A PÁROLGÁSMÉRŐ „A” KÁD ALKALMAZÁSA SZABAD VÍZFELSZÍN EVAPORÁCIÓJÁNAK MEGHATÁROZÁSÁRA

APPLICATION OF CLASS „A” EVAPORATION PAN FOR THE ESTIMATION OF OPEN WATER EVAPORATION

Simon Brigitta, Soós Gábor, Kucserka Tamás, Anda Angéla

Pannon Egyetem Georgikon Kar, Meteorológia és Vízgazdálkodás Tanszék, 8360 Keszthely, Festetics utca 7., *simonbrigitta.georgikon@gmail.com, sgkert@gmail.com, kucserkatamas@gmail.com, anda-a@georgikon.hu*

Összefoglalás. A vízháztartási mérleg egyik legfontosabb kiadási tagja a párolgás. 2014 és 2016 között egy három kezelésből álló kísérletet állítottunk be: (1) hagyományos párolgásmérő A kád tiszta vízzel töltve (C), (2) üledéket tartalmazó párolgásmérő A kád (S), (3) üledékkel rendelkező és a Keszthelyi-öbölre jellemző hínárnövényekkel (P_s; *Potamogeton perfoliatus, Myriophyllum spicatum, Najas marina*) telepített párolgásmérő A kád. A szezonális átlagos párolgások a C kezelés esetében alacsonyabbak voltak (3,2 ± 1,05 mm nap^{-1}) az S (3,7 ± 1,16 mm nap^{-1}) és P_s (4,0 ± 1,28 mm mm nap^{-1}) kezelések párolgásához viszonyítva. A kádkonstansok 1-nél magasabb értéke jelzi, hogy az üledékkel, illetve alámerülő hínárnövényekkel rendelkező kádak párolgása magasabb a C kezeléshez viszonyítva.

Abstract. One of the most important members of the water balance equation is the evaporation. Investigation in A pan evaporation was carried out between 2014 and 2016 including three treatments as follows; (1) Class A pan evaporation with tap water (C), (2) A pan with sediment-covered bottom (S) and (3) a Class A pan with sediment-covered bottom and submerged, freshwater aquatic macrophytes (P_s).The macrophytes were the predominant species of Keszthely Bay (*Potamogeton perfoliatus*, *Myriophyllum spicatum*, *Najas marina*). Overall seasonal mean evaporation rate was lower for C (3.2 ± 1.05 mm day^{-1}) than that of the seasonal daily average evaporation of S (3.7 ± 1.16 mm day^{-1}). The same response was observed in the evaporation of P_s (4.0 ± 1.28 mm day^{-1}). A pan coefficients value greater than 1 indicates that the evaporation of a Class A pan containing macrophytes and sediment is always higher than that of the evaporation of classic A pan.

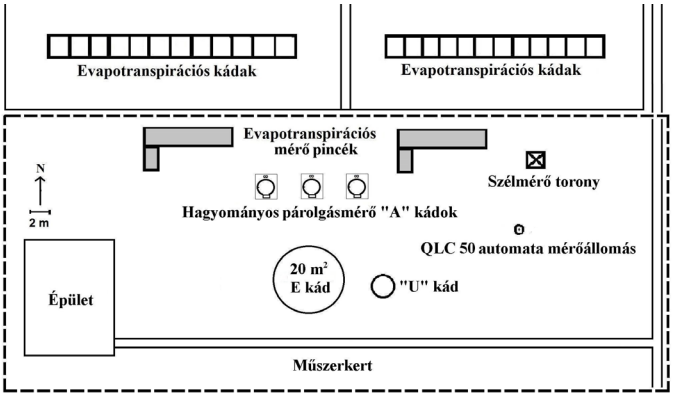
Bevezetés. A vízháztartási mérleg gyakran legfontosabb kiadási tagja a párolgás, kétféle módon közelíthető; méréssel és számítással. Bármelyik lehetőséggel is élünk, a párolgás meghatározása mind a mai napig több problémával terhelt. Annak ellenére, hogy mindenki előtt ismeretes a potenciálisan elkövethető hiba, a mindennapi gyakorlatban a párolgást a vízháztartási egyenleg maradék tagjaként fejezik ki. A nemzetközi gyakorlatban szívesebben publikálnak elméleti közelítésen alapuló párolgás meghatározásokat (energia mérlegen alapuló közelítés, fluxusok alkalmazása – eddy covariance –, Bowen-arány, empirikus modellek), de a kádpárolgás mérése is megmaradt, különösen a meteorológiai és a vízügyi állomás hálózatban. A leggyakrabban használt kád típus a nemzetközi életben is az „A” típusú kád *(Roderick et al*., 2009), melyet a múlt század vége óta a FAO nem javasol növények párolgásának meghatározásához *(Thom et al*., 1981). Helyette elterjedt a FAO-56 egyenlet *(Allen et al*., 1998), mely elég sok meteorológiai mérést igényel, s ott ahol ezen inputok mérésére nincs lehetőség, számolással lehet a hiányzó bemenő adatokat pótolni. A kísérletünk helyszínén is ez utóbbi lehetőséget kellett követnünk *(Soós and Anda*, 2012), melynek menetét a módszertani fejezetben mutatjuk be azzal a céllal, hogy ezt az eljárást a kevés meteorológiai adattal rendelkezők is követni tudják.

Az „A” kád a szabad vízfelszín párolgását méri *Penman* (1948) elméleti alapozását követve, melyet igen szigorú elhelyezési és fenntartási feltételek mellett kell működtetni *(Stanhill*, 2002). Korábban az „A” kád párolgásából közvetlenül történt a tavak, vízfelületek vízvesztésének becslése. Esetünkben ezen túllépve a szabad vízfelszínek párolgásához kívántunk közelebb kerülni azzal, hogy a természetes vizek összetételéhez jobban hasonlító feltételeket teremtettünk a kádban (iszap és víz alatti növények betelepítésével). Az eddig más által nem alkalmazott eljárás *(Anda et al*., 2016, 2018) eredményességét a Balaton Keszthelyi-öblének példájával szemléltetjük. Célkitűzésünkben a csapvízzel töltött kád evaporációját a behelyezett iszap és hínár transpirációjának együttesével kezeltük a pontosabb természetes felszíni párolgásbecslés közelítésével.

A kéziratban lévő ismertetés a címben közölt témában angol nyelven már megjelent publikációk néhány információjának rövidített magyar nyelvű összefoglalója. Teljes körű leírást az Irodalom c. fejezet publikációi tartalmaznak.

Anyag és módszer. A Pannon Egyetem Georgikon Karának Agrometeorológiai Kutatóállomásán (ARS; szélesség: 46° 44'N, hosszúság: 17 °14'E, tengerszint feletti magasság: 124 m) egy három kezelésből álló vizsgálatot állítottunk be, három egymást követő vegetációs időszakban (2014, 2015 és 2016). Az állomás egy CM-3 piranométerrel (Kipp & Zonen Corp., Delft, Hollandia) felszerelt QLC-50 klímaállomás (Vaisala, Helsinki, Finnország). A kombinált érzékelők a talajfelszín felett 2 méteres magasságban helyezkedtek el. A léghőmérséklet (T_a), a relatív légnedvesség (RH), a szélsebesség (u) és globálsugárzási adatokat 10 perces átlagokként rögzítettük. A szélmérő magassága 10,5 méter volt.

A kísérlet során három „A” típusú párolgásmérő kádat állítottunk be a meteorológiai műszerkertben *(1. ábra)*. Ezek a standard kádak 1,21 m átmérőjű és 0,255 m mély-



1. ábra: Az Agrometeorológiai Kutatóállomás

ségű, kör alakú hengerek, amelyek a talajon levő 0,15 m magas nyitott keretű farácsra lettek elhelyezve. Egy kádat a meteorológiai gyakorlatnak megfelelően tiszta csapvízzel töltöttünk meg (kontroll kezelés, C), a másik két kád fenekére Balatonból származó, homokból és iszapból álló üledéket tettünk (iszapos kezelés, S; *Anda et al.*, 2016). Az egyik iszappal borított kádba a Keszthelyi-öbölre jellemző, víz alá merülő, gyökerező hínárfajokat ültettünk (*Potamogeton perfoliatus, Myriophyllum spicatum* és *Najas marina* – hínár és iszapos kezelés, P_s). A vízhőmérséklet mérése mindhárom kezelés esetében 0,08–0,10 m mélységben történt 10 perces mintavételekkel (Delta Ohm HD-226-1). A kádak vízszintjének magasságát ≈ 0,2 m-en tartottuk, a kádak peremétől kb. 0,055 m-re. A napi párolgást minden reggel 7 órakor kézzel mértük. Az elpárologtatott vizet olyan csapvízzel pótoltuk, amelyet korábban egy fehér színű tartályban tároltunk. Feltételeztük, hogy a tartály vízhőmérséklete közelebb áll a kádak tényleges vízhőmérsékletéhez, mint a közvetlenül a csapból folyó víz hőmérséklete.

A párolgásmérő kádakat a makrofiták növekedési időszakában működtettük (májustól szeptemberig). A hínárnövények friss súlya 2014. július 18-án, 2015. június 5-én és 2016. június 6-án 2,309 ± 0.28, 2,047 ± 0.19 és 2,832 ± 0.18 kg volt. A vizsgálat végén a növények friss súlyát újra lemértük.

Az intenzív, nagy mennyiségű csapadék a kádak vizének túlcsordulását okozza, így a párolgás adatok ezeken a napokon elveszhetnek, melyeket analógia elvén pótoltuk.

A víztest napi referenciapárolgását (E_0, mm nap^{-1}) a Shuttleworth formula *(Shuttleworth*, 1992) alapján számoltuk, amely eredetileg Penman-egyenlet adaptációja *(Penman*, 1948):

$$E_0 = \frac{mR_n + \gamma * 6{,}43(1+0{,}536*u_2)\delta_e}{\lambda_v(m+\gamma)} \quad (1)$$

ahol az R_n a nettó sugárzás (MJm^{-2}nap^{-1}), m a telítési gőznyomás (kPaK^{-1}), u_2 a szélsebesség (ms^{-1}) 2 m magasságban, δ_e a gőznyomás (kPa), λ_v a látenshő (MJkg^{-1}), a γ pszichrometriai állandó (kPa°C^{-1}).

A növényi referencia evapotranspirációt (ET_0, mm nap^{-1}) a jól ismert FAO-56 (Penman-Monteith) egyenlet segítségével számítottuk ki:

$$ET_0 = \frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\Delta(1+0{,}34u)} \quad (2)$$

ahol G a talaj hőfluxusa (MJ m^{-2} nap^{-1}), T_a a napi átlagos léghőmérséklet 2 m magasságban (°C), *u* a szélsebesség 2 m magasságban (m s^{-1}), e_s a telítési gőznyomás (kPa), e_a a tényleges gőznyomás (kPa), Δ a gőznyomás telítési görbe meredeksége (kPa°C^{-1}), 0,408 a konverziós faktor.

Az R_n-t a globálsugárzásból számítottuk. Az albedóra 0,23-as fix értéket alkalmaztunk. A számítás részletes leírása *Soós and Anda* (2014) cikkében olvasható.

Az „A" típusú párolgásmérő kádak koefficienseit (K_a), K_{as}-t és K_{ap}-t, az S és P_s mért párolgásértékeiből származtattuk az alábbiak szerint:

$$K_{as} = \frac{E_p \; of \; S}{E_p} \quad (3)$$

$$K_{ap} = \frac{E_p \; of \; Ps}{E_p} \quad (4)$$

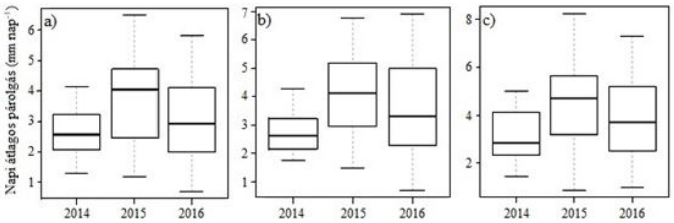
Az évjáratok meteorológiai elemeinek összehasonlítására párosított t-próbát alkalmaztunk, melyet minden esetben normalitásvizsgálattal kezdtünk. Az évjárat és a kád kezelések hatásait két-utas varianciaanalízissel (ANOVA) közelítettük. Ezt követően a páronkénti összehasonlításra a Tukey-féle HSD teszt szolgált. A számításokhoz az SPSS 6.0 verziót alkalmaztuk.

Eredmények és értékelésük. ***A vizsgálati időszak időjárása és a víz alá merülő makrofiták fejlődése.*** A tenyészidőszak sokévi (1971–2000) átlagos léghőmérséklete 16,9 °C *(1. táblázat)*; a legmelegebb hónap a július, 20,5 °C átlagos havi középhőmérséklettel, míg a leghűvösebb hónap az április (10,5 °C). Keszthelyt igen válto-

1. táblázat: A Keszthelyi Agrometeorológiai Kutatóállomáson mért havi átlaghőmérséklet (Ta) és csapadékösszeg (P) a vizsgálati években (2014, 2015, 2016). Az éghajlati normál adatai az 1971 és 2000 közötti időszakra vonatkoznak

	április	május	június	július	augusztus	szeptember	
	csapadékösszeg [mm]						összesen
norma	50,5	59,6	78,5	73,5	65,1	57,1	384,3
2014	58,6	76,5	59,7	113,1	148,1	159,7	615,7
2015	102,3	20,9	60,9	70,3	62,9	151,6	321,3
2016	14,7	73,0	93,2	128,7	103,6	14,4	427,6
	léghőmérséklet [°C]						átlag
norma	10,5	15,7	18,7	20,5	20,1	15,7	16,9
2014	12,3	14,7	18,9	21,2	19,1	16,1	17,1
2015	15,6	19,5	22,9	22,6	16,6	9,7	18,0
2016	12,5	16,0	20,2	22,0	19,5	17,4	17,9

zó és szabálytalan csapadékellátás jellemzi, a klíma normál szezonális csapadékösszege 384,3 mm. A havi átlagos csapadékösszegek 78,5 mm (június) és 50,5 mm (április) között változtak. Mindhárom vizsgálati időszakban (2014, 2015 és 2016) a levegő középhőmérsékletének szezonális átlaga némileg magasabb volt vagy közelítette a 30 éves átlagot. Júliusban azonban a hőmérséklet kb. 0,5–2 °C-kal magasabb volt az éghajlati normánál. A 2014-es tenyészidőszak átlagosnak tekinthető, mivel a léghőmérséklet nagyon közel állt a klíma normálhoz (0,2 °C-os növekedés; $p < 0{,}010$) volt megfigyelhető). A tenyészidőszakok léghőmérséklete 2015 és 2016 között 1,1 ($p<0{,}014$) és 1,0 °C–kal ($p<0{,}002$) magasabb volt, mint a sokévi átlag. A három vizsgált időszak közül a 2015-ös év aridabb jellegű, 17,9%-kal (63 mm-rel) kevesebb csapadékkal ($p<0{,}453$). 2014-ben rendkívüli menynyiségű csapadék hullott augusztusban (148,1 mm) és szeptemberben (159,7 mm), ami magas csapadékösszeget eredményezett ebben a tenyészidőszakban (46,3%-al a normál felett). A 2014-es esős időjárás nem segítette a kádak méréseit. Az előző tenyészidőszakhoz hasonlóan 2016-ban Keszthely 10,6%-al több csapadékot kapott ($p<0{,}174$), ami meghaladja az éghajlati normált. Ebben a tenyészidőszakban július és augusztus hónapok voltak



2. ábra: A napi átlagos párolgás, az „A" típusú párolgásmérő kádak különböző kezeléseinél az egymást követő három (2014–2016) vegetációs időszakban, Keszthelyen. A C, S és P_s a standard párolgásmérő „A" kádat (a), az üledékkel borított aljzatú kádat (b), illetve az üledékbe ültetett víz alá merülő (gyökerező) hínárnövényekkel telepített kezelést (c) jelöli.

rendkívül csapadékosak, a havi átlagos csapadékösszegeik meghaladták a 100 mm-t, ami körülbelül kétszer annyi, mint az éghajlati normál értékei.

A Keszthelyi-öbölre jellemző alámerülő hínárnövények beültetése az „A" kádakba akkor történt, mikor azok a természetes élőhelyükön megjelentek. A vízi makrofiták a Keszthelyi-öbölben minden tenyészidőszakban azonos eloszlású, de különböző szezonális megjelenést mutattak a három vizsgált faj vonatkozásában (kb. 33%). Jelenleg nem tudjuk megmagyarázni a Keszthelyi-öböl alámerülő, gyökerező hínárnövényeinek késői megjelenését 2014 tavaszán (DOY 201). A tavaszi erős szél által kiváltott hullámzás a víz áttetszőségének változását eredményezhette, ami az egyik lehetséges oka annak, hogy a makrofiták megjelenését a rendkívül szeles tavasz megakadályozta *(Anda et al.*, 2016). A 2014-es téli időszakban nem lehetett megtalálni a hínárnövények áttelelő képleteit, pedig általában télen azok a Balatonban gyakoriak. 2015-ben a makrofiták egy hónappal korábban jelentek meg (DOY 158). A legkorábbi növényi megjelenést 2016-ban figyeltük meg (DOY 157). A makrofiták 2014-ben augusztus végén, 2015-ben szeptember 10-én és 2016-ban szeptember 30-án fejezték be vegetációs időszakukat. A fentiek miatt a víz alatti, merülő hínárfajokkal végzett kísérleti periódusok hossza 42, 95 és 116 nap volt. 2016-ban a vegetációs időszak végén visszamért makrofiták friss tömege kétszer annyi volt, mint kezdeti tömegük. 2014-ben (13,4%) és 2015-ben (7,7%) kisebb mértékű tömeggyarapodást figyeltünk meg a vizsgálati időszakok végén.

Referencia párolgás (E_0, ET_0) és a kezelések párolgásainak alakulása a vizsgálati időszakokban. A napi átlagos párolgásértékek a C, S és P_s kezelésekben rendre 3,2±1,05; 3,7±1,16 és 4,0±1,28 mm nap^{-1} voltak *(2a., b. és c. ábra)*. A vizsgálat teljes időtartamában a mért napi „A" kád párolgások közelítettek a *Walkusz and Janczak* (2007) által mért értékekhez (3,3 mm nap^{-1}).

A párolgásmérő „A" kád tulajdonságainak megfelelően a napi párolgás a levegő hőmérsékletének változásaihoz igazodott, s nem a csapadék mennyiségéhez. A legmelegebb 2015-ben a C, S és P_s kezeléseknél 3,8±1,31; 4,2±1,34 és 4,7±1,32 mm-es napi átlagos párolgásértékeket mértünk. Romániában 2009-2014 között 4,3 mm-es napi párolgást mért *Stan et al*. (2016) GGI-3000 kádban, melyet egy tutajra helyeztek a Caldarusani-tó partján. A párolgásbeli eltérést a kádak méretbeli különbségei okozhatták. A leghűvösebb 2014-ben némileg alacsonyabb napi párolgásértékeket mértünk a 2015-ös és a 2016-os értékekhez képest (C: 2,7±0,93 mm nap^{-1}, S: 2,8±0,94 mm nap^{-1} és P_s: 3,1±1,20 mm nap^{-1}). 2016-ban 3,0±1,15, 3,6±1,44 és 3,8±1,50 mm nap^{-1} napi átlagos párolgást detektáltunk a C, S és P_s kezelések esetében, mely értékek a 2014-es és 2015-ös tenyészidőszakok értékei közé esnek. A szezonális napi maximum párolgásértékek a 2014-es, 2015-ös és 2016-os időszakban 5,5-től 6,3-ig, a 6,7-től a 8,2-ig és 5,8-től 7,3 mm nap^{-1}-ig terjedtek. A tenyészidőszaktól függetlenül a legmagasabb napi maximális párolgást mindig a P_s kezelésben mértük.

A vizsgált évektől függetlenül a napi párolgás szezonális változása szorosan követte a rendelkezésre álló energiát, ill. a napi középhőmérsékletet (az adatok nem szerepelnek). Közvetlenül az alámerülő hínárnövények megjelenése után júniusban (2015 és 2016) a napi párolgásértékek lassan emelkedő trendet mutattak a C-hez képest. A legmagasabb párolgásértékeket júliusban figyeltük meg, jelezve az év legmagasabb energia bevételét és a vízi makrofiták gyors növekedési ütemét. Augusztus közepétől csökkenő tendenciát mutattak a párolgás értékek a különböző kezelésekben. A referenciapárolgás (E_0 és ET_0) szezonális trendje a kádak párolgásának változásait követte.

Kétutas varianciaanalízissel (ANOVA) vizsgáltuk a tenyészidőszak és a hínárral beültetett kád evaporációjára (P_s) gyakorolt hatást. Mind az évjárat ($F_{(2,768)} = 46{,}683$, $p = 0{,}001$), mind a kád-kezelés ($F_{(2,768)} = 12{,}477$, $p = 0{,}001$) hatása szignifikáns volt, azonban a tenyészidőszak és a kezelés közötti kölcsönhatás már nem ($F_{(4,768)} = 0{,}835$, $p = 0{,}503$). A Tukey HSD poszt-hoc tesztek szignifikáns különbséget mutattak mindhárom kád-kezelés párolgása ($p<0{,}05$ valószínűségi szinten) és mindhárom tenyészidőszak között egyaránt ($p<0{,}001$ szinten páronkénti összehasonlításban; *2. táblázat)*.

2. táblázat: Az üledék (S) és a betelepített víz alá merülő vízinövények (P_s) hatása a párolgásmérő „A" kád (C) párolgására (a 2014 és 2016 közötti hároméves tenyészidőszakban) 95%-os konfidencia intervallumokkal

(I) Kezelés	(J) Kezelés	Átlagos eltérés (I-J)	Std. hiba	Sig.	95% konfidencia intervallum	
					Alsó	Felső
					határ	
C	S	-0,415*	0,1212	**< 0,002**	-0,699	-0,130
	P_s	-0,752*	0,1212	**< 0,000**	-1,037	-0,468
S	C	0,415*	0,1212	**< 0,002**	0,130	0,699
	P_s	-0,338*	0,1212	**< 0,015**	-0,622	-0,053
P_s	C	0,752*	0,1212	**< 0,000**	0,468	1,037
	S	0,338*	0,1212	**< 0,015**	0,053	0,622

Évi átlagok alapján. A négyzetes hiba=1.890
*Az átlagok szignifikancia szintje min. 5%.

3. táblázat: Az évjárat (2014-2016) hatása a makrofitákkal beültetett, Ps (a) és az üledékkel borított, S (b) kezelések párolgására. Az E_0 és az ET_0 a Shuttleworth (1992) és a Penman-Monteith képlet alapján számolt referencia evapotranspiráció értékei.

a)

(I) Kezelés	(J) Kezelés	Átlagos eltérés (I-J)	Std. hiba	Sig.	95% konfidencia intervallum	
					Alsó	Felső
					határ	
P_s	E_0	-0.583*	0.1208	**<0.000**	-0.866	-0.299
	ET_0	0.139	0.1208	0.485	-0.145	0.422
E_0	P_s	0.583*	0.1208	**<0.000**	0.299	0.866
	ET_0	0.721*	0.1208	**<0.000**	0.438	1.005
ET_0	P_s	-0.139	0.1208	0.485	-0.422	0.145
	E_0	-0.721*	0.1208	**<0.000**	-1.005	-0.438

Évi átlagok alapján. A négyzetes hiba=1.890
*Az átlagok szignifikancia szintje min. 5%.

b)

(I) Kezelés	(J) Kezelés	Átlagos eltérés (I-J)	Std. hiba	Sig,	95% konfidencia intervallum	
					Alsó	Felső
					határ	
S	E_0	-0,920*	0,1158	**<0,000**	-1,192	-0,648
	ET_0	-0,199	0,1158	0,199	-0,471	0,073
E_0	S	0,920*	0,1158	**<0,000**	0,648	1,192
	ET_0	0,721*	0,1158	**<0,000**	0,449	0,993
ET_0	S	0,199	0,1158	0,199	-0,073	0,471
	E_0	-0,721*	0,1158	**<0,000**	-0,993	-0,449

Évi átlagok alapján. A négyzetes hiba=1.890
*Az átlagok szignifikancia szintje min. 5%.

±1,09, 4,82±1,42 és 4,65±1,43 mm^{-1} nap voltak (három év átlaga: 4,47 mm^{-1} nap). Ugyanezen három évre a tenyészidőszakbeli ET_0 értékei: 3,33±0,93, 4,05±1,24 és 3,93±1,25 mm^{-1} nap (három év átlaga: 3,77 mm^{-1} nap). A párolgásbecslések közül, beleértve a méréseket és számításokat (E_0, ET_0 és E_p), az E_0 mindig a legmagasabb, évjárattól függetlenül. Ugyanezen időszakban a származtatott ET_0 értékei ennél valamivel alacsonyabbak.

A vizsgálat jelentőségét az emeli, hogy legjobb tudomásunk szerint *Anda et al*. (2016) korábbi publikációjának kivételével, nem találtunk információt a víz alá merülő makrofita növénycsoport párolgásra gyakorolt hatásáról. Korábbi publikációkat tanulmányozva egyetlen publikáció foglalkozott a vízi jácint párolgásra gyakorolt hatásával, ahol a növénnyel telepített vízpartra kihelyezett tartályok 26%-kal több vizet párologtattak, mint az ugyanoda telepített „üres" kádak párolgása *(Brezny et al*., 1973). Amellett, hogy ez a tanulmány 45 éves, a vízi jácint egy vízfelszínen lebegő évelő növény, és nem vízbe merülő makrofita. Mivel e két növényfaj vegetációs állománya morfológiailag és anatómiailag is jelentősen eltérő, a párolgásukkal való összevetéstől tartózkodtunk.

A standard „A" kád és az üledékkel fedett/makrofitákkal beültetett kádpárolgás vizsgálata mellett a kezelt kádak értékeit a számolt E_0-al és ET_0-al is összehasonlítottuk *(4a. és b. táblázat)*. Statisztikailag szignifikáns különbséget találtunk a P_s és az E_0 párolgása között *(Anda et al.*, 2016). Jelen tanulmány során kétutas varianciaanalízist (ANOVA) végeztünk az évjárat és a kád kezelés hatásának vizsgálatára. Az évjárat ($F_{(2,768)}$ = 26,782, p = 0,001) és a kád kezelés ($F_{(2,768)}$ = 16,718, p = 0,001) hatása szignifikáns eltérést mutatott, továbbá a tenyészidőszak és a kád-kezelés közötti kölcsönhatás ($F_{(4,768)}$ = 2,692, p = 0,030) szintén szignifikáns volt.

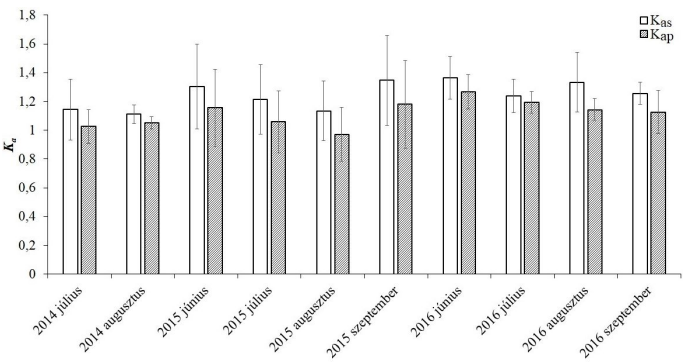
A számított E_0 és ET_0 értékek eltérően alakultak a három vizsgált tenyészidőszakban. A megfigyelés során a Penman-Monteith-féle képletből származó ET_0 értékek 16,99%-al alacsonyabbak voltak (p <0,0001), mint az E_0 értékei. Ez igazolta azt a feltevésünket, hogy az E_0 és az ET_0 egymással nem helyettesíthető párolgások. Viszont a Tukey féle poszt-hoc teszt nem mutatott szignifikáns különbséget a P_s és az ET_0 párolgásai között (p <0,485), így a Penman-Monteith egyenlet megfelelőnek bizonyult a tó hínárral rendelkező vízfelületének párolgásbecslésére *(3a. táblázat)*. Ugyanakkor az E_0 párolgás értékei 14,13%-al felülbecsülték a P_s értéket (p<0,0001), így a *Shuttleworth* (1992) formula felhasználhatósága kérdéses a Balaton (Keszthelyi-öblének) párolgásának becslésében.

A kétutas varianciaanalízis (ANOVA) alapján szignifikáns különbség mutatható ki az évjárat ($F_{(2,768)}$ = 24.956, p = 0.001) és a számolt referencia párolgás ($F_{(2,768)}$ = 29.537, p = 0,001) között. Azonban az évjárat és a referencia párolgás

interakciója (F*(4,768)* = 2.692, p = 0.030) már nem szignifikáns. Az E_0 és az ET_0 S kezeléssel való összehasonlítása ugyanerre az eredményre vezetett *(3b. táblázat)*. Az S értékei nem különböztek szignifikánsan az ET_0 értékétől. Az S kezelés párolgása 22,94%-kal alacsonyabb volt (p<0,0001), mint az E_0, míg az ET_0-hoz viszonyítva jóval alacsonyabb, 8,88%-os csökkenést detektáltunk (p<0,199), bár ez nem mutatott szignifikáns eltérést.

Végül kétirányú ANOVA elemzést végeztük az évjáratra és a számolt párolgásokra vonatkozóan is. Szignifikáns különbséget találtunk az évjárat (F*(2,768)* = 21.796, p <0.0001) és a számolt referencia párolgások (F*(2,768)* = 55,325, p<0,0001) között. Az interakció a két elem közt már nem szignifikáns (F*(4,768)* = 2,194, p<0,068). A kádpárolgások közti szignifikáns különbségek ellenére azt találtuk, hogy a C kezelés párolgása az E_0-hoz közelebb volt, mint az ET_0-hoz. A C kezelés párolgásának szezonális átlagait az E_0 és ET_0 értékei 18,55 és 8,56%-al szignifikánsan túlbecsülték (p<0,0001). Ezek alapján megállapítható, hogy az E_0 és az „A" kád mérési eredményei nem helyettesíthetők. A nyílt víztestek pontosabb párolgásbecsléséhez a helyszíni mérések célravezetőek, különösen olyan tavak esetében, amelyek eltérő éghajlati viszonyok között helyezkednek el.

Kád koefficiensek (K_a). A tenyészidőszakok változatos időjárási viszonyai eltérő koefficienseket eredményezték *(3. ábra)*. A havi átlagos K_a értékek a meleg 2015-ben és 2016-ban magasabbak, mint a 2014-es hűvösebb tenyészidőszakban mért értékek. A K_a havi értékei a vizsgálati időszakban 1,03-tól (K_{as} és K_{ap}: 2014 július) 1,37-ig terjedtek (K_{ap}: 2016 június). A havi átlagok közötti különbség a két K_a között meglehetősen kicsi volt, a víz alatti makrofiták rövid tenyészideje miatt. A legmagasabb átlagos havi K_a egy nyár végi hőhullám eredményeként 2015 szeptemberében alakult ki, ahol a napi maximum T_a többször meghaladta a 30 °C-ot (esetenként még a 35 °C-ot is elérte), mely érték jóval magasabb, mint az éghajlati normál. A szélsőségesen magas T_a teljesen el-



3. ábra: Havi átlagos kád koefficiensek (K_a) alakulása az üledéket tartalmazó, S (K_{as}) és az üledéket és makrofitákat is tartalmazó kezelés, P_s (K_{ap}) esetében (2014-2016)

pusztította az alámerülő makrofitákat, ezért a párolgás méréseket szeptember 10-én be kellett fejezni. Viszonylag magas K_a értékeket júniusban is detektáltunk (2015 és 2016), amelyek szintén a magasabb T_a-nak tulajdoníthatók. A havi átlaghőmérséklet-emelkedés 2015 és 2016 júniusaiban 4,2 és 1,5 °C volt.

Mindkét kezelésnél a tenyészidőszak havi átlagos K_a eloszlása kiegyenlítettnek mondható (1,11 és 1,24 között). Az egész időszakra vonatkozó K_{as} és K_{ap} átlagai 1,14+0,04 és 1,20+0,05 voltak. Nem volt szignifikáns a különbség az S és a P_s koefficiensei között (4,93%; p<0,148).

A megfigyelésünk alapján számolt K_a értékek nem egyeztek *Boyd's* (1987) ET/E_0 arányaival, ahol mindenütt 1,0 alatti értékekről számolt be a szerző vízfelületet lefedő növényfajoknál (*Nymphaea odorata*: 1,0, *Lemna minor*: 0,9, *Wolffia columbiana*: 0,89, *Spirodela polyrhiza*: 0,85). Ugyanezen szerző 1,0-nél magasabb arányokat a vízfelszín felett levelező fajoknál talált *(Eichhornia crassipes*: 1,55, *Typha latifolia*: 1,72). Valamennyi növényfajt 6,77 m^2 felületű tartályban neveltek. Egyik növényfaj csoportot sem tartjuk megfeleltethetőnek az általunk elemzett alámerülő hínárfajokkal.

4. táblázat: A Keszthelyi-öböl párolgás (E) becslése az üledékkel borított aljzatú (S) és a víz alá merülő makrofitákkal telepített kádkezelések (P_s) alapján nyert K_{as} és K_{ap} együtthatók felhasználásával 2014 és 2016 között. P a tenyészidőszak csapadékösszegét jelenti.

1. Csak a hagyományos párolgásmérő "A" kád mérései alapján									
	P	*E* [mm]	*Eltérés*	*P*	*E* [m^3]	*Eltérés*	*P*	*E* [millió m^3]	*Eltérés*
2014	684,0	585,7	98,3	2,67E+07	2,28E+07	3,83E+06	26,68	22,84	3,83
2015	460,0	644,6	-184,6	1,79E+07	2,51E+07	-7,20E+06	17,94	25,14	-7,20
2016	525,36	594,0	-68,7	2,05E+07	2,32E+07	-2,68E+06	20,49	23,17	-2,68
2. Üledéket tartalmazó kezelés párolgása alapján									
	P	*E* [mm]	*Eltérés*	*P*	*E* [m^3]	*Eltérés*	*P*	*E* [millió m^3]	*Eltérés*
2014	684,0	609,2	74,8	2,67E+07	2,38E+07	2,92E+06	26,68	23,76	2,92
2015	460,0	741,2	-281,2	1,79E+07	2,89E+07	-1,10E+07	17,94	28,91	-10,97
2016	525,36	701,0	-175,6	2,05E+07	2,73E+07	-6,85E+06	20,49	27,34	-6,85
3. Üledéket tartalmazó (95%) és makrofitákkal beületett kezelés (5%) párolgása alapján									
	P	*E* [mm]	*Eltérés*	*P*	*E* [m^3]	*Eltérés*	*P*	*E* [millió m^3]	*Eltérés*
2014	684,0	610,6	73,4	2,67E+07	2,38E+07	2,86E+06	26,68	23,81	2,86
2015	460,0	744,8	-284,8	1,79E+07	2,90E+07	-1,11E+07	17,94	29,05	-11,11
2016	525,36	704,6	-179,2	2,05E+07	2,75E+07	-6,99E+06	20,49	27,48	-6,99

Az üledékkel borított és a hínárral telepített párolgásmérő „A” kádak méréseiből származtatott K_a értékek szinte megegyeztek a *wetland*en élő vízi makrofiták helyszínen meghatározott növénykonstansaival *(Anda et al.*, 2014). A korábban mért növénykonstansokhoz képest (a közönséges nád esetében mért hat tenyészidőszak átlaga: 1,23) a jelenlegi tanulmány K_a értékei csak kissé alacsonyabb tenyészidőszakbeli középértékeket produkáltak. A K_{ap} értékei álltak a legközelebb a vizes élőhely növénykonstansaihoz, ami nagyon hasonló tenyészidőszakbeli átlagot mutatott (a különbség csak 2,47%).

A csapadék és a párolgás kapcsolata a Keszthelyi-öböl egyszerűsített vízmérlegével. Nem ismerve az öböl vízmérlegének tagjait, csak a két fontos vízháztartási tagot, a bevételi csapadékot és a kiadási párolgást (tekintettel az üledék és a makrofita jelenlétre) vettük figyelembe az öböl egyszerűsített vízmérlegének felírásakor. Tettük ezt annak ismeretében, hogy a csapadék az öböl vízbevételének csupán egy részét (kb. 40% -át) teszi ki, s több mint a fele vízbevétel a vízgyűjtőkről származik, elsősorban a Zala folyón keresztül.

Az egyszerű mérleg eredményeit a *4. táblázat*ban mutatjuk be. A párolgás becsléséhez alkalmaztuk az általunk meghatározott koefficienseket (K_{as} és K_{ap}). A Keszthelyi-öböl felszíne 39 km^2, a Balaton teljes területének csupán 6,5%-a. *Vári* (2012) megfigyelései alapján a Keszthelyi-öböl 5%-át víz alá merülő vízi makrofiták borítják. A fennmaradó területen (95%) az üledékkel borított aljzatot feltételeztük *(Anda et al.*, 2016).

A három vizsgált tenyészidőszakban az időjárási viszonyok nem voltak azonosak. A három év közül csak egy nedves (2014) tenyészidőszak volt, ahol P 73,4 mm-el meghaladta a tenyészidőszak teljes párolgásösszegét. Ezzel szemben a 2015-ös és 2016-os meleg időjárási viszonyok miatt a tenyészidőszak párolgásának csak 62 és 75%-a származott a csapadékból.

A K_{as} és a K_{ap} együtthatók alkalmazásával számolt Keszthelyi-öböl párolgás általi vízvesztése mindhárom évben meghaladta a csak az „A” kádból származtatott párolgási veszteséget. A 2014, 2015 és 2016 tenyészidőszakokban a növekedés mértéke 4,2, 17,1 és 14,4% volt. Ezek a százalékadatok magas többletpárolgást jelentenek az egész öbölre. Az együtthatókat alkalmazva a többlet vízvesztés évenkénti értékei rendre 0,97, 4,31 és 3,91 millió m^3 volt 2014-ben, 2015-ben és 2016-ban. Minél melegebb volt a tenyészidőszak, annál nagyobb a többletpárolgás az öbölben. A K_{as} egyedüli alkalmazása mérsékeltebb emelkedést eredményezett az öbölben (3.9%, 14% és 16,5% 2014-ben, 2015-ben és 2016-ban). Ha csak az iszap jelenlétével korrigált „A” kád adatait alkalmaznánk a Balaton párolgásának közelítésére (hínár nélkül), akkor a tó vízvesztésének mértéke nedves évjáratban 14,94 m^3-el, meleg-száraz szezonban 66,3 millió m^3-rel emelkedne. A következtetéseinket mindössze 3 év (szezon) adataiból származtattuk, melyek pontosítása további megfigyelést igényel.

Köszönetnyilvánítás. A projekt a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg. Köszönet az EFOP-3.6.1-16-2016- 00015 projekt anyagi támogatásáért. A publikáció elkészítését az EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00008 számú projekt támogatta. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalom

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. és Smith, M., 1998: Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56, Rome, Italy.

Anda, A., Simon, B., Soos, G., Menyhárt, L., Teixeira da Silva, J.A. és Kucserka, T., 2018: Extending Class A pan evaporation for a shallow lake to simulate the impact of littoral sediment and submerged macrophytes: a case study for Keszthely Bay (Lake Balaton, Hungary). *Agric. For. Meteor*. 250–251, 277–289.

Anda, A., Simon, B., Soos, G., Teixeira da Silva, J.A. és Kucserka, T., 2016: Effect of submerged, freshwater aquatic macrophytes and littoral sediments on pan evaporation in the Lake Balaton region, Hungary. *J Hydrol.* 542, 615–626.

Anda, A., Teixeira da Silva, J.A. és Soós, G., 2014: Evapotranspiration and crop coefficient of the common reed at the surroundings of Lake Balaton, Hungary. *Aquatic Bot.* 116, 53–59.

Boyd, C. E., 1987: Evapotranspiration/evaporation (E/R_0) ratios for aquatic plants. J. Aquat Plant Manage. 25, 1–3.

Brezny, O., Mehta, I. és Sharmas, R.K., 1973: Studies of evapotranspiration of some aquatic weeds. *Weed Sci*. 21, 3, 197–204.

Penman, H.L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Royal Soc. London. Ser. A, Mathematical Phys. Sci*. 193, 1032, 120–145.

Roderick, M.L., Hobbins, M.T. és Farquhar, G.D., 2009: Pan evaporation trends and the terrestrial water balance. I. Principles and observations. *Geogr. Compass*. 3, 2, 746–760.

Shuttleworth, W.J., 1992: Chapter 4 Evaporation. In: Maidment, D.R. (Ed.), Handbook of Hydrology. *McGraw-Hill Inc*., New York.

Soós, G. and Anda, A. 2014: A methodological study on local application of the FAO-56 Penman-Monteith reference evapotranspiration equation. *Georgikon for Agriculture* 18, 2, 71–85.

Stan, F.I., Neculau, G., Zaharia L., Toroimac G. and Mihalache S., 2016: Study on the Evaporation and Evapotranspiration Measured on the Căldăruşani Lake (Romania). *Procedia Environ. Sci*. 32, 281–289.

Stanhill, G., 2002: Is the Class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements? *Agric. For. Meteorol*. 112, 3–4, 233–236.

Thom, A.S., Thony, J.L. és Vauclin, M., 1981: On the proper employment of evaporation pans and atmometers in estimating potential transpiration. *Q. J. Roy. Meteor. Soc*. 107, 453, 711–736.

Vári, A., 2012: Propagation and growth of submerged macrophytes in Lake Balaton. *PhD Thesis*.

Walkusz, E. and Janczak, J., 2007: Comparative study of evaporation rate from surface water of Lake Radunskie Górne and that from an evaporimeter pan placed on land. *Limnological Review*. 7, 4, 241–246.