

Válasz Dr. Anda Angéla MTA doktora opponensi véleményére

Mindenekelőtt megköszönöm Opponensemnek, hogy vállalta a dolgozatom bírálatát, gondosan átolvasta azt, és alapos opponensi véleményt készített. Különösen nagyra értékelem, hogy Professzor Asszony számos pontos és építő jellegű, hasznos kritikai észrevételt fogalmazott meg, segítve ezzel további tudományos munkámat. Természetesen hálásan köszönöm az értekezésemhez kapcsolódó pozitív megállapításait is. Az alábbiakban az opponensi véleményben szereplő észrevételekre, kritikákra és kérdésekre részletesen reagálok.

Opponensem teljesen jogosan mutatott rá arra, hogy a Rövidítések jegyzékében nem szerepel minden, a szövegben használt rövidítés. Valóban előfordult, hogy néhány rövidítést nem tüntettem fel a jegyzékben, mentségemül szolgálhat talán, hogy némelyik rövidítés vagy mozaikszó annyira a szakmai nyelv része lett, hogy nem jutott eszembe ezeket ott szerepeltetni. A későbbiekben körültekintőbben fogok eljárni hasonló jegyzék összeállításakor. A szövegben tudatosan nem csak a rövidítéseket és mozaikszavakat használtam, mert véleményem szerint az jelentősen rontja az olvashatóságot, bár igaz, hogy a terjedelem szempontjából kedvező. Próbáltam egy elfogadható egyensúlyt találni a kettő között.

Elfogadom Professzor Asszony észrevételét, miszerint a disszertáció tagolása nem a tudományos publikációkban megszokott szerkezetű. Komoly fejtörést okozott a dolgozat írása közben, hogy milyen szerkezetben mutassam be eredményeimet, hiszen hosszú időszak különböző kísérleteiből összegyűjtött nagyszámú adatot dolgoztam fel. A kísérletek különbözősége és az elemzések komplexitása ellenére megpróbáltam egy általam logikusnak tartott vonal mentén felépíteni a mondanivalómat, bár így a szerkezet némileg eltér a szokásos konvencióktól.

Köszönöm Opponensem hasznos észrevételét, hogy időnként az angol nyelvű szakirodalomból közvetlenül átvett szakkifejezéseket használtam, ahelyett, hogy a magyar nyelvű szakirodalomban már meghonosodott fogalmakat alkalmaztam volna. Munkám során kifejezetten próbáltam figyelni a magyar szakkifejezések használatára, gondot okozott azonban, hogy azok sok esetben nem teljesen kiforrottak és egyértelműek, és különböző változatokban találkozhatunk velük a magyar szakirodalomban. Ehhez nyilván az is hozzájárul, hogy a kutatási eredményeinket túlnyomó többségben angol nyelven kell publikálnunk az elvárások szerint, így a magyar terminológia lassabban stabilizálódik. A további munkám során, a magyar nyelvű szövegekben következetesen a magyar szakkifejezéseket fogom használni: pl. sztómaellenállás, sztóma vezetőképeség, telítési hiány. Ezzel nemcsak a terminológiai egységességet erősítem, hanem a hazai szakmai közönség számára is könnyebben befogadhatóvá válik a szöveg.

Jogos észrevétel, hogy „A szövegből hiányzott az egyenletek számozása, így problémás lehet visszaautalni rájuk.” Valóban, az egyenletek számozása lehetővé tette volna, hogy a szövegben egyértelműen hivatkozni lehessen rájuk, és megkönnyítette volna az értekezés követhetőségét.

Az irodalmi áttekintéssel kapcsolatban elismerem, hogy a hőmérsékleti differencia elméleti és gyakorlati hátterét nem részleteztem kellő mértékben. A fejezet elsősorban a vízellátottságot és az éghajlati tényezők hatásait tárgyalta, különösen az aszály és a fotoszintetikus aktivitás összefüggéseit. A hőmérsékleti különbség vizsgálata implicit módon szerepelt, több forrás alapján, azonban explicit részletezése háttérben maradt. Ugyanakkor az Eredmények fejezetben bemutatott mérések rávilágítanak a hőmérsékleti differencia jelentőségére, így az összefüggés a dolgozat egészének értelmezésében mégis világosan megjelenik.

Opponensem helytállóan állapította meg, hogy a módszertani fejezet nem minden elemében részletezi a kísérletek pontos leírását, több esetben rövidített bemutatást alkalmaztam, amely azonban valóban nem mindenhol nyújtott elég részletet. Ennek oka elsősorban a dolgozat terjedelmi korlátja volt. A hosszú időszakot átfogó, és számos különböző kísérlet eredményeit feldolgozó értekezés terjedelme sajnos nem tette lehetővé, hogy részletesebben kitérjek mindegyik kísérlet esetében az alkalmazott kezelések, mérések pontos leírására, a meteorológiai adatok bemutatására és a mérések módszertanára. Az egyes kísérletekben alkalmazott genotípusok akár rövid leírására sem volt lehetőségem, hiszen a számuk meghaladta a 40-et. Az értekezésben bemutatott kísérletek jelentős részéből korábban már készült publikáció, ahol a módszertani háttér megtalálható. A dolgozat célja a hosszú távú kutatási eredmények új szempontú, a vízfelhasználás hatékonyságát előtérbe helyező, átfogó és integrált feldolgozása és bemutatása volt, ezért a módszertani részletek közlését sok esetben a hivatkozott irodalom biztosítja. Elfogadom Professzor Asszony észrevételét, hogy az itt található irodalmi felsorolás nem teljeskörű, és jobb lett volna kicsit több információt a dolgozatban megjeleníteni.

A klímakamrás kukorica kísérletben két kontrollt használtam. A negatív kontroll normál vízellátást kapott (100 ml/edény 2 naponta), a pozitív kontroll csökkentett vízmennyiséget (50 ml/edény 2 naponta) és a növények a vízstressz tüneteit mutatták. A „DEV0085” egy fejlesztés alatt levő termék, tartalmaz MTU-t (1-(2-Methoxyethyl)-3-(1,2,3-thiadiazol-5yl) urea) és pidolinsavat, de a pontos összetétele számomra nem ismert, a kutatás az Intracrop Ltd (UK) megbízásából zajlott.

Elfogadom Opponensem véleményét, amikor a CO₂ mérések módszertani hátterét hiányolta. A dolgozatban bemutatott vizsgálatok során a méréseket a Debreceni Egyetem, Agrár Kutatóintézetek és Tangazdaság, Látóképi Növénytermesztési Kísérleti Telepén, a

Debreceni Bemutatókert és Arborétum területén és a Nyíregyházi Kutató Intézet kontrollált klímakamrájában végeztem.

Az asszimilációs vizsgálatokat ép leveleken végeztük 1999-2018 között a LI-6400, 2019-2024 között a LI-6800 (LI-COR, USA) hordozható fotoszintézis rendszer segítségével. A rendszer két nagy pontosságú infravörös gázelemzővel rendelkezik, amelyekkel a levegőben található CO₂ és H₂O moláris frakciója mérhető. A CO₂ (μmol mol⁻¹) és H₂O (mmol mol⁻¹) bemeneti és kimeneti értékeinek, a levél hőmérsékletének (°C), a légköri nyomásnak (kPa), az áramlási sebességnek (μmol s⁻¹) és más mért paramétereknek a segítségével a műszer kiszámítja a nettó asszimilációt, a transzspirációt, a sztóma vezetőképességet, az intercelluláris CO₂-koncentrációt és más fiziológiai paramétereket. A mintakamrába beépített LED panel segítségével szabályoztuk a megvilágítást a mérések alatt, 1500 μmol foton m⁻² s⁻¹ PAR-t használtunk, 90% vörös (625 nm) és 10% kék (475 nm) fénnel. A fénygörbék felvételénél a fényintenzitás 20 μmol foton m⁻² s⁻¹ és 2000 μmol foton m⁻² s⁻¹ között változott kilenc lépcsőben. A műszer minden egyes mérésakor rögzíti a bemenő CO₂ szintet is, így hosszú adatsor állt rendelkezésemre. A légköri CO₂ szint változásához a debreceni mérések (4032 Debrecen, Böszörményi út 138.) eredményeit használtam fel.

Természetesen ezek a mérések városi környezetben, növényállományban történtek és pontszerűek a tenyészedőszakban, így elfogadom Opponensem észrevételét, hogy a globális háttérszennyezés értékével közvetlenül nem összevethetők, esetleg valamilyen korrekciós eljárást lehetett volna alkalmazni. A lokális és a globális háttérértékek összevetése nyilvánvaló módszertani korlátokat rejt, azonban a célom elsődlegesen a 25 évet átfogó, saját mérésekből származó adatsor felhasználásával a trendek és a folyamatok érzékeltetése volt, mert a növények fotoszintézis folyamatait és a vízfelhasználás hatékonyságát is jelentősen befolyásolja a levegő CO₂-szintje. Az összevetéshez a NOAA Global Monitoring Laboratory Mauna Loa Observatórium adatsorát használtam, mivel ez a leghosszabb folyamatos mérés, de a regionális összehasonlíthatóság érdekében a Hegyhátsál, K-pusztá és más európai mérőállomások adatait is be fogom vonni. Ezzel pontosabb képet kaphatunk a helyi mérések és a globális trendek összevetéséről.

Egyetértek Opponensemvel, hogy az évjárat kategóriákba több év bevonásával készített elemzések erősebb alapot adnának az általánosításokra. A dolgozatban bemutatott példák reprezentatív évek kiválasztásán alapultak, amelyek megmutatták a szélsőséges és átlagos időjárási helyzetek hatását a vizsgált növények fotoszintézisére és vízfelhasználására.

A párolgási számításokat és a különböző aszályindexeket csupán abból a célból alkalmaztam a dolgozat írása során, hogy a különböző évjáratokat tudjam valahogy jellemezni növénytermesztési szempontból, és konkrét számok felhasználásával tudjam azokat kategóriákba sorolni. Úgy gondolom, hogy a számítások hozzájárulhatnak a következtetések megbízhatóságának javításához, és enélkül a következtetések nem eléggé

megalapozottak. A hosszú távú vizsgálatok összessége megerősíti, hogy a kiválasztott évjáratok megfelelően szemléltették a jellemző tendenciákat. A dolgozatban bemutatott példák mellett a jövőben terveim között szerepel, hogy az aszályos, csapadékos és átlagos évek eredményeit összevontan vizsgáljam, ezáltal a következtetések még általánosíthatóbbak lesznek. Az Opponens észrevételét a további kutatásaimban mindenképpen figyelembe veszem.

Az opponensi kérdésekre adott válaszok

1. kérdés: „Mekkora oázishatással számolt a párolgásnál, s mitől függött ez az érték?”

Az oázishatás olyan lokális mikroklimatológiai jelenség, amikor egy zöld (öntözött vagy természetes) folt környezete fölött az evapotranszspiráció (ET) jelentősen nagyobb, és ez helyi hűtést, megnövekedett páratartalmat és eltérő hőmérséklet-profilokat hoz létre a környező szárazabb területekhez képest. A mezőgazdasági gyakorlatban ezt úgy érzékeljük, hogy egy izolált, jó vízellátottságú tábla (vagy vízfelület) egységnyi területre vetített ET-je meghaladhatja a standard referencia-ET-t (ET_o). Az oázishatás valójában a mezőgazdasági táj heterogenitásának kifejeződése az evapotranszspirációban — figyelmen kívül hagyása hibás vízszükséglet-becslésekhez vezethet. Növényborítás és zöldtömeg, a lombkorona zártsága, a terület albedója, a telítési hiány (VPD) jelentősen befolyásolhatja az oázishatás mértékét. A számításokban való alkalmazásakor a nemzetközi ajánlásokat (Allen et al., 1998; Hao et al., 2016) érdemes követni, de a magyar viszonyok között nélkülözhetetlen a helyi mérésekre épülő korrekció. A hazai kutatások hangsúlyozzák a helyi kalibráció szükségességét. A potenciális evapotranszspiráció számításánál Szász (1997) módszerét alkalmaztam, melynél az oázishatás figyelembe vétele 0,85-ös szorzóval történik. A hivatkozott publikáció illetve Szász Gábor professzor úr szóbeli közlése alapján ez az érték ajánlható az Alföld térségére, a nyári időszakra vonatkozó számításokhoz.

2. **Kérdés:** „A párolgást két eljárással is számszerűsítette a disszertáció. Volt egy számolt evapotranszspiráció (Szász és Antal eljárásai alapján) és egy mért transzspiráció. Nézte-e a kettő kapcsolatát nagyságrendileg záródott állományban, ahol a mért transzspirációhoz képest az evaporáció 10% alatti, s ez az összevetés megtehető?”

Professzor Asszony jogos észrevétele, hogy a számított evapotranszspiráció és a mért transzspiráció kapcsolatának vizsgálata nagyságrendileg záródott állományban értékes kiegészítése lehetett volna a dolgozatnak. Ezt az összevetést a kutatás során nem végeztem el, így erre vonatkozó eredményeket nem tudok bemutatni. Ugyanakkor a felvetést nagyon hasznosnak tartom, és a további munkám során mindenképpen meg fogom vizsgálni a két

paraméter kapcsolatát, mivel további fontos összefüggéseket tárhat fel a növényállomány vízháztartásának pontosabb megértésében.

3. **Kérdés:** „Milyen lehetőségek vannak a növény- és léghőmérsékleti differencia vízellátottsági indexé alakítására, s kik voltak a módszer bevezetői?”

Válasz: A növényhőmérséklet és a léghőmérséklet különbségének ($T_c - T_a$) alkalmazását vízstressz-indikátorként klasszikus munkák vezették be: Idso és munkatársai (empirikus megközelítés) illetve Jackson és munkatársai (elméleti/energiaegyensúly alapú megközelítés) kulcsszerepet játszottak a Crop Water Stress Index (CWSI) kialakításában (Idso et al., 1981; Jackson et al., 1981; Idso, 1982; Jackson, 1982). A növény- és léghőmérséklet különbségéből származtatott indexek széles körben alkalmazott eszközök a növényi vízstressz vizsgálatára. Az alapját az adja, hogy a növényhőmérséklet és a léghőmérséklet különbsége közvetlen indikátora a növény vízellátottsági állapotának.

Számítási és mérési megközelítések

1. Empirikus (baseline) módszer — Idso és munkatársai (1981): a nem-vízhiányos (Lower-Limit, LL) kapcsolatot ($T_c - T_a$, VPD vagy napsugárzás függvényében) terepi mérésekből határozzák meg. A felső határ (Upper Limit, UL) tipikusan a minimális párolgással/maximum hőmérséklettel jellemezhető, vízhiányos állapotra adott érték (Payero és Irmak, 2006). A CWSI empirikus formája:
$$CWSI = ((T_c - T_a)_{\text{mért}} - (T_c - T_a)_{LL}) / ((T_c - T_a)_{UL} - (T_c - T_a)_{LL})$$
2. Elméleti (energiaegyensúly/fizikailag levezetett) módszer — Jackson és munkatársai (1981): a képlet a levelek energiamegmaradásán és a Penman-Monteith-típusú párolgás-számításon alapul. Elméleti határértékeket határoztak meg a lombzat - levegő hőmérsékletkülönbségére vonatkozóan, a légköri telítési hiányhoz (VPD) viszonyítva. E megközelítés elméleti UL/LL értékeket képes szolgáltatni, és kimutatta, hogy a CWSI egyenértékű a tényleges és potenciális evapotranszspiráció relatív arányával ($1 - TET/PET$).
3. Hibrid és egyszerűsített módszerek — a terepi költségek és adatkorlátok miatt ma elterjedtek a „hibrid” vagy egyszerűsített empirikus modellek, amelyek keverik a mérési és a fizikai elveket, illetve statisztikai vagy ML-alapú korrekciókat alkalmaznak a helyi feltételekhez. Ezeket több későbbi tanulmány vizsgálta és validálta (Gonzales-Dugo et al., 2014).
4. Műszeres és távérzékelési megoldások
A kézi infravörös hőmérők, illetve a LI-COR-típusú rendszerek pontszerű (levél vagy kis felület) mérésekre alkalmasak. Általában képesek A levélzet (T_c) és a

levegő (Ta) hőmérsékletének egyidejű rögzítésére akár laborban, akár szántóföldön (Alordzinu et al., 2021).

Hőkamerák, UAV és műholdas felvételek: nagyobb térbeli lefedettség, terepi heterogenitás mérhető; ehhez azonban korrekciók és fedettség/NDVI szerinti karakterizáció szükséges. Kutatások folynak UAV/MODIS/Landsat/ECOSTRESS felvételek adatain alapuló alkalmazásokkal kapcsolatosan (Jamshidi et al., 2021; Safdar et al., 2023).

Az empirikus és elméleti és ezek kombinációi közötti választás attól függ, milyen adatok állnak rendelkezésre (pontmérések vs. hőfelvételek), milyen pontosság kell, és milyen költségvetés áll rendelkezésre — a gyakorlatban ma gyakran a hibrid, UAV/hőképekkel kiegészített megoldások bizonyulnak a leggazdaságosabbnak és leginformatívabbnak.

Az általam használt műszer (Li-6400; Li-6800) kontakt hőmérővel közvetlenül méri a növény levelének hőmérsékletét, illetve rögzíti a bemenő levegő hőmérsékletét. Ebből a két adatból számoltam ki a különbséget, amely adat véleményem szerint jól mutatja a növény vízállapotát, mennyire hatékonyan képes hűteni a transzspirációval leveleit. Számomra logikusnak az tűnt, hogy a levegő hőmérsékletéből vonom ki a levél hőmérsékletét, így a negatív érték azt jelenti, hogy a transzspiráció hűtő hatása nem érvényesül teljes mértékben, feltehetően vízhiány következtében. Az így számított különbség közvetlen indikátora volt a növény vízellátottsági állapotának. Bár az egyes mérések nyilvánvalóan pontszerűnek tekinthetők, egy-egy kísérletben a nagyszámú mérési adat (pl. 36 parcellában 432 adat rögzítése minden paraméter esetében) összességében alkalmas lehet arra, hogy következtetni tudjunk a növények vízállapotára. Az eredményeink alapján megerősíthető, hogy a hőmérsékleti differencia jól alkalmazható eszköz a növények vízstressz helyzetének detektálására, és vizsgálataimban szoros kapcsolatot mutatott a fotoszintézis és a transzspiráció mértékével is.

Összegzőként ismételten köszönöm Professzor Asszony részletes, tárgyyszerű és építő szándékú észrevételeit. Nagy megtiszteltetés számomra, hogy Opponensem a disszertációban szereplő eredmények közül ötöt új tudományos eredményként ismer el, és támogatja a fokozat odaítélését.

Debrecen, 2025. szeptember 29.

Dr. Csajbók József
egyetemi tanár

Hivatkozott irodalom

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration — Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). FAO, Rome, Italy. ISBN 92-5-104219-5
- Alordzinu, K.E., Li, J., Lan, Y., Appiah, S.A., Al Aasmi, A., Wang, H. Rapid estimation of crop water stress index on tomato growth. *Sensors (Basel)*. (2021); 21(15):5142. doi: 10.3390/s21155142. PMID: 34372375; PMCID: PMC8347285.
- González-Dugo, V., Zarco-Tejada, P. J., Fereres, E. (2014). Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water stress in fruit trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198–199, 94–104.
- Hao, X., Li, W., Deng, H. (2016) The oasis effect and summer temperature rise in arid regions - case study in Tarim Basin. *Scientific Reports* 6, 35418 DOI: 10.1038/srep35418
- Idso S.B. (1982). Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting crop water stress. *Agricultural Meteorology*. 27(1):59–70
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45–55.
- Jackson, R.D. (1982). Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation*, 1, 43–85.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4), 1133–1138.
- Jamshidi, S., Zand-Parsa, S., Niyogi, D. (2020). Assessing Crop Water Stress Index of Citrus Using In-Situ Measurements, Landsat, and Sentinel-2 Data. *International Journal of Remote Sensing*, 42(5), 1893–1916. DOI:10.1080/01431161.2020.1846224
- Jones, H.G. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95, 139–149.
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y., Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49, 246–263.
- Payero, J.O., Irmak, S. (2006). Variable upper and lower crop water stress index baselines for corn and soybean. *Irrigation Science*, 25, 21–32. DOI: 10.1007/s00271-006-0031-2
- Safdar, M., Shahid, M.A., Sarwar, A., Rasul, F., Majeed, M.D., Sabir, R.M. (2023). Crop Water Stress Detection Using Remote Sensing Techniques. *Environmental Sciences Proceedings*, 25(1), 20. DOI: 10.3390/ECWS-7-14198
- Sepulcre-Cantó, G., Zarco-Tejada, P. J., Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Soriano, M. A., Fereres, E., & Vega, V. (2006). Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136, 31–44.
- Szász, G. A víz a légkörben, a talajban és a növényben. *Meteorológia mezőgazdáknek, kertészeknek, erdészeknek*. szerk. Szász G.-Tőkei L. Mezőgazda Kiadó, 1997, Budapest, 111–172.