

EDDY-KOVARIANCIA ALAPÚ EVAPOTRANZSPIRÁCIÓ MÉRÉSEK ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉSE

Incze Dóra ⁽¹⁾ , **Barcza Zoltán** ^(1,2) , **Pintér Krisztina** ⁽³⁾ , **Nagy Zoltán** ^(3,4) ,
Balogh János ⁽⁴⁾ , **Fodor Nándor** ⁽⁵⁾ , **Haszpra László** ^(6,7) 

⁽¹⁾ ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,
Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

⁽²⁾ Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Forestry and Wood Sciences,
165 21 Prague 6, Kamýcká 129

⁽³⁾ MTA-MATE Agroökológiai Kutatócsoport, 2100 Gödöllő, Páter Károly utca 1.

⁽⁴⁾ MATE Növénytermesztési-tudományok Intézet, 2100 Gödöllő, Páter Károly utca 1.

⁽⁵⁾ ATK, Mezőgazdasági Intézet, 2462 Martonvásár, Brunsvík u. 2.

⁽⁶⁾ Atommagkutató Intézet, 4026 Debrecen, Bem tér 18/c

⁽⁷⁾ Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, 9400 Sopron, Csatkai E. u. 6–8.

e-mail: incze.dora96@gmail.com, zoltan.barcza@ttk.elte.hu, Pinter.Krisztina@uni-mate.hu,
Nagy.Zoltan@uni-mate.hu, balogh.janos@uni-mate.hu, fodor.nandor@atk.hu,
haszpra.l@gmail.com

Bevezetés

A klímaváltozás következtében egyre gyakrabban alakulnak ki olyan szélsőséges időjárási helyzetek, melyek hatással vannak a vízgazdálkodásra, és érzékenyen érintik a mezőgazdaságot. A víz ugyanis meghatározó módon befolyásolja a növényi anyagcserét, tápanyagfelvételt, légzést és párologtatást (Halperin et al., 2017). A víz bonyolult körforgásának egyik legfontosabb komponense a párologás. A talaj-növény-légkör rendszerben a talajban tárolt vízmennyiség a csupasz talajról történő párologás (evaporáció), és a növények párologtatása (transzspiráció) révén távozik a légkörbe. Emellett a lehullott csapadék egy része nem éri el a talajt, mert a vegetáció felfogja a vizet. A növényzetnek ezt a képességét intercepciónak nevezzük. A növényzet felszínén tárolt nedvesség a légkörbe szintén evaporációval kerül vissza. Az említett folyamatokat együttesen evapotranszspirációnak (ET) nevezzük (Aubinet et al., 2012; Bonan, 2002). Az ET mértéke (az ún. tényleges evapotranszspiráció) a különböző meteorológiai paraméterek (globálsugárzás, léghőmérséklet, relatív páratartalom, szélesebesség) mellett függ a vegetációtól és a talajban rendelkezésre álló vízmennyiségtől is (Stisen et al., 2021). Ebből adódóan az ET minél pontosabb becslése fontos az öntözési hatékonyság növelése, vagy a szárazföldi növények életét meghatározó alapvető anyagcsere folyamatok megértése érdekében (Fine et al., 2022).

A számos kutatás és módszertani fejlesztés ellenére a sok befolyásoló tényező miatt az ET az egyik legnehezebben becsülhető komponense a vízmérlegnek (Dimitriadou & Nikolakopoulos, 2021; Stisen et al., 2021). A közvetlen ET becslési módszerek telepítési és karbantartási költségei magasak, azonban pontosabb és megbízhatóbb értékeket szolgáltatnak, mint az egyéb módszerek. Az egyik ilyen közvetlen módszer az ún. eddy-kovariancia mérésekre támaszkodik. Az eddy-kovariancia alapú mérések általában monitoring jellegűek, azaz sok éven keresztül szolgáltatnak finom időbeli felbontásban ET adatokat adott mérési helyre vonatkozóan. Emiatt a mérések eredményei új és meghatározó fontosságú információt nyújtanak a vízmérleg komponenseiről (Baldocchi, 2014; Pan et al., 2020).

Az itt bemutatott kutatás célja az ET számszerűsítése és összehasonlító elemzése a Magyarországon rendelkezésre álló eddy-kovariancia mérések alapján. A mérések referencia adatokkal szolgálhatnak a természetes folyamatok megértéséhez, ezen keresztül pedig különböző modell-validálási és optimalizálási eljárásokhoz. A kutatáshoz felhasznált adatokat

összesen hat eddy-kovariancia mérés (Hegyhátsálon két torony, Bugacon, Kartalon, Kajászón és Pettenden egy-egy torony) szolgáltatta. Az országban két további helyszínen – Szurdokpüspökin (Nagy et al., 2011) és a Balatonnál (Istvánovics et al., 2022) – is végeztek/végeznek eddy-kovariancia méréseket, amelyek elemzésével a közeljövőben tervezünk foglalkozni.

Az eddy-kovariancia mérés technika

Az eddy-kovariancia (EK) mérés technika egy olyan mikrometeorológiai módszer, ami folyadékdinamikai és statisztikai alapokon nyugszik (Baldocchi, 2014). A módszer elnevezése a légkörben előforduló örvényekre (angolul “eddy”) utal, amelyek biztosítják a talaj-növény-légkör rendszerben lezajló folyamatok által létrehozott különböző anyag- és energiaáramok (például szén-dioxid, szenzibilis és/vagy látens hő, illetve momentum) szállítását. Kellően magas frekvenciával működő, rövid válaszidővel rendelkező szónikus anemométerek és gázanalizátorok révén a mikrometeorológiában jól ismert anyagmegmaradási egyenletből kiindulva ezen függőleges irányú, turbulens, sztochasztikus jellegű anyag- és energiaáramokat tudjuk számszerűsíteni (Stull, 1988). Az elnevezésben szereplő „kovariancia” egy statisztikai mérőszám, amivel azt vizsgáljuk, hogy két adatsor (esetünkben idősor, konkrétan a vertikális szélesség és a gázkoncentráció) esetén a változók változékonysága milyen mértékben hasonlít egymáshoz. Két valószínűségi változó (X, Y) kovarianciájának kiszámítása az alábbi egyenlet alapján történik:

$$\text{cov}(X, Y) = E(X \cdot Y) - E(X)E(Y) \quad (1)$$

ahol E az úgynevezett várhatóérték-operátor (Goodman, 1960).

Az EK mérés technikával a nagy gyakorisággal detektált vertikális szélesség és egy adott koncentráció kovarianciáját származtatjuk, ami leírja az időegység alatt felületegységen átáramló anyag mennyiségét, azaz a fluxust. A fluxusokat általában félórás vagy órás felbontásban szokás megadni. A hőmérséklet mérések alapján a szenzibilis hőáram, míg a vízgőz és a szén-dioxid koncentrációból a látens hőáram, valamint a szén-dioxid turbulens fluxusa származtatható (Aubinet et al., 2012). Az EK módszert széles körben alkalmazzák a szárazföldi növényzet felett kialakuló fluxusok számszerűsítésére (Fine et al., 2022).

A felszíni energiamérleg egyenlete az említett hőáramok alapján a következőképpen írható le (Denager et al., 2020):

$$R_n = LE + H + G \quad (2)$$

ahol R_n a nettó sugárzás (W m^{-2}), LE a látens hőáram (W m^{-2}), H a szenzibilis hőáram (W m^{-2}) és G a talajhőáram (W m^{-2}).

Az ET a látens hő és a párolgáshő hányadosából határozható meg (Denager et al., 2020). Az EK mérés technikával számolt látens hőáram (LE) félórás értékeiből a következő módon aggregálunk napi ET értéket:

$$ET_{EK, napi} = \frac{1}{\rho_w} \sum_{i=0}^{48} \frac{LE_{30 \text{ min}}^i}{\lambda(T)} \quad (3)$$

ahol ρ_w a víz sűrűsége (kg m^{-3}) és λ a párolgáshő (MJ kg^{-1}), ami a T hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$) függvénye. Ez utóbbit a Ding et al. (2010) egyenlete alapján számítjuk:

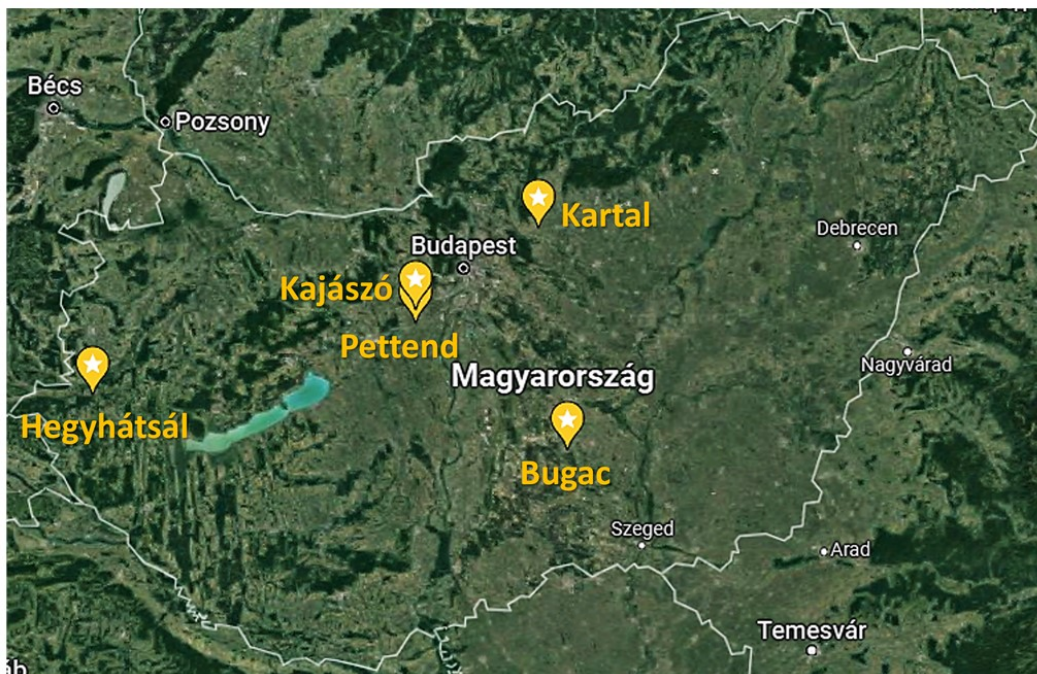
$$\lambda = (2.501 - 0.00236T) \quad (4)$$

Az EK mérések sok esetben monitoring jelleggel zajlanak, vagyis évekig biztosítanak folyamatosan adatokat a szén-, valamint a vízmérleg komponenseinek számszerűsítése érdekében. Vannak azonban olyan technikai okok (például áramszünet, műszer-kalibráció), amikor a folyamatos méréshez szükséges feltételek nem tudnak teljesülni, ezáltal pedig hiányoznak adatok az adatsorból (akár 20–60%-os arányban; Fine et al., 2022). Az adatok napi, havi, illetve éves szintű integrálásához a hiányzó adatok pótlása elengedhetetlen, amit úgynevezett “gap filling” módszerekkel szoktak végrehajtani (Aubinet et al., 2012).

Annak ellenére, hogy az EK módszer az egyik legelterjedtebb direkt árammérési technika, pontossága sok szempontból megkérdőjelezhető. A módszerrel – az elméletéből kiindulva – ideális esetben (viszonylag sík területen, valamint anticiklonális és advekciónélküli időjárási helyzetben) lehetne pontos mérést végrehajtani. Mivel a legtöbb esetben ezek a feltételek nem adottak, a mérések sok esetben véletlen hibával terhelték. Emellett hibát okozhat még a műszerek válaszüzejének korrekciója is. A mérésekben továbbá megjelenhetnek hibák az időjárási viszonyok sztochasztikus jellegéből adódóan is, illetve a turbulencia fejlettségének kapcsán (Loescher et al., 2006).

A felhasznált eddy-kovariancia mérőállomási adatok

Az adatokat különböző növényborítottságú mérőállomásokról – Hegyhátsálon a magastorony esetén egy vegyes mezőgazdasági területről; a hegyhátsáli alacsony torony és Bugac esetén gyepes területről; illetve Kartalon, Kajászón és Pettenden szántóföldi környezetben működő EK tornyokból (1. ábra) – gyűjtöttük be. Az EK toronymérésekkel kapcsolatos információkat az 1. táblázatban foglaltuk össze. Az EK állomásokon a fluxusok mérése mellett meteorológiai paraméterek (hőmérséklet, relatív nedvesség, csapadék, globálsugárzás) értékeit is rögzítik (Barcza & Fodor, 2018).



1. ábra: Jelen tanulmányban bemutatott EK mérési helyszínek (sárgával) földrajzi elhelyezkedése [1 – Google Earth].

1. táblázat: Jelen tanulmányban bemutatott EK mérési helyszínek növényborítottság szerinti besorolása, kiegészítve a mérési magassággal és az időtartamokkal. A szántóföldi mérőállomásokon a kijelölt mérési időtartamokon túl is történt mérés. Ezek a területek a köztes időszakokban csupaszon voltak hagyva (amiket időnként gaz vagy tarló boríthatott). Az adatgyűjtésünk 2022 végével zárult.

Mérőállomás	Növényborítottság	Mérés magassága	Mérés időtartama
<i>Hegyhátsál</i>	vegyes mezőgazdasági terület	82 m	1997.04.27. – 1999.12.31. 2001.02.15. – 2022.12.31.
<i>Hegyhátsál</i>	gyep	3 m	1999.03.01. – 2000.12.17. 2006.09.04. – 2018.12.31.
<i>Bugac</i>	gyep	4 m	2003.01.01. – 2022.12.31.
<i>Kartal</i>	őszi búza	1,8 m	2018.01.01. – 2018.07.17. 2019.10.14. – 2020.07.16. 2021.10.15. – 2022.06.30.
<i>Kartal</i>	repce	1,8 m	2018.09.10. – 2019.05.02.
<i>Kartal</i>	cirok	1,8 m	2019.05.03. – 2019.09.30.
<i>Kartal</i>	napraforgó	1,8 m	2021.04.04. – 2021.09.05.
<i>Kajászó</i>	őszi búza	3,3 m	2019.01.01. – 2019.07.17. 2021.10.03. – 2022.06.27.
<i>Kajászó</i>	árpa	3,3 m	2019.10.09. – 2020.06.27.
<i>Kajászó</i>	repce	3,3 m	2020.08.28. – 2021.07.10.
<i>Pettend</i>	őszi búza	3,4 m	2019.01.01. – 2019.07.17. 2021.10.12. – 2022.07.08.
<i>Pettend</i>	repce	3,4 m	2019.09.06. – 2020.07.06.
<i>Pettend</i>	árpa	3,4 m	2020.10.10. – 2021.06.27.

Hegyhátsál

Hegyhátsálon (é.sz. 46,95°, k.h. 16,65°, 248 m tszf.) a magastorony (82 m) alapú EK mérések 1997 óta zajlanak. Ezek a mérések egy nagyobb kiterjedésű vegyes mezőgazdasági területet reprezentálnak. A torony 10 km-es távolságán belül különböző felszínborítottság jellemző (53% szántóföld; 35,5% erdő; 11,5% egyéb), ami ezáltal reprezentálja Nyugat-Magyarország jellegzetes tájait. Ugyancsak Hegyhátsálon, 1999-ben EK mérések indultak a műszerkertben telepített tarackbúza (*Agropyron repens* L.) és angolperje (*Lolium perenne* L.) dominálta gyepes terület felett is, 3 m-es magasságban, egy magyar-japán együttműködés keretében (Barcza et al., 2003). Itt a szélmérő meghibásodása miatt 2001 és 2006 között a mérések szüneteltek (Hidy et al., 2012). A gyepet évente kétszer kaszálják (Barcza & Fodor, 2018). Az itteni kutatásokba az Atommagkutató Intézet (ATOMKI) is becsatlakozott az ICOS (the Integrated Carbon Observation System), az üvegházhatású gázok európai megfigyelő hálózatának révén.

Bugac

Bugacon (é.sz. 46,69°, k.h. 19,60°, 111 m tszf.) a nagy fajgazdagságú, 550 ha területű szürkemarha legelőn 4 m-es magasságban történik EK mérés az MTA-MATE Agroökológia Kutatócsoport tevékenységeinek keretén belül. A legelő a Kiskunsági Nemzeti Parkhoz tartozik. Az állomás 2002 júliusában lett telepítve (Nagy et al., 2007), az adatsor azóta folyamatos. Részben a bugaci EK állomáson mért látens hőáram adatai szolgálták alapul a

2019–2020-as években a térben modellezett párolgási értékek, illetve ET térkép validálásához (Pintér & Nagy, 2022).

Kartal

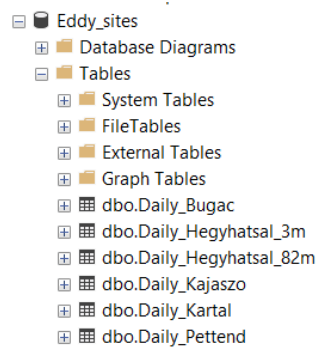
Kartalon (é.sz. 47,66°, k.h. 19,53°, 153 m tszf.) 2017 ősztől működik egy szántóföldi területre telepített, ugyancsak az MTA-MATE Agroökológia Kutatócsoport által üzemeltetett EK mérőtorony (Balogh et al., 2022). A torony működésének kezdete óta többféle mezőgazdasági növényt termesztettek: repcét, cirkot, napraforgót és több évben őszi búzát.

Kajászó és Pettend

2018-ban két egymáshoz közeli településen – Kajászon (é.sz. 47,33°, k.h. 18,72°, 163 m tszf.) és Pettenden (é.sz. 46,00°, k.h. 17,7°, 135 m tszf.) – telepítettek EK tornyokat az AgroMo projekt keretén belül. Kartalhoz és Bugachoz hasonlóan az MTA-MATE Agroökológia Kutatócsoport végzi az EK mérést szántóföldi környezetben. 2019 óta őszi búzával, repcével, valamint árpával zajlanak a mérések (Barcza & Fodor, 2018).

Adatfeldolgozás

Első lépésként az EK toronymérésekből származó félórás, illetve órás adatokat gyűjtöttük össze. A begyűjtött adatokon utófeldolgozást nem végeztünk az adatpótlástól eltekintve. A hiányzó adatok pótlása az átlagos napi menetek (MDV, mean diurnal variance) módszerével történt. A félórás, illetve órás adatokból a napi ET értékeket a (3) és (4) egyenletek alapján származtattuk. A (4) egyenletből kapott λ párolgáshő a hőmérséklet függvénye, emiatt a meteorológiai paraméterekre vonatkozó méréseket is összegyűjtöttük. Az ET mellett meghatároztuk még az energiamérleg tagjainak, illetve a meteorológiai változóknak a napi értékeit, melyeket helyszínenként elkülönítve táblázatos formában tárolunk az SQL (Structured Query Language) programnyelv segítségével (2. ábra), hogy a későbbiekben könnyebben megoldható legyen az adatok frissítése.

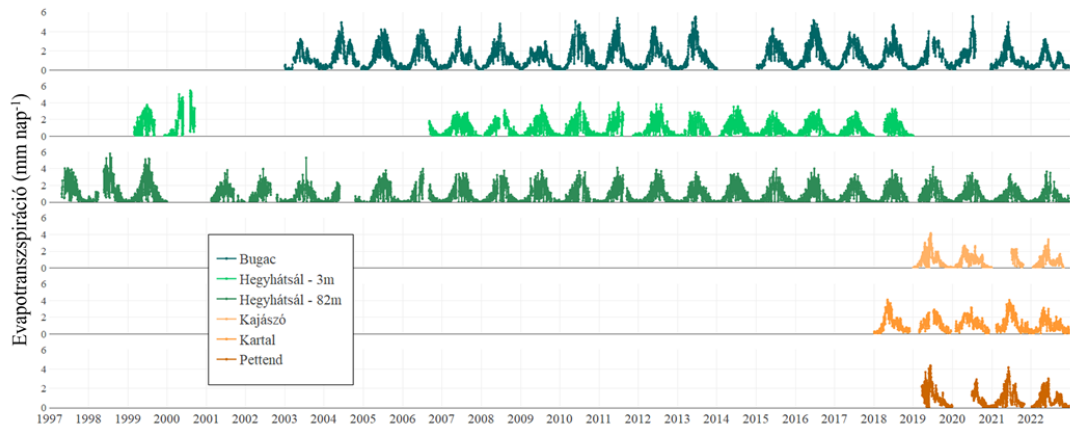


2. ábra: Az SQL (Structured Query Language) programnyelv segítségével tárolt napi értékek mérési helyszínenként elkülönítve.

Eredmények

A különböző mérési helyszíneken telepített EK toronymérések eltérő időszakokat fednek le. Ennek szemléltetésére szolgál a 3. ábra, mely együttesen ábrázolja a napi ET értékekből kapott idősorokat mind a hat EK toronyra. Az ábrán a teljes feldolgozott mérési időszakra (1997–2022) vonatkozóan vannak megjelenítve az értékek. A napi ET maximális értéke a teljes időszakban Bugacon volt (5,59 mm, 2020.07.06.). A szántóföldek feletti mérések közül

a legnagyobb maximális napi ET érték Pettendhez köthető 4,38 mm-rel (2019.06.10., őszi búza). Kajászáron és Kartalon a maximális érték rendre 4,17 mm (2019.06.14., őszi búza), illetve 4,11 mm (2018.05.07., őszi búza) volt.



3. ábra: A hat EK állomás napi ET értékei (mm nap⁻¹) a teljes mérési időszakra vonatkozóan. A hiányzó adatok pótlása itt nem történt meg.

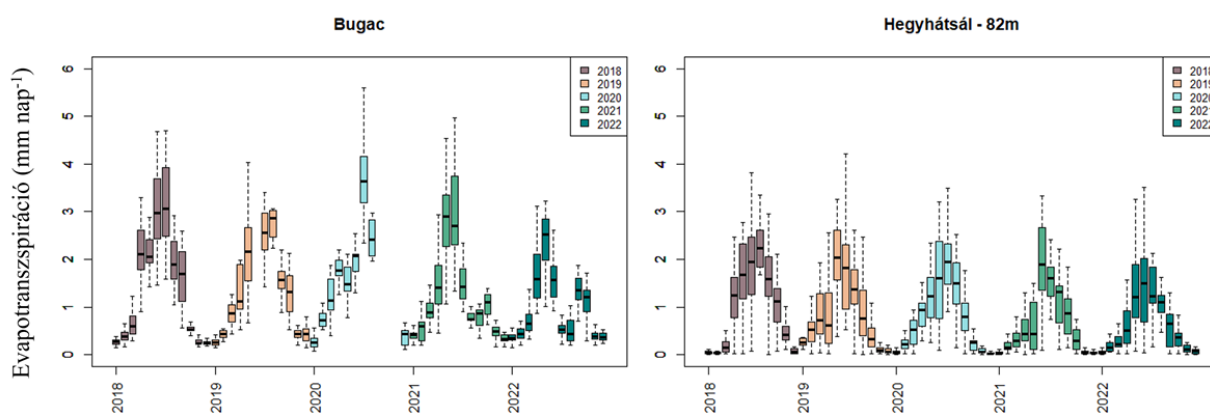
A szántóföldi területek felett működő EK tornyok 2018-ban (Kartal), illetve 2019-ben (Kajászó és Pettend) kezdték el rögzíteni az adatokat. Emiatt a vizsgálatok során főként a 2018–2022 közötti időszakra fókuszáltunk, annak érdekében, hogy lássuk, van-e eltérés az ET értékek között a különböző növényborítottságból adódóan. Hegyhátsálon a 3 m-es magasságban elhelyezett szenzorok a 2018-as év végéig működtek, így Hegyhátsálon elsősorban a 82 m-es magastorony méréseit tudtuk figyelembe venni.

Az adatok további elemzéséhez adatpótlást valósítottunk meg. A hiányzó napi adatok közül azokat pótoltuk a havi átlaggal (Zitouna-Chebbi et al., 2018), amelyek esetén az adott hónap legalább 66%-os időbeli lefedettséggel rendelkezett a napi szintű fluxusok alapján. Az adatpótlást követően meghatároztuk a napi ET értékek éves és havi összegét. Az éves összegeket táblázatos formában, míg a havi értékeket dobozdiagram (ún. boxplot) segítségével mutatjuk be.

A hegyhátsáli 82 m-es torony, illetve a bugaci mérések összehasonlítását a 4. ábra és a 2. táblázat foglalja össze. Az éves ET összegek egyértelműen Bugac esetén magasabbak, azonban az ábra alapján elmondható, hogy a havi átlagok sokkal jobban fluktuálnak az évek között. Ezzel szemben Hegyhátsálon az évek között nem mutatkozott nagy eltérés, egy enyhén csökkenő tendencia viszont megfigyelhető. Júniusban és júliusban (amikor a növényzet többlet párologtat) a bugaci legelőkre 3–4 mm-es, míg Hegyhátsálra 2–3 mm-es napi ET értékeket kaptunk átlagosan. Érdeemes megjegyezni, hogy a magastorony mérések nagyobb területet reprezentálnak egy vegyes mezőgazdasági területet lefedve, így a gyepes területeken túl a szántóföldek, erdők felett lejátszódó folyamatok befolyásolják az értékeket. A szántóföldeken ráadásul markánsan eltérő állapotú növények is lehetnek az éven belüli időponttól függően (például leszáradt búza éppen zöldellő kukoricaföld mellett), ami egyfajta kiegyenlítettséget okozhat. A 2018-as évre a 3 m-es hegyhátsáli torony mérések (gyepes terület) alapján ennek ellenére hasonló értéket (280 mm) kaptunk, mint a 82 m-es torony mérések esetén (296 mm).

2. táblázat: Éves ET összegek Bugac és Hegyhátsál magas torony (82 m) esetén a 2018–2022 közötti időszakra vonatkozóan.

		2018	2019	2020	2021	2022
Bugac	ET (mm)	501,42	352,02	358,37	431,41	350,69
	Növényborítottság	gyep	gyep	gyep	gyep	gyep
Hegyhátsál 82 m	ET (mm)	295,55	245,98	244,66	203,61	185,89
	Növényborítottság	vegyes mezőgazdasági terület	vegyes mezőgazdasági terület	vegyes mezőgazdasági terület	vegyes mezőgazdasági terület	vegyes mezőgazdasági terület



4. ábra: Havi ET a 2018–2022 közötti időszakra vonatkozóan Bugac (bal oldal) és Hegyhátsál – 82 m (jobb oldal) esetén.

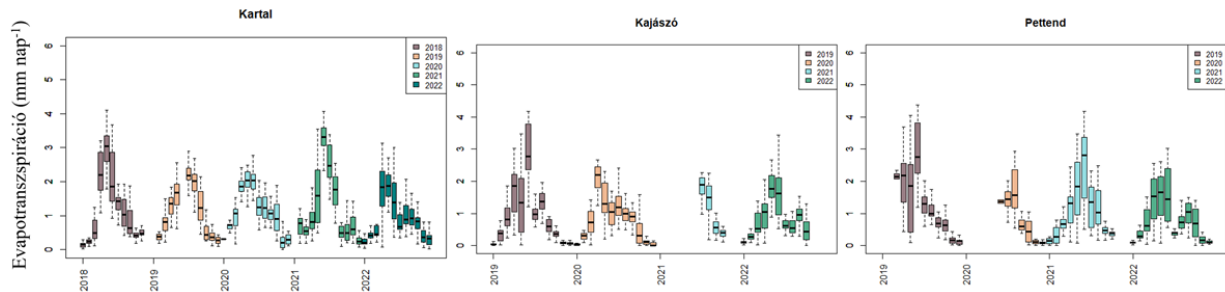
A 2018–2022 közötti időszakban Kartalon, Kajászón és Pettenden különböző típusú mezőgazdasági növényeket termesztettek (Kajászón és Pettenden 2019-ben indultak a mérések). Az 5. ábra és a 3. táblázat foglalja össze a szántóföldek feletti mérések eredményeit.

3. táblázat: Éves ET összegek Kartal, Kajászó és Pettend esetén a 2018–2022 közötti időszakra vonatkozóan.

		2018	2019	2020	2021	2022
Kartal	ET (mm)	380,69	310,02	368,66	402,18	327,94
	Növényborítottság	őszi búza	repcce/cirok	őszi búza	napraforgó	őszi búza
Kajászó	ET (mm)	-	325,04	287,00	-	246,39
	Növényborítottság	-	őszi búza	árpa	repcce	őszi búza
Pettend	ET (mm)	-	344,50	-	304,15	270,09
	Növényborítottság	-	őszi búza	repcce	árpa	őszi búza

A repcére vonatkozó méréseket nem vettük figyelembe, mert a mérési időtartam felében adathiány volt (2020-ban Pettenden és 2021-ben Kajászón). A mezőgazdasági növények közül a napraforgó éves ET összege volt a legmagasabb (402 mm), az árpa értékei 280–305 mm között mozogtak, míg az őszi búza éves összegei az árpánál magasabbak (325–380 mm) voltak, leszámítva a 2022-es évet. A legmagasabb átlagos napi ET értékek 2–3 mm

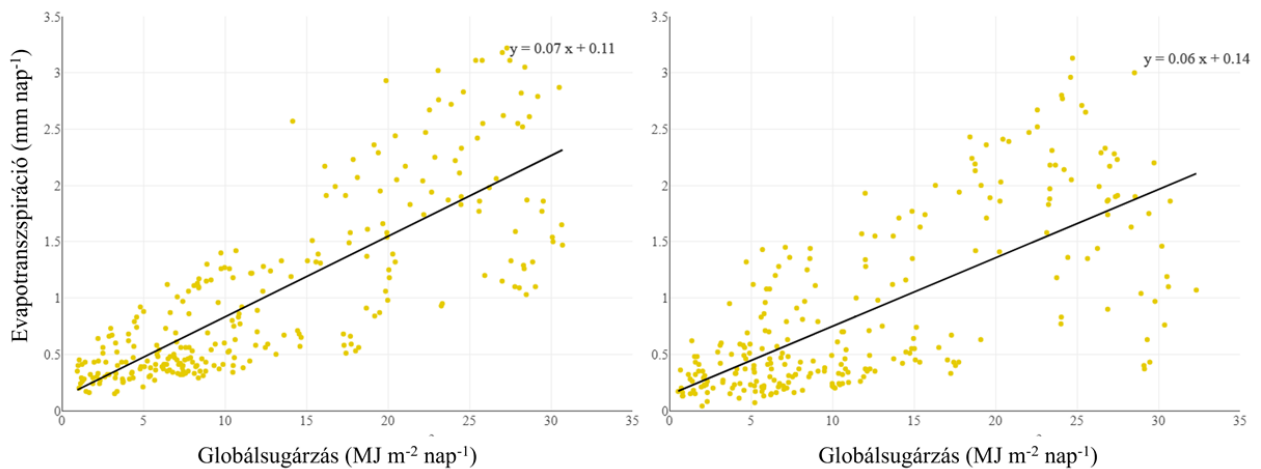
körül alakultak az őszi búza és az árpa esetén, a napraforgó pedig akár 3–3,5 mm-t is párologtat napi szinten a legmelegebb hónapokban. A bugaci legelés mérések azonban így is felülmúlták a szántóföldi mérések eredményeit, illetve összességében az eltérő növényborítottságból adódóan eltérő mértékű ET értékeket is kaptunk. Ezt befolyásolja még az állomások földrajzi adottsága, valamint a talajban rendelkezésre álló vízmennyiség, amiben jelentős különbségek adódtak az évek között.



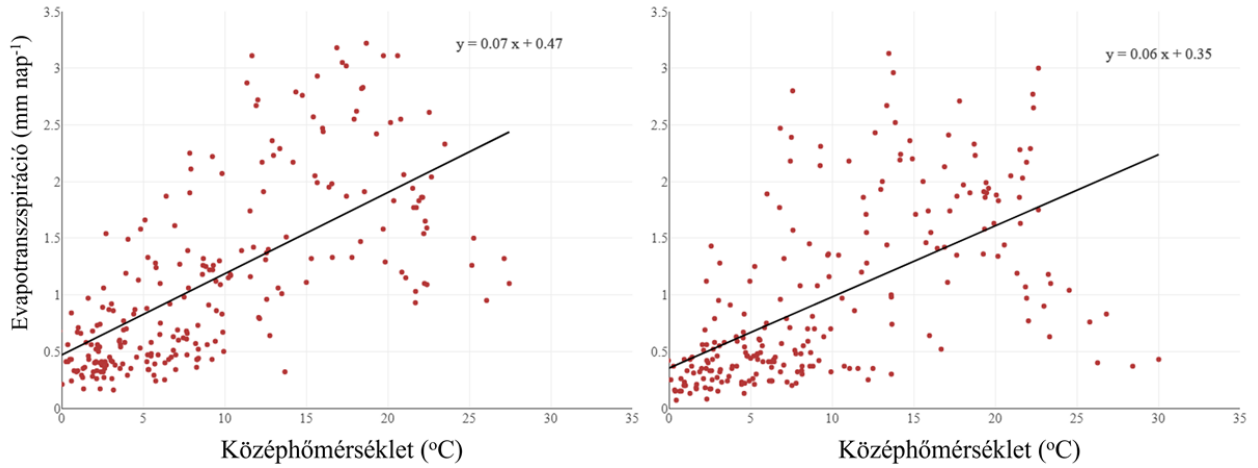
5. ábra: Havi ET értékek a 2018–2022 közötti időszakra vonatkozóan Kartal (bal oldal), Kajászó (közép) és Pettend (jobb oldal) esetén.

Az ET mértékét a talajnedvesség-tartalom mellett több meteorológiai paraméter (hőmérséklet, relatív nedvesség, szélesebbesség, globálsugárzás), és a növényzet állapota is meghatározza (Penman, 1948; Monteith, 1965). Mivel meteorológiai mérések is zajlanak a mérőállomásokon, megvizsgáltuk a korrelációjukat a napi ET értékekkel. A korrelációvizsgálat rámutathat a fontosabb és kevésbé fontos környezeti paraméterekre, amelyek az ET értékét befolyásolhatják. A relatív nedvesség helyett a telítési hiányt vizsgáltuk, amit a Magnus-Tetens formula (Magnus, 1844; Tetens, 1930) segítségével határoztunk meg. Mivel $n > 2$ valószínűségi változót vettünk figyelembe, parciális korrelációval mértük meg a valószínűségi változók közötti lineáris kapcsolatot, ami eltekint a többi változó hatásától (Lawrance, 1976).

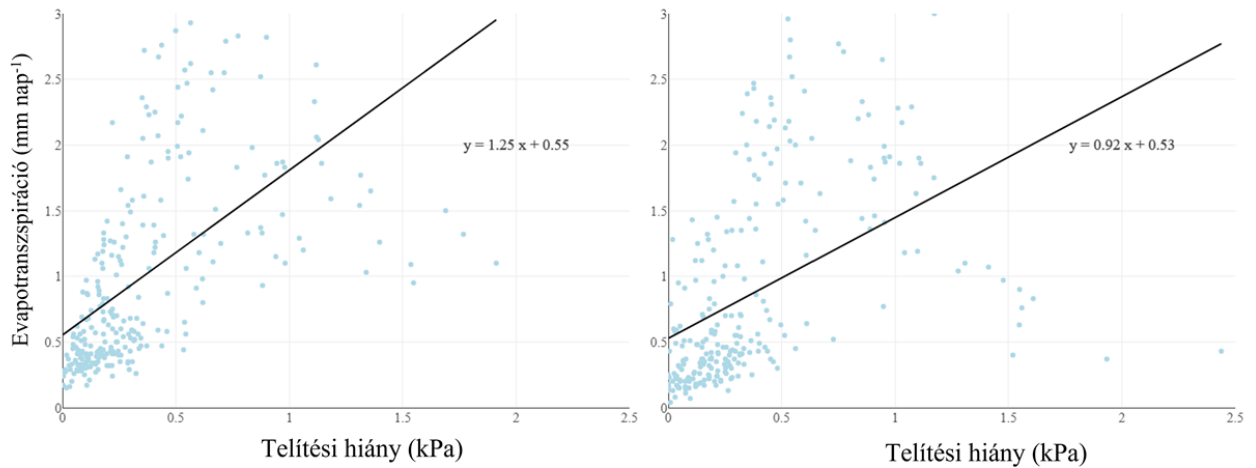
Az éveket összehasonlítva a 2022-es év volt a legjobb adatfedettségű, amikor a három szántóföldi EK állomáson őszi búzát termesztettek. A korreláció vizsgálatokhoz hasonló mintázatokat kaptunk helyszínenként, amelyek közül jelen tanulmányban Bugacra (gyep) és Kartalra (őszi búza) vonatkozó eredmények kerülnek bemutatásra (6–9. ábra).



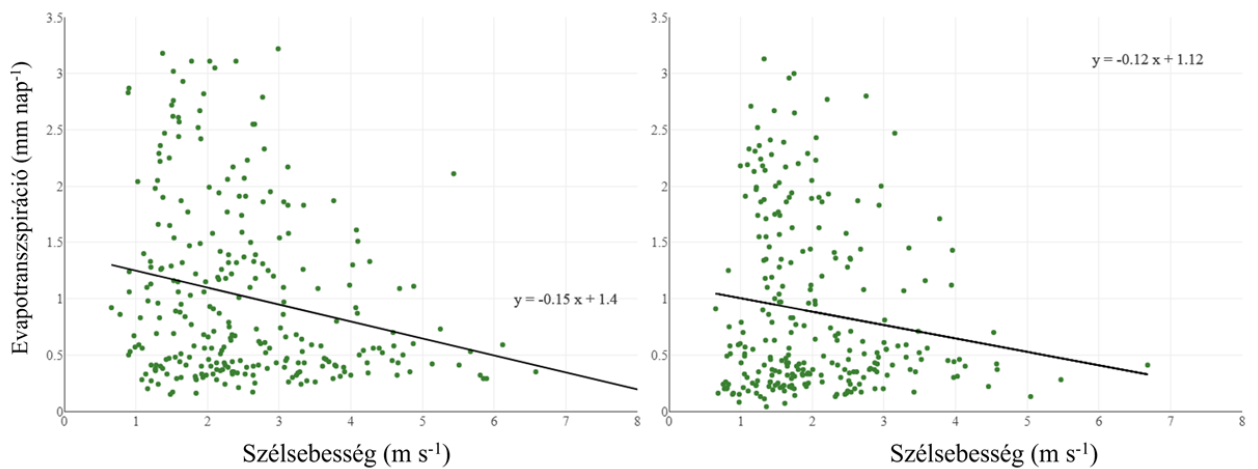
6. ábra: A napi globálsugárzás ($\text{MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$) és a napi ET (mm nap^{-1}) közötti kapcsolat Bugac (bal), illetve Kartal (jobb) esetén.



7. ábra: A napi középhőmérséklet (°C) és a napi ET (mm nap⁻¹) közötti kapcsolat Bugac (bal), illetve Kartal (jobb) esetén.



8. ábra: A napi átlagos telítési hiány (kPa) és a napi ET (mm nap⁻¹) közötti kapcsolat Bugac (bal), illetve Kartal (jobb) esetén.



9. ábra: A napi átlagos szélsebesség (m s⁻¹) és a napi ET (mm nap⁻¹) közötti kapcsolat Bugac (bal), illetve Kartal (jobb) esetén.

A legerősebb kapcsolat az ET és a globálsugárzás között volt fellelhető (6. ábra), míg a leggyengébb kapcsolat a szélesség esetén mutatkozott (9. ábra). Az ET és a meteorológiai változók közötti kapcsolat jellemzően erősebb volt a gyepes területek felett. Az ET globálsugárzással vett parciális korrelációja 0,74 és 0,67 a gyep és az őszi búza esetén rendre. A hőmérséklettel vett kapcsolat ennél valamivel gyengébbnek (0,63 és 0,52) tűnik a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** 7. ábra alapján. A szélesség és az ET közötti parciális korreláció gyenge lineáris kapcsolatra (0,04–0,14) utal (9. ábra). A parciális korreláció lineáris kapcsolatot feltételez, de az ábrák alapján lényegében minden változó esetén felmerül a nemlineáris kapcsolat lehetősége is.

Minden mérőállomáson továbbá megfigyelhető egy jelenség: a változók esetén az esetek többségében egy bizonyos érték felett (globálsugárzás: 25–30 MJ m⁻² d⁻¹; hőmérséklet: 25 °C; szélesség: 2 m s⁻¹) az ET-t egy csökkenő tendencia jellemzi.

További célunk az ennek hátterében meghúzódó okok, illetve még az ET és a talaj különböző mélységeiben lévő nedvességtartalom közötti kapcsolat feltárása. Az EK mérések esetében felmerül az energiamérleg lezárásának problémája is (Twine et al., 2000), amiből adódóan a módszer alulbecsülheti az ET értékét (ami akár 30-40% is lehet; Foken, 2008). Emiatt szeretnénk vizsgálni, hogy a számított értékek milyen mértékű korrekciót igényelhetnek az energiamérleg lezárásának érdekében. Tervezzük vizsgálni az ICOS-ban használt eljárás alkalmazhatóságát Magyarországon.

Összefoglalás

A növénytermesztésben a rendelkezésre álló vízmennyiség egyre fontosabb kérdéssé válik a klímaváltozás tükrében, hiszen a népesség növekedésével nő az élelmiszer iránti kereslet is. A növekvő élelmiszerigény kielégítése érdekében az édesvízkészletek fenntartható használata iránti nemzetközi érdeklődés az ET mérési és modellezési módszereinek tesztelését és fejlesztését szorgalmazza (Marek et al., 2014).

Az egyik népszerű módszer az EK mérésekre támaszkodik (Pan et al., 2020), amivel a függőleges irányú, turbulens anyag- és energiaáramokat tudjuk számszerűsíteni, köztük a látens hőáramot, amiből meghatározható az ET. Az itt bemutatott kutatáshoz felhasznált adatokat hat EK mérőtorony szolgáltatta, melyek gyepes területek vagy szántóföldek felett lettek telepítve.

A számítások során a 2018–2022 közötti időszakra fókuszáltunk, mivel célunk a különböző növényborítottság ET-re gyakorolt hatásának vizsgálata volt. Az eredmények alapján a bugaci legelő felett az EK mérésekből származtatott ET éves összegei magasabbak voltak a szántóföldekre kapott éves összegekhez viszonyítva. További vizsgálatra van szükség annak igazolására, hogy ez valóban így van. A mezőgazdasági növények közül a napraforgó éves ET összege volt a legnagyobb mértékű, amit az őszi búza, majd az árpa követett.

Az ET és az egyes meteorológiai paraméterek közötti kapcsolat szintén a bugaci gyep esetén volt jellemzően erősebb. A meteorológiai változók közül a globálsugárzás hatása volt a legjelentősebb az ET mértékére. A szélesség és az ET közötti kapcsolat feltételezhetően nemlineáris, ami további vizsgálatokat igényel, csakúgy, mint a talajban rendelkezésre álló vízmennyiség szerepe a folyamatokban.

Az eredmények hozzájárulnak a megbízhatóbb termés-előrejelzési becslések elkészítéséhez, az aszályal kapcsolatos vizsgálatokhoz, illetve az öntözési rendszerek hatékonyságának növeléséhez.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



Továbbá, a tanulmány elkészítéséhez hozzájárult még a TKP2021-NKTA-06 projekt, amely a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból, a [TKP2021-NKTA] támogatási program keretében finanszírozott, az Innovációs és Technológiai Minisztérium által nyújtott támogatással valósult meg.

A kutatások a GINOP-2.3.2-15-2016-00028 és az Éghajlatváltozás Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projektek és az MTA-MATE Agroökológia Kutatócsoport támogatásával valósultak meg.

Hivatkozások

- Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D., 2012: Eddy covariance: A practical guide to measurement and data analysis. Dordrecht, the Netherlands/ Heidelberg, Germany/London, UK/New York, NY: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1>
- Baldocchi, D., 2014: Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere - the state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biology*, 20: 3600–3609. <https://doi.org/10.1111/gcb.12649>
- Balogh, J., Pintér, K., Fóti, S., De Luca, G., Mészáros, Á., Bouteldja, M., Insaf, M., Gajda, G., Nagy, Z., 2022: Szántóföldi szénmérleg egy közép-magyarországi mintaterületen. *Agrokémia és Talajtan*, 71(2): 273–288. <https://doi.org/10.1556/0088.2022.00125>
- Barcza, Z., Haszpra, L., Kondo, H., Saigusa, N., Yamamoto, S., Bartholy, J., 2003: Carbon exchange of grass in Hungary. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 55(2): 187–196. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2003.00014.x>
- Barcza, Z., Fodor, N. (szerk.), 2018: Az AgroMo megközelítés: integrált biogeokémiai és mezőgazdasági modellrendszer kialakítása a hazai agroklimatológiai környezetben – modellfejlesztés és megfigyelőrendszer kapcsolata és együttműködése. Martonvásár. 150p.
- Bonan, G., 2002: Ecological Climatology. Concepts and applications. Cambridge University Press, Cambridge. 678p. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)00008-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)00008-3)
- Denager, T., Looms, M.C., Sonnenborg, T.O., Jensen, K.H., 2020: Comparison of evapotranspiration estimates using the water balance and the eddy covariance methods. *Vadose Zone Journal*, 19(1): e20032. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20032>
- Dimitriadou, S., Nikolakopoulos, K.G., 2021: Evapotranspiration Trends and Interactions in Light of the Anthropogenic Footprint and the Climate Crisis: A Review. *Hydrology*, 8: 163. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040163>
- Ding, R., Kang, S., Li, F., Zhang, Y., Tong, L., Sun, Q., 2010: Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. *Agriculture Water Management*, 98: 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.001>
- Fine, L., Richard, A., Tanny, J., Pradalier, C., Rosa, R., Rozenstein, O., 2022: Introducing State-of-the-Art Deep Learning Technique for Gap-Filling of Eddy Covariance Crop Evapotranspiration Data. *Water*, 14: 763. <https://doi.org/10.3390/w14050763>
- Foken, T., 2008: The energy balance closure problem: An overview. *Ecological Applications*, 18(6): 1351–1367. <https://doi.org/10.1890/06-0922.1>
- Goodman, L.A., 1960: On the exact variance of products. *Journal of the American Statistical Association*, 55: 708–713. <https://doi.org/10.1080/01621459.1960.10483369>

- Halperin, O., Gebremedhin, A., Wallach, R., Moshelion, M., 2017: High-throughput physiological phenotyping and screening system for the characterization of plant–environment interactions. *The Plant Journal*, 89: 839–850.
<https://doi.org/10.1111/tpj.13425>
- Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkinad, G., Pinter, K., Nagy, Z., 2012: Development of the Biome-BGC model for simulation of managed herbaceous ecosystems. *Ecological Modelling*, 226: 99–119. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.11.008>
- 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>
- Lawrance, A.J., 1976: On conditional and partial correlation. *The American Statistician*, 30(3): 146–149. <https://doi.org/10.1080/00031305.1976.10479163>
- Loescher, H.W., Law, B.E., Mahrt, L., Hollinger, D.Y., Campbell, J., Wofsy, S.C., 2006: Uncertainties in, and interpretation of, carbon flux estimates using the eddy covariance technique. *Journal of Geophysical Research*, 111: D21S90.
<https://doi.org/10.1029/2005JD006932>.
- Magnus, G., 1844: Versuche über die Spannkraft des Wasserdampfs. *The Annual Review of Physical Chemistry*, 137(2): 225–247. <https://doi.org/10.1002/andp.18441370202>
- Marek, G.W., Evett, S.R., Gowda, P.H., Howell, T.A., Copeland, K.S., Baumhardt, R.L., 2014: Post-processing techniques for reducing errors in weighing lysimeter evapotranspiration (ET) datasets. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 57: 499–515. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10433>
- Monteith, J.L., 1965: Evaporation and environment. In: *Proceedings of the 19th Symposium of the Society for Experimental Biology*. 205–233. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Nagy, Z., Pinter, K., Czobel, S., Balogh, J., Horváth, L., Fóti, Sz., Barcza, B., Weidinger, T., Csintalan, Zs., Dinh, N.Q., Grosz, B., Tuba, Z., 2007: The carbon budget of semi-arid grassland in a wet and a dry year in Hungary. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 121: 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.003>
- Nagy, Z., Barcza, Z., Horváth, L., Balogh, J., Hagyó, A., Káposztás, N., Grosz, B., Machon, A., Pintér, K., 2011: Grasslands. In: Haszpra, L. (eds) *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9950-1_6
- Pan, S., Pan, N., Tian, H., Friedlingstein, P., Sitch, S., Shi, H., Arora, V.K., Haverd, V., Jain, A.K., Kato, E., 2020: Evaluation of global terrestrial evapotranspiration by state-of-the-art approaches in remote sensing, machine learning, and land surface models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24: 1485–1509. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-409>
- Penman, H.L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193: 120–145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Pintér, K., Nagy, Z., 2022: Building a UAV Based System to Acquire High Spatial Resolution Thermal Imagery for Energy Balance Modelling. *Sensors*, 22(9): 3251.
<https://doi.org/10.3390/s22093251>
- Stisen, S., Soltani, M., Mendiguren, G., Langkilde, H., Garcia, M., Koch, J., 2021: Spatial Patterns in Actual Evapotranspiration Climatologies for Europe. *Remote Sensing*, 13: 2410. <https://doi.org/10.3390/rs13122410>
- Stull, R.B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 670p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- Tetens, O., 1930: Über einige meteorologische Begriffe. *Z. Geophys.*, 6: 297–309.

Twine, T.E., W.P. Kustas, W.P., Norman, J.M., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P.J., Wesely, M.L., 2000: Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103: 279–300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00123-4)

Zitouna-Chebbi, R., Prévot, L., Chakhar, A., Marniche-Ben Abdallah, M., Jacob, F., 2018: Observing actual evapotranspiration from flux tower eddy covariance measurements within a hilly watershed: Case study of the Kamech site, Cap Bon Peninsula, Tunisia. *Atmosphere*, 9: 68. <https://doi.org/10.3390/atmos9020068>

Internetes hivatkozások

[1 – Google Earth] <https://www.google.com/earth/>

ORCID

Incze D.  <https://orcid.org/0000-0003-0374-8842>
Barcza Z.  <https://orcid.org/0000-0002-1278-0636>
Pintér K.  <https://orcid.org/0000-0001-8737-706X>
Nagy Z.  <https://orcid.org/0000-0003-2034-9333>
Balogh J.  <https://orcid.org/0000-0003-3211-5120>
Fodor N.  <https://orcid.org/0000-0002-6460-1767>
Haszpra L.  <https://orcid.org/0000-0002-7747-6475>