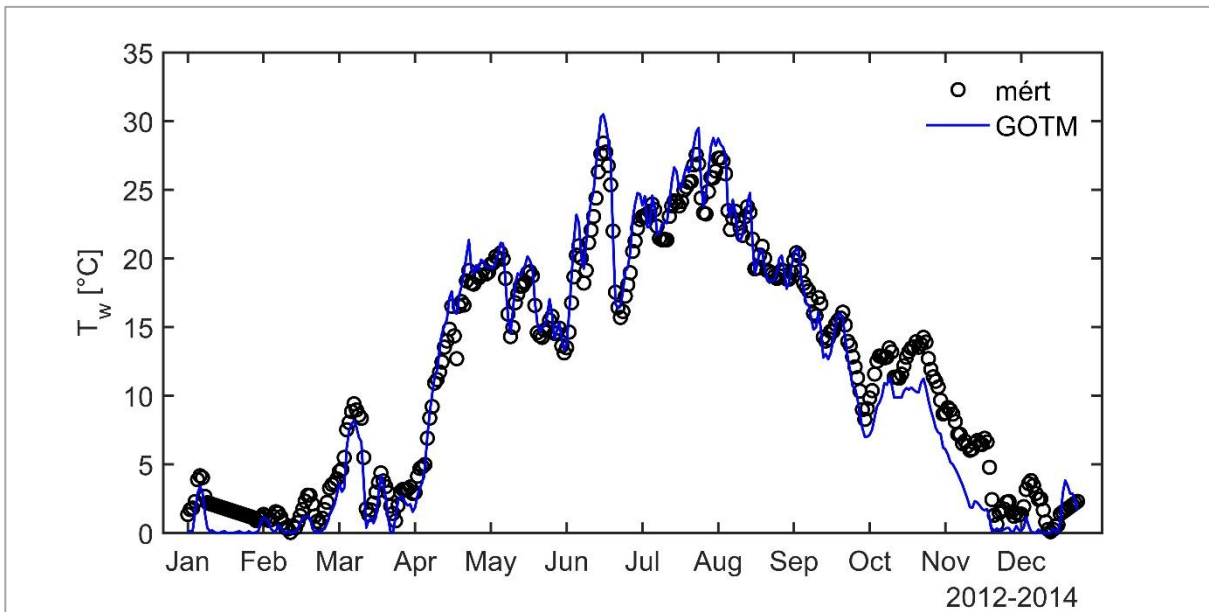


1. ábra. Szél (U), léghőmérséklet (T_a) és beérkező rövidhullámú sugárzás (SW_{in}) éves átlagának megváltozása 2004-2022 között
Figure 1. Changes in yearly means of wind (U), air temperature (T_a), and incoming shortwave radiation (SW_{in}) between 2004-2022

Fertő tó párolgása

A nyíltvíz párolgásának számítására használt egydimenziós GOTM modell a mért vízhőmérsékletekre lett igazolva, melyek 2012-2022 között álltak rendelkezésre. Az eredményeket összevetve a mérésekkel, az NS és RMSE mutatókra $0,93 (-)$ és $2,02 \text{ °C}$ adódott. Szezonálisan nézve, a modell a nyári hónapokban kis mértékben felülbecsüli a mért vízhőmérsékleteket, míg az őszi végi - téli időszakban – mikor jelentősen lehűl az idő – alul.

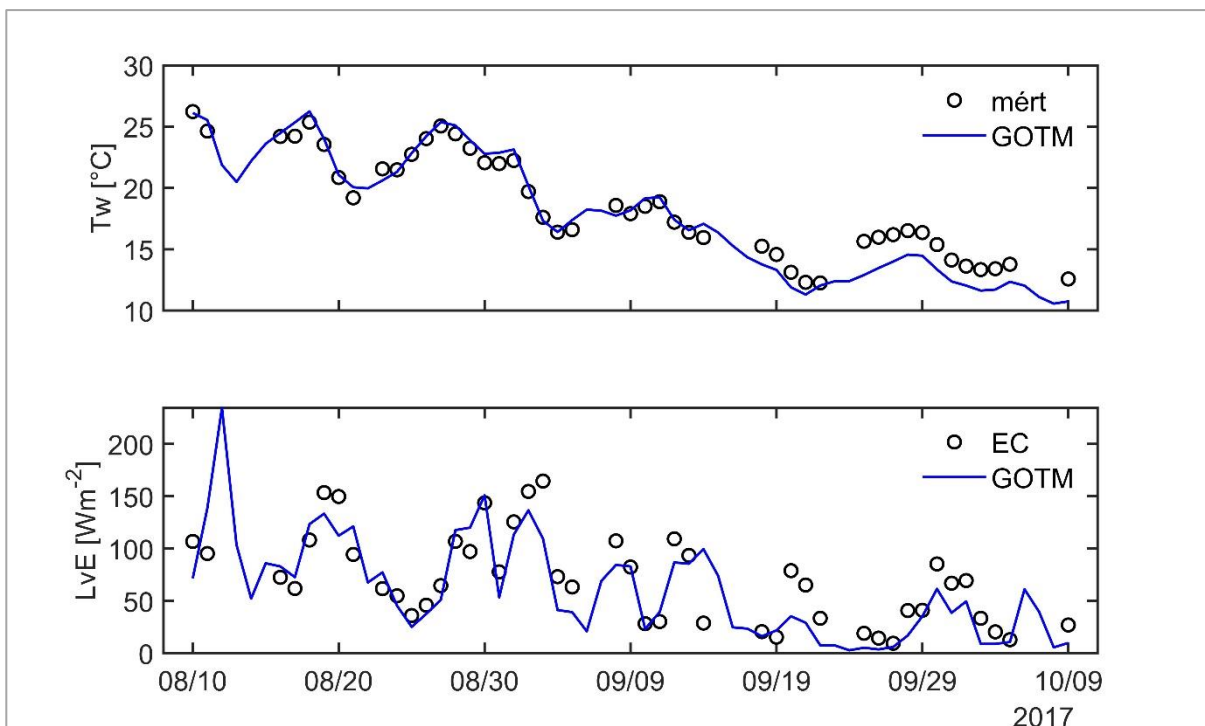
Mindazonáltal összességében jól szimulálja azok időbeli alakulását (2. ábra). Az eltérések egyrésztől adódhatnak abból, hogy a modellben konstans fényelnyelési együtthatót alkalmazunk, miközben annak értéke akár napon belül is nagyban meg tud változni, másrészt pedig abból, hogy míg a GOTM órási időbeli felbontással futott, és úgy kerültek meghatározásra a napi átlagos vízhőmérsékletek, addig a tónál történt napi észlelések nem feltétlenül reprezentálják a tényleges napon belüli átlagos értékeket.



2. ábra. Fertő tó mért és modellezett napi vízhőmérséklet-idősorai a 2013-as évre
 Figure 2. Measured and modeled daily water temperature time series of Lake Fertő for the year 2013

A modelleredményeket továbbá összehasonlítottuk a nyíltvízen történt örvény-kovariancia mérésekkel is (3. ábra), ahol a látens hőáramok mellett nagy időbeli felbontással – órás lépték alatt – a vízhőmérsékletek is rögzítésre kerültek. Ezt az összehasonlítást kizárólag a 2017-es évre tudtuk elvégezni, mivel 2013-ban a nyíltvízi mérések lábnyoma döntő többségben a nádasra esett. A vízhőmérsékletek tekintetében hasonló trend adódott, mint a napi méréseknél, tehát a modell nyáron kis mértékben felülbecsülte a mért értékeket, míg az idő lehűlésével elkezdte

őket alulbecsülni, ellenben ennek mértéke csökkent, az NS és RMSE mutatókra 0,92 (-) és 1,19 °C adódott. Megállapítható tehát, hogy a mért és modellezett értékek közötti eltérés egy része valóban magyarázható az időbeli felbontások különbözőségével, miután a napi léptékről áttértünk az órára, az RMSE ~0,83 °C-kal javult. A látens hőáramok esetében szintén jó egyezést adott a modell a mérésekkel – az NS-re 0,67 (-), míg az RMSE-re 24,26 W m⁻² adódott –, így az alkalmazhatónak bizonyult a tóparólgások számítására.

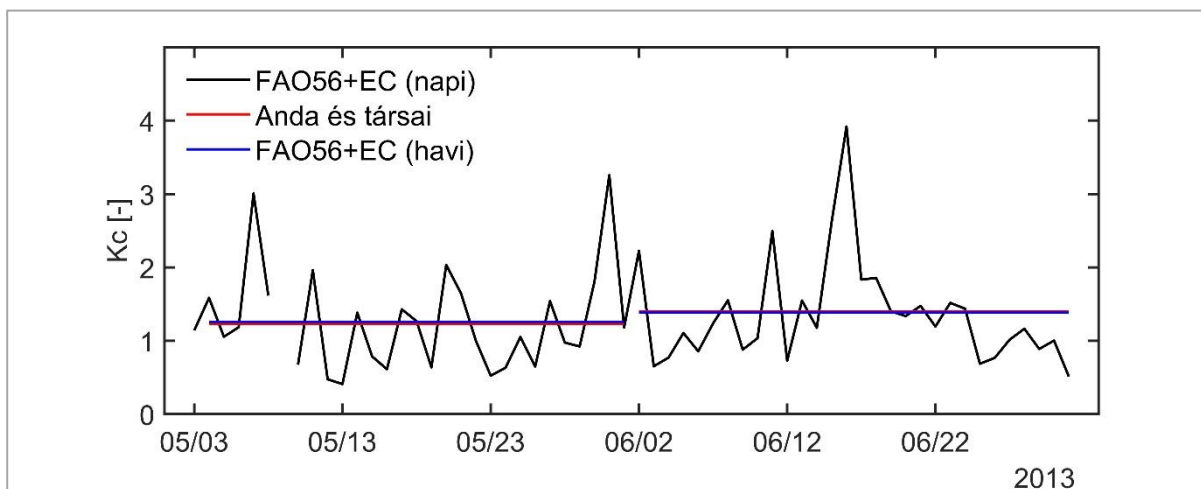


3. ábra. 2017-es örvény-kovariancia mérés során mért vízhőmérsékletek (felső ábra) és látens hőáramok (alsó ábra) alakulása a modellezett értékekhez képest

Figure 3. Measured water temperatures (top) and latent heat fluxes (bottom) during the eddy covariance measurement campaign in 2017 compared to the modeled values

A 2013. május és június hónapokban végzett örvény-kovariancia mérések alapján számított K_c nádkonstans értékeket a 4. ábra mutatja be. Az ábrán a napi értékeken túl, a számított havi átlagok is szerepelnek, továbbá összehasonlítás céljából *Anda és társai (2014)* által levezetett havi

nádkonstansok is feltüntetésre kerültek. Az említett két hónapban az általunk számított átlagok 1,26-ra (-) és 1,38-re (-) adódtak, míg náluk 1,23-ra (-) és 1,40-re (-), tehát nem volt lényegi eltérés közöttük. Ebből kifolyólag vettük át a többi hónapra is az általuk számított K_c értékeket (2. táblázat).

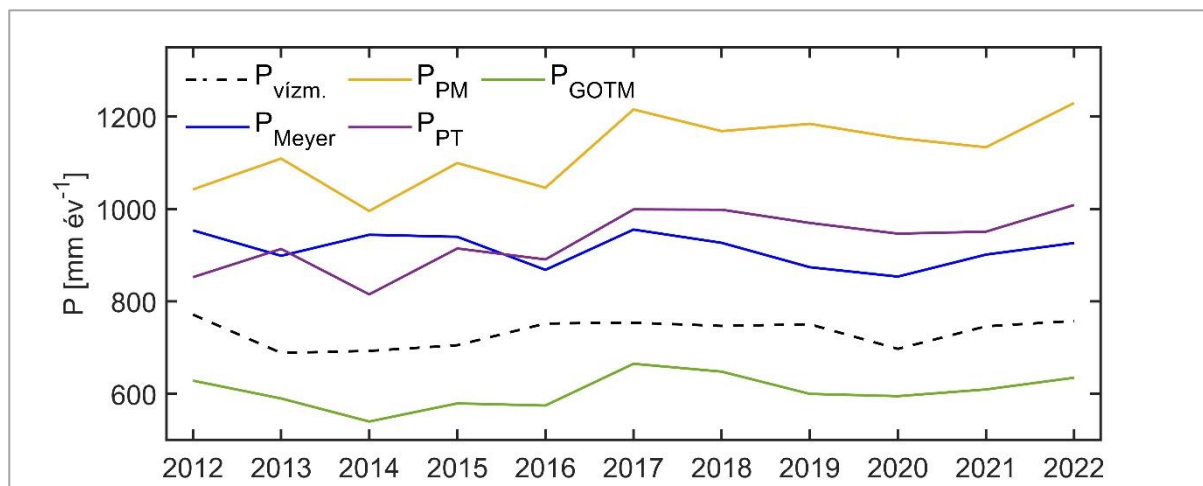


4. ábra. 2013-as örvény-kovariancia mérések alapján meghatározott napi K_c nádkonstans értékek, valamint az ezekből számított és *Anda és társai (2014)* által levezetett havi átlagok

Figure 4. Daily reed coefficients based on eddy covariance measurements in 2013 and monthly averages calculated from them and derived by *Anda et al. (2014)*

Annak érdekében, hogy energiamérleg alapon is számítani lehessen a teljes tó párolgást, a nyíltvíz párolgását és a nádas párolgatótatását leíró módszerek területtel súlyozott átlagát kellett figyelembe vennünk, mint ahogy a Meyer-képlet esetében. Ennek első lépéseként összehasonlítottuk a nyíltvíz párolgásának meghatározására használt eljárásokat az éves párolgásösszegek alapján (5. ábra), hogy a három energiamérleg alapú módszerből – Penman-Monteith, Priestley-Taylor, GOTM – ki lehessen választani azt, amelyikkel majd a teljes tó párolgást számítjuk. Az összehasonlításnál a vízmérleg alapú módszert is feltüntettük, mint viszonyítási alapot, ellenben megjegyzendő, hogy az már magába

foglalja mind a nyíltvíznek, mind pedig a nádasnak a párolgatótatását. Az eredmények alapján látható, hogy minden módszer – a GOTM kivételével – jelentősen túlbecsüli a vízmérlegből kapott összegeket, esetenként akár több száz milliméterrel, miközben azok még nem is tartalmazzák a nádas általi párolgatótatást, ami éves szinten meghaladja a nyíltvízi párolgást. A GOTM-hoz viszonyítva a Priestley-Taylor, a Meyer-hez hasonlóan, körülbelül másfélszer, míg a Penman-Monteith kétszer nagyobbra becsüli az éves párolgásösszegeket. Ebből kifolyólag, a teljes tó párolgás energiamérleg alapon való meghatározásánál, a nyíltvízi oldal az egydimenziós GOTM eredményeiből lett számítva.



5. ábra. Fertő tó nyílt vízfelületének éves párolgása a Penman-Monteith (P_{PM}), Priestley-Taylor (P_{PT}), GOTM (P_{GOTM}) és Meyer féle (P_{Meyer}) számítási módszerek esetében, illetve az éves tó párolgás vízmérlegmérleg alapon számítva ($P_{vizm.}$)

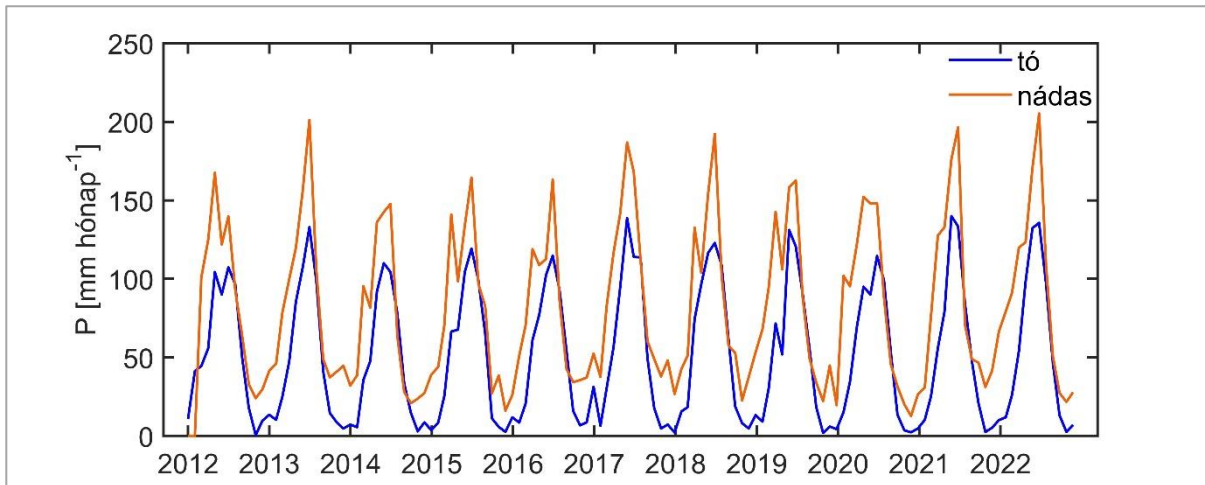
Figure 5. Annual open water evaporation of Lake Fertő in the case of the Penman-Monteith (P_{PM}), Priestley-Taylor (P_{PT}), GOTM (P_{GOTM}), and Meyer (P_{Meyer}) calculation methods, as well as the annual lake evaporation based on lake's water balance ($P_{vizm.}$)

Összehasonlítva az energiamérleg elven kapott nyíltvízi párolgást a nádas általi párolgatótatással (6. ábra) az látható, hogy a nádas majdnem egész évben többet

párolgatótat, mint a nyílt vízfelület. Ez alól egyedül a téli időszak képez kivételt, amikor ez kismértékben megfordul, ellenben kiemelendő, hogy ilyenkor a GOTM

alulbecsüli a mért vízhőmérsékleteket, tehát a modell több hőt ad le, mint amennyire valójában szükség lenne. Emellett fontos megjegyezni, hogy a vegetáción kívüli időszakokra nem ismerjük, hogy a nádas alatt milyen mértékű a vízfelület párolgása, míg a nádas fiziológiai folyamatai

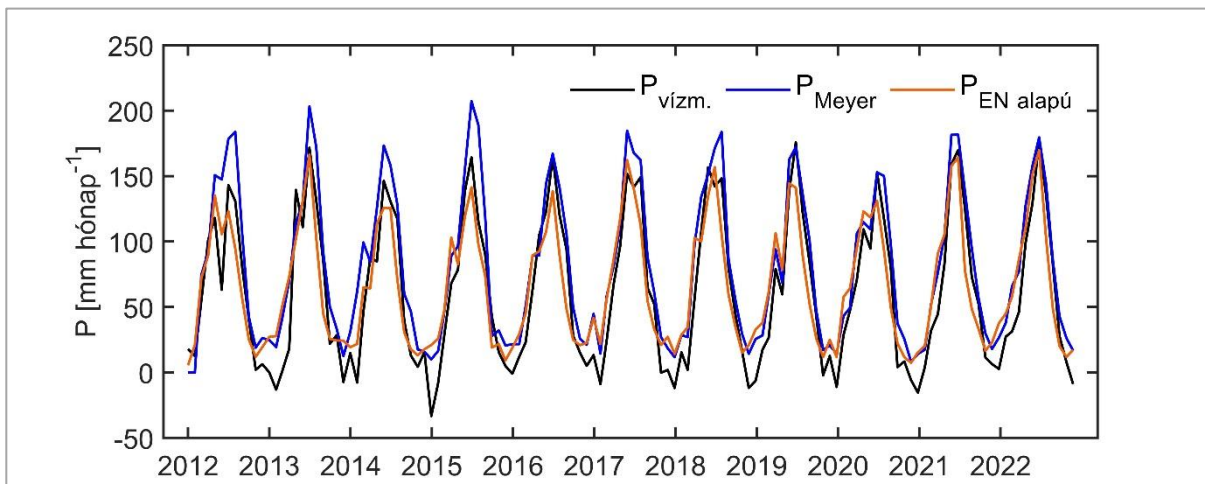
leállnak és nem párologtat. Ennek hatására ilyenkor a GOTM vélhetően valamelyest felülbecsüli a párolgást, így ezekben az időszakokban bizonytalanak mondható a tónádas közötti párolgási viszony, viszont a teljes évet nézve, a nádas általi párolgotatás dominál.



6. ábra. Fertő tó nyílt vízfelületének és nádasállományának havi párolgása energiamérleg alapján számítva
Figure 6. Monthly evaporation of the open water surface and reed zones of Lake Fertő based on energy balance calculations

A teljes tó párolgást nézve, a vízmérleg és energiamérleg (GOTM és FAO56) alapján számított eredmények közel azonos nagyságúra adódtak, míg a Meyer-képlet számottevően nagyobbra becsülte azokat. Az egyes módszerek közötti eltérés havi szinten esetenként a 30-40 mm-t is elérheti – elsősorban a Meyer-képletnél – míg éves léptéken a több 100 mm-t is meghaladhatja. Trendek tekintetében mind a vízmérleg, mind pedig az energiamérleg alapú módszer növekvő tendenciát mutat a tó párolgására, 22 és 81

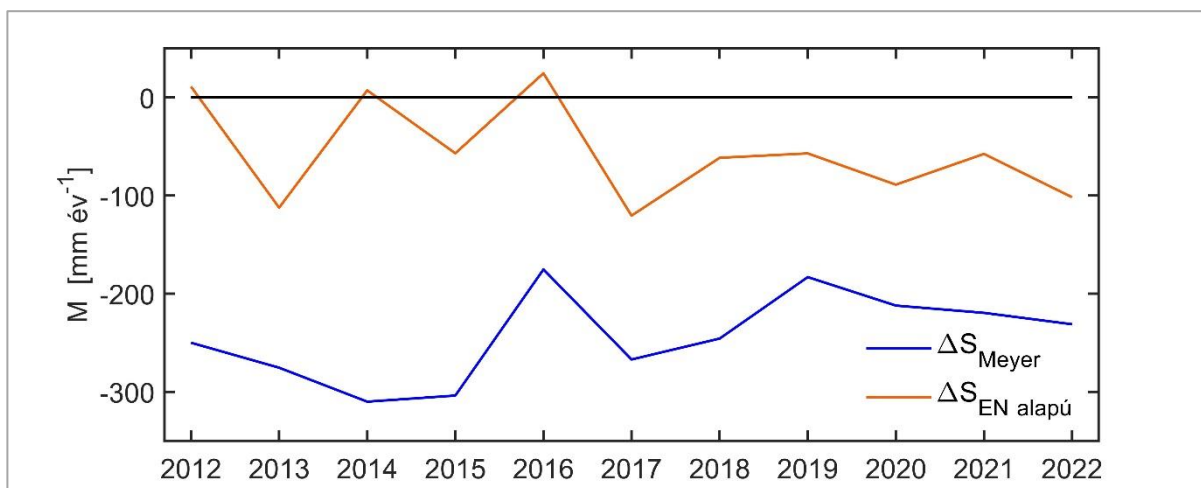
mm/10 évet. Ezzel szemben a Meyer-képlet esetében csökkenő trend látható, -43 mm/10 év, mely főként arra vezethető vissza, hogy a módszer nem képes figyelembe venni a sugárzás megváltozását, miközben döntően az biztosítja a párolgásra fordítható energiát (Lükő és társai 2022). Összességében tehát megállapítható, hogy lényegi eltérés van az egyes párolgászámítási módszerek között, viszont azok közül is kitűnik a Meyer-módszer, mely mind nagyságban, mind pedig trendben eltér a másik kettőtől.



7. ábra. Fertő tó havi párolgásértékei a vízmérleg, Meyer, és energiamérleg módszerekkel számítva
Figure 7. Monthly evaporation of Lake Fertő calculated by the water balance, Meyer, and energy balance methods

A párolgás ismeretében a vízmérleg egyenletből számíthatóvá válik a maradéktag (1. egyenlet), melyet ilyen módon a Meyer- és energiamérleg alapú eljárásokkal meg tudunk határozni. Éves szinten nézve alapvetően mindkét esetben hiányt lehet látni (8. ábra), mely a Meyer-módszer esetében évi átlagos -243 mm-re, míg az energiamérlegnél -56 mm-re adódott. Ezt azt jelenti, hogy éves léptéken veszteség van a rendszerben (elfolyás vagy elszivárgás), ami egyrésztől származhat a

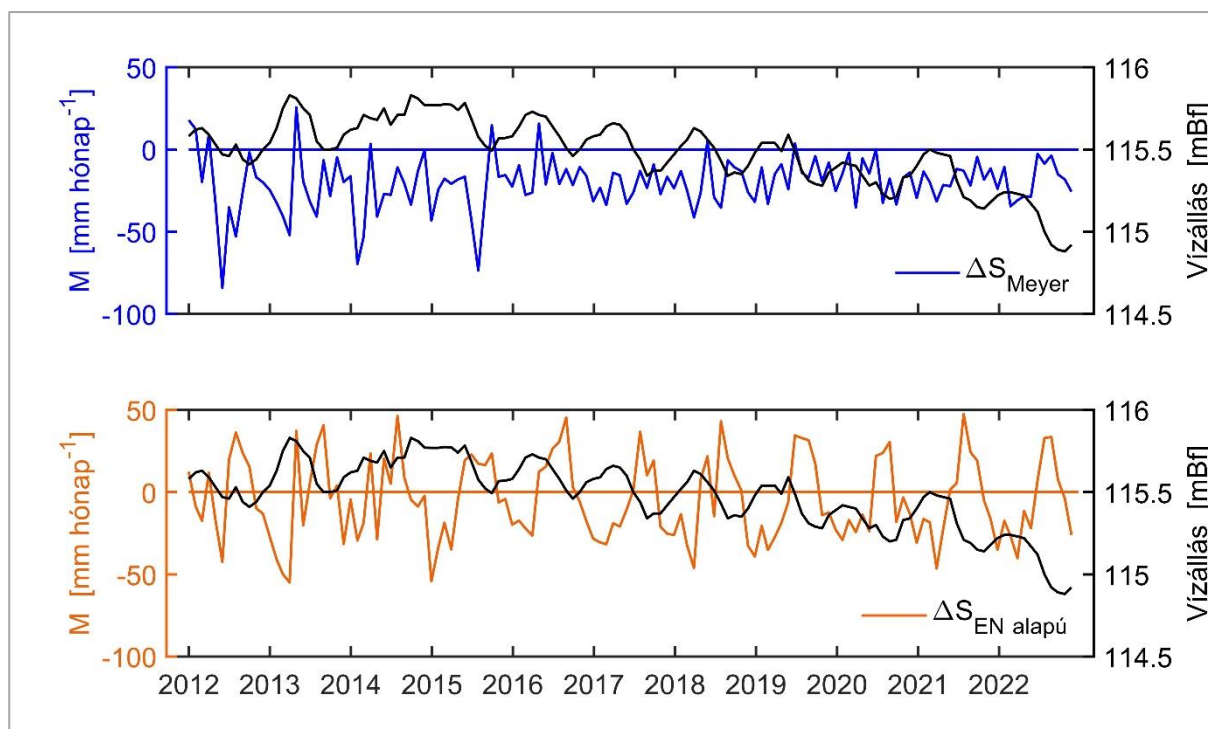
párolgás túlbecsléséből, másrészt pedig a felszín alatti vizek hatásának elhanyagolásából, illetve a méretlen vízgyűjtőrézre vett közelítésből (Török és Torma 2024a). Az, hogy a Meyer-módszernél jelentősen nagyobbra adódtak a hiányok részben magyarázható azzal, hogy a vízmérleg- és energiamérleg alapú eljárásokhoz képest számottevően nagyobbra becsüli a párolgást (7. ábra), ami a tó vízkészletének szinte teljes veszteségéért a felelős.



8. ábra. Fertő tó vízmérleg egyenletéből számított éves maradvéktag értékek a Meyer- és energiamérleg alapú módszerek alapján
Figure 8. Annual residuals calculated from the water balance equation of Lake Fertő based on Meyer and energy balance methods

Havi szinten nézve a maradvéktagokat, a Meyer-képlet esetében – pár kivételtől eltekintve – mindig negatív érték jöttek ki, átlagosan -20 mm/hónap, míg azok energiamérleg elven való számításakor a nyári, illetve őszi időszakokban főként pozitív, míg máskor negatív eredmények adódtak, tehát az év folyamán egyaránt fordult elő többlet és hiány is a vízmérlegben. Átlagot tekintve összességében itt is negatív maradvéktag jelentkezik, ellenben annak értéke jóval kisebb, -5 mm/hónap. A zárási hiba időszakos előjelváltásának a feltételezhető oka a felszín alatti vizek hatása, amelyek hozzászivárgás esetén

növelik, elszivárgáskor viszont csökkentik a tó vízkészletét. Ezt támasztja alá, hogy azokban az esetekben mikor pozitív a maradvéktag, a tó vízszintje alacsonyabb, tehát ilyenkor a talajvíz szivároghat a tó irányába, és ez eredményezi a többletet, míg amikor negatív, akkor magasabb vízszintek vannak, így a tóból elszivárgás indulhat meg, ezzel okozva csökkenést a tó vízkészletében (9. ábra). Megjegyzendő, hogy a vízállás és a maradvéktag között egyedül az energiamérleg alapú eljárásnál mutatható ki kapcsolat, míg a Meyer-módszernél ilyesfajta összefüggés nem figyelhető meg.



9. ábra. Fertő tó vízmérleg egyenletéből számított havi maradvéktag értékek a Meyer- (felső) és energiamérleg (alsó) alapú módszerek alapján, párhuzamosan ábrázolva a tó fertőrákosi vízmércéjének havi vízállás idősorával. Az idősor minden hónap első napjának a vízállása alapján lett ábrázolva

Figure 9. Monthly residuals calculated from the water balance equation of Lake Fertő based on the Meyer (upper) and energy balance (lower) methods, plotted in parallel with the monthly water level time series of the lake's Fertőrákos staff gauge. The time series was plotted based on the water level of the first day of each month

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KONKLÚZIÓK

A Fertő tó vízmérlegét jelentős bizonytalanság terheli, ami elsősorban a párolgásnak, mint fő veszteségtagnak a pontos meghatározásából adódik. A tó párolgása két részből tevődik össze, egyrészt nyílt vízfelületének párolgásából, másrészt nádasállományának párolgotatásából, amelyet a meteorológiai folyamatok mellett a növény fiziológiai folyamatai is alakítják, így számítása jóval bizonytalanabb, mint a nyílt vízfelületé. Kutatásunk során a gyakorlatban alkalmazott Meyer- és vízmérleg alapú párolgásszámítási eljárásokat hasonlítottuk össze több, energiamérleg alapú módszerrel, amelyek fizikai alapokon nyugszanak, hogy feltárjuk az egyes számítási eljárásokat terhelő bizonytalanságokat, továbbá, hogy képesek legyünk a tó párolgás megbízhatóbb meghatározására. Vizsgálataink eredménye alapján, az alábbi következtetésekre jutottunk:

- Az energiamérleg alapú Penman-Monteith és Priestley-Taylor eljárások jelentősen túlbecsülik a nyíltvízi párolgást, így azok alkalmazása a Fertő tó esetében elvetendő. Ezzel szemben az egydimenziós GOTM jó becslést adott a nyíltvízi párolgásra, míg a FAO56-os egyenlet az *Anda és társai (2014)* által levezetett nádkonstansokkal a nádas általi párolgotatást tudta kellő pontossággal visszaadni.

- A párolgásszámítási módszerek összehasonlítása azt láttuk, hogy a vízmérleg és egyes energiamérleg alapú módszerek közel azonos nagyságúra becsülik a párolgást, illetve egyaránt növekvő trendet mutatnak rá. Ezzel szemben a Meyer-féle eljárás számottevően nagyobbra becsüli azt, ugyanakkor egy csökkenő trendet jelez évtizedes léptéken. Összevetve a vízmérleg egyenletből számított maradéktagokat azt tapasztaltuk, hogy bár mind a Meyer, mind pedig az energiamérleg alapú módszer összességében hiányt jelez a rendszerben, előbbi jelentősen nagyobbra becsüli azt, körülbelül négyszer akkora. Ezek alapján tehát arra jutottunk, hogy az empirikus Meyer-képlet alkalmazása a Fertő tó párolgásának számítására megkérdőjelezhető, mivel várhatóan nemcsak nagymértékben túlbecsüli tényleges párolgást, hanem annak hosszútávú klimatikus előrejelző képessége is bizonytalan.

- A nyíltvíz párolgásának és a nádas párolgotatásának energiamérleg elven való meghatározásával jóval jobb vízmérleg zárást kaptunk, mint a Meyer-képlet esetében. Továbbá, az energiamérleg alapú eljárások fizikai alapokon nyugszanak, ezért mérések révén lehetőség van azok közvetett igazolására is. Ezekből adódóan, a Fertő tó párolgásának meghatározására energiamérlegen elven alapuló számításokat kell alkalmazni.

- A vegetációs időszakban (május-szeptember) a nádas általi párolgotatás megközelítőleg 1,2-1,5-szöröse a nyíltvízi párolgásnak. Miután ez a tónak hozzávetőleg felét érinti, ennek hatása nem elhanyagolható, ellenben az erre irányuló mérések mégis hiányoznak, vagy csak korlátozott mértékben állnak rendelkezésre.

- Végezetül megjegyezzük, hogy számításainkat csak rövid idejű közvetlen párolgásmérésekre tudtuk igazolni, így a Fertő tó párolgásának pontosabb becsléséhez szükség lenne egy hosszútávú mérési sorozatra – legalább egy év –, mely keretein belül nagy időbeli felbontással kellene mérni a rutin meteorológiai adatokat, az összes sugárzási komponenst, a vízhőmérsékletet, továbbá a nyíltvízi és nádas feletti térségben a szenzibilis és látens

hőáramokat. Ennek elvégzése elengedhetetlen a tó vízkészlet-változásának pontosabb leírásához, illetve az esetleges vízpótlás mennyiségi meghatározásához.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3-I-BME-147 és ÚNKP-23-5-BME-454 kódszámú Új Nemzeti Kiválósági Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A kutatást támogatta továbbá a 138176 számú OTKA projekt, valamint az MTA „Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program” (FFT NPFTA). A második szerzőt az MTA Bolyai János Ösztöndíj (00906/23) támogatta.

IRODALOMJEGYZÉK

Anda, A., Silva, J., Soós, G., Teixeira da Silva, J. A. (2014). Evapotranspiration and crop coefficient of common reed at the surroundings of Lake Balaton, Hungary. *Aquatic Botany*, 116, pp. 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2014.01.008>

Anda, A., Soós, G., Teixeira da Silva, J. A. (2017a). Leaf area index for common reed (*Phragmites australis*) with different water supplies in the Kis-Balaton wetland, Hungary, during two consecutive seasons (2014 and 2015). *Időjárás*, 121 (3), 265-284.

Anda, A., Soós, G., Teixeira da Silva, J. A. (2017b). Practical use of *Phragmites australis* to study evapotranspiration in a wetland zone of Lake Balaton (southwest Hungary). *Theoretical and applied climatology*, 127, 899-909. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1679-4>

Eitzinger, J., Kubu, G., Formayer, H., Haas, P., Gerschdorfer, T., Kromp-Kolb, H. (2009). Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedlersees. In: *Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedlersees, Endbericht, Im Auftrag der Burgenländischen Landesregierung*, 2005. BOKU-Met Report 1 (ISSN 1994-4179; ISSN 1994-4187 (on-line).

Fertő Konzorcium (2019). Vízminőség-védelmi célú vízgazdálkodási kezelési terv készítését megalapozó vizsgálatok a Fertő tavon. Kutatási jelentés, AT-HU 53 Interreg projekt, Budapest.

Foken, T. (2006). *Micrometeorology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

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>

Jensen, M.E., Dotan, A., Sanford, R. (2005). Penman-Monteith Estimates of Reservoir Evaporation. *Impacts of Global Climate Change*, pp. 1-24. [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)548](https://doi.org/10.1061/40792(173)548)

KDTVIZIG (2023). A Velencei-tó 2022. évi vízmérlege. <http://www.kdtvizig.hu>

KDTVIZIG (2024). A Balaton és a tórészek havi vízháztartási jellemzőinek meghatározása. <http://www.kdtvizig.hu>

Kiss M., Józsa J. (2014). A Fertő tó energiaháztartásának meghatározása örvény-kovariancia módszerrel. Hidrológiai Közlöny, 94(4), pp. 38-47.

Kiss M., Torma P. (2014). Sekély tavi energiaáramok fluxus-gradiens eljárás-alapú becslése örvény-kovariancia mérésekből. Hidrológiai Közlöny, 94(4), pp. 48-56.

Kovács Á., Szilágyi J. (2009a). Párolgásszámítási vizsgálatok hazai nagy tavainkon, I. Hidrológiai Közlöny, 89(2), pp. 47-50.

Kovács Á., Szilágyi J. (2009b). Párolgásszámítási vizsgálatok hazai nagy tavainkon, II. Hidrológiai Közlöny, 89(2), pp. 51-56.

Lükő, G., Torma, P., Weidinger, T. (2022). Intra-Seasonal and Intra-Annual Variation of the Latent Heat Flux Transfer Coefficient for a Freshwater Lake. Atmosphere, 13(2), 352. <https://doi.org/10.3390/atmos13020352>

Metzger, J., Nied, M., Corsmeier, U., Kleffmann, J., Kottmeier, C. (2018). Dead Sea evaporation by eddy covariance measurements vs. aerodynamic, energy budget, Priestley–Taylor, and Penman estimates. Hydrology and Earth System Sciences, 22 (2), 135-155. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1135-2018>

Meyer, A.F. (1942). Evaporation from lakes and reservoirs, a study based on fifty years' Weather Bureau Records. Minnesota Resources Commission, St. Paul, Minnesota.

Nikolaou, G., Neocleous, D., Kitta, E., Katsoulas, N. (2023). Assessment of the Priestley-Taylor coefficient and a modified potential evapotranspiration model. Smart Agricultural Technology, 3, 100075 <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100075>

Soja, G., Züger J., Knoflacher, M., Kinner, P., Soja, A. (2013). Climate impacts on water balance of a shallow steppe lake in Eastern Austria (Lake Neusiedl). Journal of Hydrology, 480, pp. 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.013>.

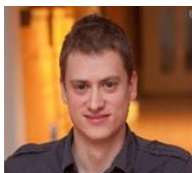
Török S.D., Torma P. (2024a). Fertő tó nyílt vízének párolgása és nádasállományának párologtatása az éghajlatváltozás tükrében. Magyar Hidrológiai Társaság XLI. Országos Vándorgyűlés, Szolnok, 2024. július 3-5.

Török, S.D., Torma, P. (2024b). Prediction of long-term changes of weak diurnal stratification in shallow lakes using artificial neural networks. Journal of Water and Climate Change. 15(8) pp. 3724-3737. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.032>

A SZERZŐK



TÖRÖK SEBESTYÉN DÁNIEL 1996-ban született Budapesten. Első (BSc) diplomáját 2019-ben szerezte a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Építőmérnöki Karán, ahol aztán 2021-ben MSc államvizsgát tett. PhD képzését 2022-től kezdődően a BME Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskolában végzi. A Magyar Hidrológiai Társaság tagja 2023 óta.



TORMA PÉTER 2011-ben szerzett építőmérnök MSc oklevelet, majd 2016-ban PhD fokozatot. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén dolgozik 2011 óta, 2019-től, mint egyetemi docens. Fulbright ösztöndíjasként a UW-Madison (USA) vendégkutatója volt a 2017/18-as tanévben. Kutatási területe a fizikai limnológia, a hidrometeorológia, különös tekintettel a víz-levegő határfelület turbulens cserefolyamatainak örvény-kovariancia elvű mérésére, a tavak hőháztartása, valamint a numerikus hidrodinamikai modellezésére. A Magyar Hidrológiai Társaság tagja 2023 óta.