

Válasz Prof. Dr. Simon László DSc, egyetemi tanár opponensi véleményére

Ezúton szeretném megköszönni Dr. Simon László Professzor Úrnak, hogy alaposan áttanulmányozta „A kukorica és napraforgó fotoszintézisét és vízfelhasználásuk hatékonyságát befolyásoló tényezők elemzése” című MTA doktori értekezésemet, és hogy részletes opponensi véleményében mind a dolgozat szerkezetét, mind az új tudományos eredményeket, mind pedig a kutatás aktualitását és jelentőségét értékelte. Külön köszönöm az elismerő szavakat a kutatások korszerű módszertanára, a vizsgálatok időszerűségére és külön köszönöm, hogy Professzor Úr az általam megfogalmazott valamennyi új tudományos eredményemet elfogadta.

Az Opponens által jelzett formai hiányosságokat (pl. rövidítésjegyzék hiányossága, az NDVI magyarázatának elmaradása, a helytelen földrajzi névhasználat, elütések, teljes mértékben elfogadom. Hasonlóan igaz ez az irodalomjegyzékben jelzett hibákra is, az angol címek nagybetű-használata, a fajnevek dőlt betűs kiemelése, valamint a helytelen névalakok. A későbbi munkáimban nagyobb figyelmet fordítok ezek elkerülésére, Opponensem jogos észrevételeit iránymutatásként fogom használni.

Professzor Úr joggal kifogásolta az angol nyelvű összefoglaló hiányát. A dolgozat írásakor elkészítettem az angol nyelvű összefoglalót is, de az előírt terjedelmi korlát miatt, mivel az Akadémiai doktori értekezés formai követelményei nem nyújtanak pontos útmutatást a dolgozat kötelező fejezeteire vonatkozóan, az angol nyelvű összefoglaló az értekezés végleges változatába nem került bele.

Hiányolta Opponensem annak leírását, hogy Debrecenben, a szabadföldi tenyészedenyes napraforgó kísérletet 2023-ban pontosan hol és milyen talajon állítottuk be. A 3.2.3. fejezetben szereplő szabadföldi tenyészedenyes kísérlet pontos helyszínének és talajtípusának megadása valóban hiányos volt. A 2023-ban beállított napraforgó kísérleteket a Debreceni Egyetem Böszörményi úti kampuszán (4032 Debrecen, Böszörményi út 138.) található Debreceni Bemutatókert és Arborétum kísérleti területen végeztük el, és az ott található mészlepedékes csernozjom talaj felső 20 cm-es rétegének felhasználásával töltöttük meg az edényeket.

Az opponensi véleményben megfogalmazott három konkrét kérdést az alábbiakban részletesen igyekeztem megválaszolni:

1. A levegőben lévő szén-dioxid-szint emelkedési ütemét illetően miért távoli mérőállomások (pl. Manua Loa, Hawaii, USA) adataival hasonlította össze saját mérési adatait, miért nem az európai (pl. Jungfraujoch, Svájc; Puy de Dôme, Franciaország; Monte Curcio, Olaszország) állomásokéival? Összevethetőek-e a magaslati vagy a tenger felett elhelyezkedő mérőállomások adatai az Ön által kb. 125 m-es tengerszint-feletti magasságban mért emelkedő széndioxid-koncentrációkkal? Hogyan alakultak az Ön által vizsgált időszakban a széndioxid-koncentrációk a szintén az Alföldön található K-pusztá (Kecskeméttől 70 km délkeletre, 127 m t.sz.f. magasságban elhelyezkedő) mérőhelyen?

A dolgozatban a Debrecenben mért CO₂-adatokat elsősorban azért a Mauna Loa (Hawaii, USA) mérőállomáson mért adatokhoz hasonlítottam, mert ez a mérőhely rendelkezik a világ

leghosszabb, folyamatosan gyűjtött adatsorával, amelyet a nemzetközi tudományos közösség standardként fogad el. Így az összevetés lehetőséget adott arra, hogy a debreceni helyi tendenciákat egy globálisan ismert bázishoz viszonyítsam. Ugyanakkor teljes mértékben jogos Professzor Úr felvetése, hogy a földrajzilag közelebb eső európai mérőállomások adatai releváns összehasonlítást nyújthatnak. Ennek megfelelően a kutatás folytatásában tervben van az elemzésbe európai állomások adatainak bevonása, hogy a regionális különbségek pontosabban érzékelhetők legyenek.

A K-pusztai mérőállomás (127 m tengerszint feletti magasság) adatai szintén alkalmasak a hazai összevetésre. Az eddig elérhető eredmények alapján az emelkedés tendenciája ott is jól kimutatható, és összhangban áll a debreceni mérésekkel. A disszertációban ezekre nem tértem ki részletesen, de a későbbi publikációkban igyekszem ezt pótolni.

Hozzá kell tennem, hogy a szén-dioxid mérések eredményeit csak kiegészítő információnak szántam az asszimilációs mérésekhez, nem ez volt a fő iránya a kutatásaimnak. A mérések városi környezetben, növényállományban és pontszerűen zajlottak a tenyészidőszak során. Az eredmények bemutatásának elsődleges célja az volt, hogy hosszú időszakot átfogó, saját mérési adatsorra támaszkodva érzékeltessem a változás trendjét, tekintettel arra, hogy a levegő szén-dioxid-koncentrációja a növények fotoszintézisét és vízfelhasználásuk hatékonyságát is jelentősen meghatározza.

2. Sztenderdizálta-e az egymást követő években beállított szabadföldi kísérleteiben méréseinek időszakait, napszakjait, időjárási körülményeit, törekedett-e arra pl., hogy az egymást követő hónapokban vagy években mérései azonos órákban vagy közel azonos felhősödési viszonyok között történjenek – hogy ezzel elkerülhetők legyenek pl. a levelek sztómazáródása miatti kialakuló mérési anomáliák?

Opponensem második kérdése jogosan mutat rá arra, hogy a fotoszintetikus paraméterek és a vízfelhasználási hatékonyság vizsgálatánál kiemelt fontosságú a mérések időpontjainak és körülményeinek standardizálása.

A növények asszimilációs folyamatait alapvetően befolyásolják a környezeti feltételek, például a hőmérséklet, fényintenzitás, vagy CO_2 szint. A fotoszintézis–hőmérséklet kapcsolatot különböző biokémiai folyamatok szabályozzák, amelyek mindegyike saját hőmérséklet-reakcióval rendelkezik. Ezek a folyamatok együttesen egy nettó fotoszintézis–hőmérséklet görbét eredményeznek, amelynek hőmérsékleti optimuma a fotoszintézis maximális sebessége.

A fotoszintézis és hőmérséklet összefüggése általában haranggörbe-szerű, és az optimális hőmérséklet fajra jellemző, ami felett a nettó asszimiláció gyorsan csökken. Ugyanakkor növények képesek akklimatizálódni a magas hőmérséklethez bizonyos korlátok között, és tartósan meleg növekedési körülmények között az optimális hőmérséklet eltolódhat fölfelé. A sztóma vezetőképesség általában nagy hatással van a fotoszintézisre, és gyakran csökken a magasabb hőmérséklettel járó nagy telítési-hiány (VPD) hatására.

A növények élettani folyamataival összefüggésben megfigyelhető diurnális ritmus is, vagyis a napszak hatása is észrevehető változást okoz a fotoszintézis folyamataiban. A napi ritmust részben a belső cirkadián óra is szabályozza, amely időzíti az asszimilációs folyamatokat is, így

a potenciális asszimilációs kapacitás napon belül is változik. A fotoszintézis természetesen erőteljesen függ a megvilágítás szintjétől, de a nap folyamán jellemző a maximális teljesítmény reggeli csúcsa, majd későbbi csökkenése („midday/afternoon depression” jelenség). Ez nem csupán a fény intenzitás változásának következménye, számos vizsgálat kimutatta, hogy a fotoszintetikus potenciál és a sztómavezérlés napi ritmust követ, ami faj- és életkörülmény-függő mintázatokat eredményez. (Suwannarut, 2023)

A gázcsere nyitása, záródása alapvető a CO₂ beáramlás és a vízvesztés szabályozásában. Reggel általában nő a sztóma vezetőképesség, ami elősegíti a CO₂-felvételt; később azonban hőmérséklet- és vízhiány-jelzések, illetve a cirkadián program hatására a sztómák részlegesen vagy akár teljesen záródhatnak, ami korlátozza az intercelluláris CO₂-szintet és csökkenti az asszimilációt. A sztóma kinetika (nyitás/zárás sebessége) jelentősen befolyásolja a napközbeni szénasszimiláció időbeli mintázatát (Matthews, 2017). A növény számára mindez víz-szén kompromisszumot jelent.

A szabadföldi kísérletek során minden évben arra törekedtünk, hogy a méréseket a nap azonos szakaszában végezzük, a reggeli órákban kezdtük, és a mérések számától függően a dél előtt befejeztük, amikor a levelek sztómazáródása még kevésbé valószínű. Az egymást követő években a vizsgálatok során így biztosítani tudtuk a nagyobb fokú összehasonlíthatóságot. Természetesen az időjárási tényezők (felhőzet, páratartalom, hőmérséklet) nem voltak teljes mértékben kontrollálhatók, azonban a mérések ismétlésével és a nagy mintaszám alkalmazásával igyekeztünk minimalizálni az ebből adódó anomáliákat. A klímaszobai és tenyészedényes kísérletekben a környezeti feltételek sztenderdizálása sokkal nagyobb mértékben megvalósult, így ezek a vizsgálatok kiegészítő és megerősítő szerepet játszottak a szabadföldi eredmények mellett. A megvilágítás szintje a mérőkamrában pontosan szabályozható, így stabil fényintenzitás mellett végeztük a méréseket.

3. Eredményei alapján milyen szántóföldi gyomfajok előretörését feltételezi a vízhiánnyal és a hőmérséklet-emelkedéssel összefüggésben a hazai kukorica és napraforgó kultúrákban?

Az értekezésben bemutatott vizsgálatok alapján a vízhiány és a hőmérséklet-emelkedés egyaránt kedvezhet bizonyos gyomnövények előretörésének a hazai kukorica- és napraforgó-kultúrákban. Eredményeim azt mutatták, hogy a C₄-es gyomok (pl. *Datura stramonium*, *Amaranthus retroflexus*, *Echinochloa crus-galli*) fotoszintetikus aktivitása szélsőséges vízhiányos körülmények között is versenyképes, sok esetben hatékonyabb, mint a kultúrnövényeké. A kakaslábfü különösen kiemelkedik a többi vizsgált növény közül, mert igen kicsi fényintenzitás mellett, praktikusán erőteljesen beárnyékol helyzetben is, illetve a teljes napsütésnek megfelelő, 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD megvilágítási szinten is meghaladta a nettó asszimilációs rátája a többi növényt.

Az említett C₄-es fajok mellett bizonyos szárazságtűrő C₃-as fajok (pl. *Xanthium italicum*, *Cirsium arvense*) is előnybe kerülhetnek, mivel a szélsőséges klimatikus körülményekhez való alkalmazkodóképességük meghaladja a jelenlegi fajösszetételben domináns gyomfajokét. Az általam nem vizsgált, de a vízellátottságtól függően a C₄/CAM fotoszintézis út közötti váltásra is képes (Moreno-Villena, et al., 2022), rendkívül szárazságtűrő *Portulaca oleracea* gyomnövény a szárazabbá váló régiókban jelentős kompetíciós előnnyel rendelkezik, és

véleményem szerint fokozott elterjedése valószínűsíthető a szántóföldi kultúrákban. A jövőben tehát a gyomflóra átrendeződésével kell számolnunk, amely a gyomszabályozás stratégiáját is új kihívások elé állítja.

Összességében nagyra értékelem Professzor Úr részletes, tárgyszerű észrevételeit és kérdéseit, amelyek hozzájárulnak a kutatási eredmények szélesebb körű értelmezéséhez. Az opponensi véleményben kiemelt pozitív értékelés – miszerint az értekezés megfelel az MTA doktora cím elnyeréséhez szükséges tudományos követelményeknek, és az új tudományos eredmények elfogadhatók – számomra különösen megtisztelő. Végezetül még egyszer megköszönöm Opponensem munkáját és támogató javaslatát a cím odaítélésére, bízom benne, hogy a nyilvános vitán a felvetett kérdések további tudományos eszmecserére adnak lehetőséget, hozzájárulva a téma szélesebb körű megvitatásához.

Debrecen, 2025. szeptember 23.



Dr. Csajbók József
egyetemi tanár

Felhasznált irodalom

Matthews J.S.A., Vialet-Chabrand S.R.M., Lawson T. Diurnal variation in gas exchange: the balance between carbon fixation and water loss. *Plant Physiol.* 2017;174(2):614-623. DOI: 10.1104/pp.17.00152. Epub 2017 Apr 17. PMID: 28416704; PMCID: PMC5462061.

Moreno-Villena, J.J., Zhou, H., Gilman, I.S., Tausta, S.L., Cheung, C.Y.M., Edwards, E. Spatial resolution of an integrated C₄+CAM photosynthetic metabolism. *Science Advances*, 2022; 8(31), eabn2349(2022). DOI: 10.1126/sciadv.abn2349

Suwannarut, W., Vialet-Chabrand, S.R.M., Kaiser, E. Diurnal decline in photosynthesis and stomatal conductance in several tropical species. *Frontiers in Plant Science*, Vol. 14 – 2023, DOI: 10.3389/fpls.2023.1273802