



Az eddy-kovariancia mérések alapján származtatható evapotranspiráció bizonytalanságának vizsgálata

Incze Dóra, Barcza Zoltán, Pintér Krisztina, Nagy Zoltán, Fodor Nándor, Haszpra László

ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, incze.dora96@gmail.com

DOI: 10.56474/legkor.2024.2.2

A számos kutatás és módszertani fejlesztés ellenére az evapotranspiráció az egyik legnehezebben becsülhető komponense a vízmérlegnek. Az egyik közvetlen módszer, amivel az evapotranspirációt becsülni tudjuk, az ún. eddy-kovariancia mérés, amelyet a sok befolyásoló tényező és alapfelvetés miatt számottevő bizonytalanság terhel. Kutatásunk célja az evapotranspiráció mértékének és korlátainak meghatározása és becslése gyepes és szántóföldi területek felett a Magyarországon rendelkezésre álló hosszú idejű eddy-kovariancia mérések alapján.

Investigation of the uncertainty of evapotranspiration derived from eddy covariance measurements

Despite numerous research and methodological developments, evapotranspiration is one of the most difficult components of the water balance to estimate. One of the direct methods, with which evapotranspiration can be estimated, is the so-called eddy covariance; however, it may suffer from significant uncertainties due to many factors and basic assumptions. The current research aims to determine the rate and estimate the limits of evapotranspiration over grassland and arable land based on Hungarian long-term eddy covariance measurements.

A felszíni párolgás a víz bonyolult globális körforgásának egyik legfontosabb komponense. A talaj-növény-légkör rendszerben a talajban tárolt vízmennyiség a csupasz talajról történő párolgás (evaporáció), és a növények párologtatása (transpiráció) révén távozik a légkörbe. Emellett a lehullott csapadék egy része nem éri el a talajt, mert a vegetáció felfogja a vizet (intercepció). A növényzet felszínéről a nedvesség szintén evaporációval kerül vissza a légkörbe. Az említett folyamatokat együttesen evapotranspirációnak (ET) nevezzük (Aubinet *et al.*, 2012; Bonan, 2002).

Az ET mértéke (az ún. tényleges evapotranspiráció) a különböző meteorológiai paraméterek (globálsugárzás, léghőmérséklet, relatív páratartalom, szélesebbesség) mellett függ a vegetációtól és a talajban rendelkezésre álló vízmennyiségtől is (Stisen *et al.*, 2021). A párolgási folyamatokkal kapcsolatos ismereti hiátusok miatt jelenleg az ET a vízmérleg egyik legnehezebben becsülhető komponense a számos kutatás és módszertani fejlesztés ellenére is (Dimitriadou and 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 bár alapvetően kutatási célúak, sok esetben mégis monitoring jellegűek, azaz sok éven keresztül szolgáltatnak finom időbeli felbontásban ET adatokat adott mérési helyre vonatkozóan. Jó példa erre a FluxNet hálózat (Baldocchi, 2014). 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 mértékének meghatározása gyepes, valamint szántóföldi területek felett a Magyarországon rendelkezésre álló eddy-kovariancia mérések alapján. A jelen kutatáshoz felhasznált adatokat a Bugacon és Kajászón található eddy-kovariancia tornyok szolgáltatták.

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 turbulens 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 segítségével 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 a vertikális szélesebesség és a gázkoncentráció idősorai) esetén a mért paraméterek 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).

Elméletben a vertikális szélesebesség és egy adott gázkoncentráció kovarianciáját számszerűsítjük, ami leírja az időegység alatt felületegységen átáramló

anyag mennyiségét, azaz a fluxust. Továbbá, ha a száraz levegő sűrűségét állandónak feltételezzük, és alkalmazzuk a kvázi-hidrosztatikus közelítést, akkor az EK mérés technikával az említett mennyiségek fluktuációját tudjuk regisztrálni. 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 számszerűsíthető (Aubinet et al., 2012). Az EK módszert széles körben alkalmazzák a szárazföldi növényzet, illetve a nyílt vízfelületek felett kialakuló fluxusok számszerűsítésére (Fine et al., 2022).

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

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

ahol R_n a nettó sugárzás (W m^{-2}), LE a látens hőáram (W m^{-2}), H a szenzibilis hőáram (W m^{-2}), G a talajhőáram (W m^{-2}), ε pedig a maradéktag (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:

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

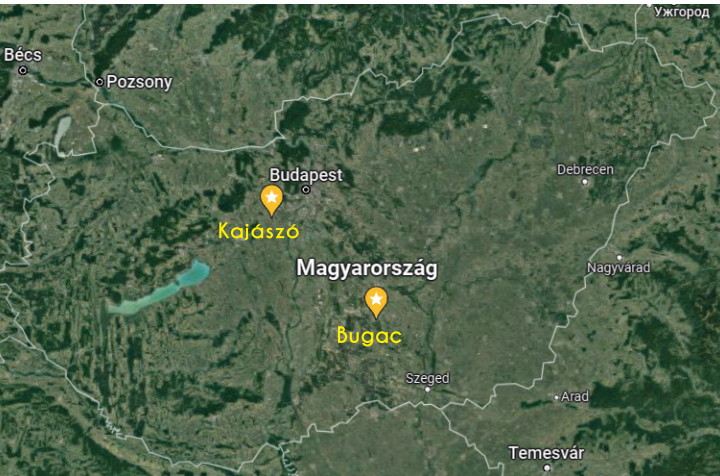
ahol ρ_w a víz sűrűsége (kg m^{-3}) és λ a párolgáshő (MJ kg^{-1}), ami a T léghőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$) függvénye. Ez utóbbit a Ding et al. (2010) egyenlete alapján számítjuk:

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

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 szisztematikus hiba is felléphet a műszerek válaszüdejéből, illetve az egyéb veszteségekből adódóan, ami további korrekciót igényelhet. A mérésekben megjelenhetnek hibák az időjárási viszonyok sztochasztikus jellegéből adódóan is, illetve a turbulencia fejlettségének kapcsán (Loescher et al., 2006).

A felhasznált eddy-kovariancia mérőállomási adatok

Magyarországon több helyen végeznek EK méréseket, melyeknek az összehasonlító elemzését az ET vonatkozásában *Incze et al.* (2023) foglalta össze. Hegyhátsálon (é.sz. 46,95°, k.h. 16,65°, 248 m tszf.) 1997 óta egy 82 m-es magastornyot, valamint 1999 óta egy gyepes terület feletti 3 m-es tornyot működtetnek (*Barcza et al.*, 2003). Kartalon (é.sz. 47,66°, k.h. 19,53°, 153 m tszf.) 2017 ősztől működik egy szántóföldi területre telepített, a HUN-REN-MATE Agroökológia Kutatócsoport által üzemeltetett EK mérőtorony (*Balogh et al.*, 2022). Pettenden (é.sz. 46,00°, k.h. 17,7°, 135 m tszf.) 2018-ban telepítettek EK tornyot szántóföldi környezetben (*Barcza és Fodor*, 2018). Az országban további helyszíneken – Szurdokpüspökin (*Nagy et al.*, 2011), Szegeden (*Salavec et al.*, 2017), Siójuton (*Gandhi et al.*, 2018), a Fertő-tavon (*Kiss és Torma*, 2014; *Kiss és Józsa*, 2014, 2015) és a Balatonon (*Lükő et al.*, 2021, 2022; *Istvánovics et al.*, 2022) – is végeztek/végeznek EK méréseket. Jelen kutatáshoz az adatokat a bugaci gyepes területről és a kajászó szántóföldről (1. ábra) gyűjtöttük be annak érdekében, hogy vizsgáljunk a növényborítottság esetleges hatását is.



1. ábra. A vizsgált EK mérési helyszínek (sárgával) földrajzi elhelyezkedése [Forrás: Google Earth].

Bugac

Bugacon (é.sz. 46,69°, k.h. 19,60°, 111 m tszf.) a nagy fajgazdagságú, 550 ha területű szürkemarha legelőn 4 m magasságban történik EK mérés a HUN-REN-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 szolgáltak alapul a 2019–2020-as években a térben modellezett párolgási értékek, illetve ET térkép validálásához (*Pintér és Nagy*, 2022).

Kajászó

2018-ban Pettendhez közel, Kajászón (é.sz. 47,33°, k.h. 18,72°, 163 m tszf.) telepítettek EK tornyot az AgroMo projekt keretén belül. Kartalhoz és Bugachoz hasonlóan a HUN-REN-MATE Agroökológia Kutatócsoport végzi az EK mérést szántóföldi környezetben. 2019 óta őszi búzával, repcével, valamint árpával zajlanak a mérések (*Barcza és Fodor*, 2018).

Az EK toronymérésekkel kapcsolatos információkat az 1. táblázatban foglaltuk össze: ezek a mérési helyszínek növényborítottság szerinti besorolása, kiegészítve a mérési magassággal és a mérések által lefedett időtartamokkal. A kajászó szántóföldi mérőállomáson a kijelölt mérési időtartamokon túl is történtek mérések. A terület az aratás utáni és vetés előtti köztes időszakokban csupaszon volt hagyva (amit időnként gaz vagy tarló boríthatott). Az adatgyűjtésünk 2022 végével zárult. Az EK állomásokon a fluxusok mérése mellett meteorológiai paraméterek (hőmérséklet, relatív nedvesség, csapadék, globálisugárzás) értékeit is rögzítik (*Barcza és Fodor*, 2018).

Mérőállomás	Növényborítottság	Mérés magassága	Mérés időtartama
Bugac	gyep	4 m	2003.01.01. – 2022.12.31.
Kajászó	őszi búza	3,3 m	2019.01.01. – 2019.07.17. 2021.10.03. – 2022.06.27.
Kajászó	árpa	3,3 m	2019.10.09. – 2020.06.27.
Kajászó	repce	3,3 m	2020.08.28. – 2021.07.10.

1. táblázat. Mérőállomások paraméterei.

Adatfeldolgozás

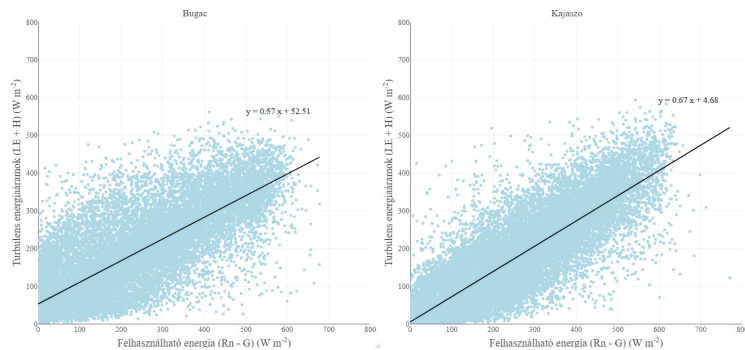
Első lépésként az EK toronymérésekből származó félórás adatokat gyűjtöttük össze. Az ET származtatása az adott állomás vezető kutatója által választott adatfeldolgozási

módszertannal lett elvégezve, amit itt külön nem részletezünk. A begyűjtött adatokon az adatpótlástól eltekintve utófeldolgozást nem végeztünk. A hiányzó adatok pótlása az átlagos napi menetek (mean diurnal variance (MDV); Falge et al., 2001) módszerével történt.

A félórás, illetve órás adatokból a napi ET értékek a (3) és (4) egyenletek alapján becsülhetők. A (4) egyenletből kapott λ párolgáshő a hőmérséklet függvénye, emiatt a meteorológiai paraméterekre vonatkozó méréseket is összegyűjtöttük. A kutatás során a nappali ET meghatározására fókuszáltunk, vagyis amikor $H > 0$, $LE > 0$ és $R_n - G > 0$ (Durand, 2022).

Az EK mérések esetében felmerül az energiamérleg lezárásának problémája is (Twine et al., 2000; Mauder et al., 2020). A lezárási probléma azt jelenti, hogy az EK alapú ET mérések valószínűleg alulbecslik a valóságot. Az adatfeldolgozás során emiatt megvizsgáltuk az energiamérleg-hiányt, vagyis a látens és a szenzibilis hőáram, illetve a felhasználható energia egyensúlyát. Abban az esetben, amikor a regresszió meredeksége egy körüli (azaz az energiamérleg zár, és teljesül az energiamegmaradás törvénye), a becslés realiztikusnak tekinthető (Verma et al., 2005).

A 2. ábra az energiamérleg hiányát mutatjuk be a félórás értékek alapján Bugac és Kajászó esetén a 2019–2022-es időszakot tekintve. A kutatás célja kifejezetten a félórás értékek vizsgálata volt, mivel a szakirodalom szerint a zárási hiba a napi értékek alkalmazásával csökken (Mauder et al., 2020). Az ET bizonytalanságának meghatározásához azonban célszerű a nagyobb zárási hibával rendelkező, félórás értékeket figyelembe venni. Az ábrán jól látható, hogy a regressziók meredekségei rendre 0,57 és 0,67, amik jóval alatta vannak a kívánt eredménynek. Ebből adódóan az EK módszer akár jelentősen is alulbecsülheti az ET értéket (Foken, 2008). A szakirodalom (Mauder et al., 2020; Durand, 2022) több megoldást javasol az energiamérleg lezárásához, amik alapján három esetet vizsgáltunk meg: 1) kizárólag a szenzibilis hőáramnak tulajdonítottuk a veszteséget; 2) kizárólag a látens hőáramnak tulajdonítottuk a veszteséget; 3) a Bowen-arány (a szenzibilis és látens hő aránya) megmaradását figyelembe véve korrigáltuk a szenzibilis és a látens hőáramot. Az 1) esetben az ET lehető legkisebb, a 2) esetben pedig a lehető legnagyobb értékét kaptuk, tehát energetikai szempontból behatároltuk a lehetséges ET értéket. Vizsgálataink a 2019–2022-es időszakra terjedtek ki, mivel a különböző mérési helyszíneken telepített EK toronymérések eltérő



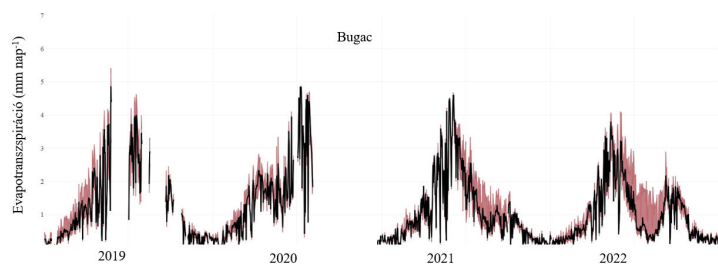
2. ábra. Az energiamérleg hiány vizsgálata Bugac (bal oldal) és Kajászó (jobb oldal) esetén a 2019–2022 közötti időszakot tekintve a félórás értékekből kiindulva.

időszakokat fedtek le (1. táblázat). Az ET összegeinek meghatározásához a hiányzó napi adatokat a havi átlaggal pótoltuk (Zitouna-Chebbi et al., 2018).

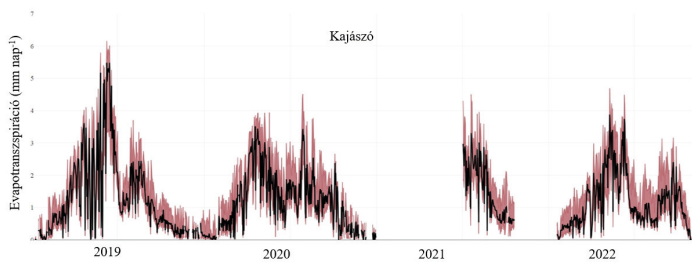
Eredmények

A korrekciót követően meghatároztuk a lehető legnagyobb és legkisebb napi ET értékeket (mm nap^{-1}) a bugaci gyepes területre, valamint a kajászói szántóföldre vonatkozóan a teljes idősorra vonatkozóan. A 2019–2022 közötti időszak lehetséges ET értékeit a 3. és 4. ábra szemlélteti, míg a számszerűsített eredményeket a 2. táblázat foglalja össze. Mivel célunk a gyep és a szántóföldi növények összehasonlítása volt, így az egyes években az aratás időpontjáig (január 1. és június 30.) vettük figyelembe a napi ET értékeket. Kajászón a 2021-es év első felében hiányos/hibás volt a mérés, így ezt az időszakot kihagytuk az elemzési folyamat során.

A legmagasabb napi ET érték Bugac esetén $5,43 \text{ mm nap}^{-1}$ (2020), Kajászó esetén pedig $6,15 \text{ mm nap}^{-1}$ (2019) volt. A szántóföldi növények



3. ábra. A napi ET lehetséges értékei (mm nap^{-1}) Bugac (gyepes terület) esetén a 2019–2022 közötti időszakban. Az intervallumba eső vonal a Bowen-arány megőrző módszer eredménye.



4. ábra. A napi ET lehetséges értékei (mm nap⁻¹) Kajászó (szántóföld) esetén a 2019–2022 közötti időszakban. Az intervallumba eső vonal a Bowen-arány megőrző módszer eredménye.

	2019	2020	2021	2022
A legnagyobb napi ET érték (mm nap ⁻¹)				
Bugac	5,41	5,43	4,82	4,10
Kajászó	6,15	4,51	-	4,69
A maximális különbség a lehető legnagyobb és legkisebb napi ET érték között (mm nap ⁻¹)				
Bugac	1,91	1,62	1,59	1,78
Kajászó	2,71	2,63	-	2,46
A legnagyobb ET összeg (mm)				
Bugac	259	255	266	258
Kajászó	372	334	-	322
A legkisebb ET összeg (mm)				
Bugac	161	177	210	169
Kajászó	184	146	-	145
Csapadékösszeg (mm)				
Bugac	305	262	192	151
Kajászó	273	175	198	184

2. táblázat. Bugac (gyepes terület) és Kajászó (szántóföld) összehasonlítását segítő számszerűsített eredmények. Az eredmények az egyes évek január 1. és június 30. közötti időszakainak korrigált értékeire vonatkoznak.

esetén összességében magasabb napi ET értékeket kaptunk, azonban a napi ET lehetséges értékei is nagyobb tartományban ingadoznak. Kajászón az évi legnagyobb napi eltérések meghaladták a 2,5 mm nap⁻¹ mértékét, ezzel szemben a bugaci gyeptek tekintve ezek az eltérések nem érték el a 2 mm nap⁻¹ értéket. A napi eltérésekből kiindulva a vizsgált időszakra számított ET összegek is a szántóföldi növények esetén mutatnak nagyobb bizonytalanságot. Az őszi búza például 2022-ben minimum 145 mm-t, maximum 322 mm-t párologtatott; a gyepekre számított legkisebb ET összeg 169 mm, a legnagyobb pedig 258 mm volt 2022-ben.

Az ET értékét nagyban befolyásolja továbbá a rendelkezésre álló vízmennyiség, amit a csapadék mennyisége alapvetően meghatároz. Emiatt az ET mellett számszerűsítettük még a meteorológiai változóknak a napi értékeit is. Az eredmények alapján a 2019-es év jóval csapadékosabb volt a későbbi évekhez viszonyítva. Valószínűleg ebből kifolyólag az ET értékek 2019-ben voltak a legmagasabbak, főként a szántóföldi növényeket tekintve.

Említésre méltó a különböző módszerekkel korrigált ET értékek közötti eltérés. Az eredmények azt sugallják, hogy igen nagy bizonytalansággal becsülhető az ET az EK mérések alapján, és hogy igen nagy szükség lenne egy elfogadott, a kutatói közösség által támogatott korrekciós módszerre, ami csökkenti a bizonytalanságot.

Összefoglalás

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 az ET meghatározható. Mivel azonban az EK mérések esetén sokszor felmerül az energiamérleg lezárásának problémája, ezért az ET meghatározása előtt korrekcióra van szükség. Tekintve a szakmai konszenzus hiányát a korrekció kapcsán, ebben a tanulmányban úgy korrigáltuk a hőáramokat, hogy megkapjuk napi szinten a lehető legkisebb és legnagyobb ET értékeket, amit a hozzáférhető energiamennyiség korlátozott.

Az itt bemutatott kutatáshoz felhasznált adatokat két EK mérőtorony szolgáltatotta, melyek gyepes terület (Bugac) és szántóföld (Kajászó) felett lettek telepítve. A számítások során a 2019–2022 közötti időszakra fókuszáltunk. Az eredmények alapján a szántóföldi növények esetén nagyobb a bizonytalanság, akár a 2,5 mm nap⁻¹-t is meghaladhatja a lehető legmagasabb

és legalacsonyabb értékek közötti eltérés napi szinten. Az ET értékeinek napi szintű lehetséges tartománya segíti az eredményeket felhasználó modellek validálását és optimalizálását.

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.

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 a HUN-REN-MATE Agroökológia Kutatócsoport támogatásával valósultak meg.

Irodalom

- 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. *Glob. Change Biol.* 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: Chem. Phys. Meteorol.* 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.
- Bonan, G., 2002: Ecological Climatology. Concepts and applications. Cambridge University Press, Cambridge.
[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 J.* 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. *Agric. Water Manage.* 98, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.001>
- Durand, P., 2022: A Possible Reconciliation between Eddy Covariance Fluxes and Surface Energy Balance Closure. *Atmosphere* 13, 1965. <https://doi.org/10.3390/atmos13121965>
- Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, G., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grunwald, T., Hollinger, D., Jensen, N.O., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A., Lai, C.T., Law, B.E., Meyers, T., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J.W., Pilegaard, K., Rannik, U., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S., 2001: Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agric. Forest Meteorol.* 107, 71–77. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00235-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00235-5)
- 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. *Ecol. Appl.* 18, 1351–1367.
<https://doi.org/10.1890/06-0922.1>
- Gandhi, A; Gyöngyösi, A Z; Tordai, Á V; Torma, P; Rehák, A; Szilágyi, M; Horváth, Á; Weidinger, T., 2018: Micro-meteorological measurements of foggy situations in Siójut (November – December, 2018), *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, <https://doi.org/10.31852/EMF.33.2020.040.047>
- Goodman, L.A., 1960: On the exact variance of products. *J. Amer. Stat. Assoc.* 55, 708–713.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1960.10483369>
- Incze, D., Barcza, Z., Pintér, K., Nagy, Z., Balogh, J., Fodor, N., Haszpra, L., 2023: Eddy-kovariancia alapú evapotranspiráció mérések összehasonlító elemzése. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 35.

- 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, 1091–1106. <https://doi.org/10.1111/fwb.13903>
- Kiss, M; Torma, P., 2014: Sekély tavi energiaáramok fluxus gradiens eljárás alapú becslése örvény-kovariancia mérésekből. *Hidrológiai Közlöny* 94(4), 48–56.
- Kiss, M; Józsa, J., 2014: A Fertő tó energiaháztartásának meghatározása örvény-kovariancia módszerrel. *Hidrológiai Közlöny* 94(4), 38–47.
- Kiss, M; Józsa, J., 2015: Wind profile and shear stress at reed-open water interface: recent research achievements in Lake Fertő. *Pollack Periodica*, 10(2),107–122.
- 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. *J. Geophys. Res.* 111, D21S90. <https://doi.org/10.1029/2005JD006932>
- Lükő, G; Torma, P; Weidinger, T; Krámer, T., 2021: Hullámszás módosított turbulens impulzusáram mérése és becslése a Balaton léghör-víz határfelületén. *Hidrológiai Közlöny* 101, 52–60.
- Lükő, G, Torma, P; Weidinger, T; Krámer, T., 2022: Air-lake momentum and heat exchange in very young waves using energy and water budget closure. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 127(12), e2021JD036099.
- 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. *Amer. Soc. Agric. Biol. Engin.* 57, 499–515. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10433>
- Mauder, M., Foken, T., Cuxart, J., 2020: Surface-energy-balance closure over land: A review. *Bound.-Lay. Meteorol.* 177, 395–426. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00529-6>
- 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. *Agric. Ecosyst. Environ.* 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: (ed. Haszpra, L.) *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. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24, 1485–1509. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-409>
- Pintér, K., Nagy, Z., 2022: Building a UAV Based System to Acquire High Spatial Resolution Thermal Imagery for Energy Balance Modelling. *Sensors* 22, 3251. <https://doi.org/10.3390/s22093251>
- Salavec, P et al., 2017. Repülést veszélyeztető mikroskálájú léghöri jelenségek a 2015-ös szegedi planetáris határréteg-mérési adatsorokban. *Repüléstudományi Közl.* 29, 379–400.
- Stisen, S., Soltani, M., Mendiguren, G., Langkilde, H., Garcia, M., Koch, J., 2021: Spatial Patterns in Actual Evapotranspiration Climatologies for Europe. *Remote Sens.* 13, 2410. <https://doi.org/10.3390/rs13122410>
- Stull, R.B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- 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. *Agric. Forest Meteorol.* 103, 279–300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00123-4)
- Verma, S.B., Dobermann, A., Cassman, K.G., Walters, D.T., Knops, J.M., Arkebauer, T.J., Suyker, A.E., Burba, G.G., Amos, B., Yang, H., 2005: Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maizebased agroecosystems. *Agric. Forest Meteorol.* 131, 77–96. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.05.003>
- 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>