

A TROPOSZFÉRIKUS ÓZON ÜLEPEDÉSI SEBESSÉGÉT MEGHATÁROZÓ TÉNYEZŐK MODELLEZÉSE MEZŐGAZDASÁGI NÖVÉNYÁLLOMÁNYOKRA

Gula Miklós , Mészáros Róbert 

ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,
Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A
e-mail: miklosgula@gmail.com; meszaros.robert@ttk.elte.hu

Bevezetés

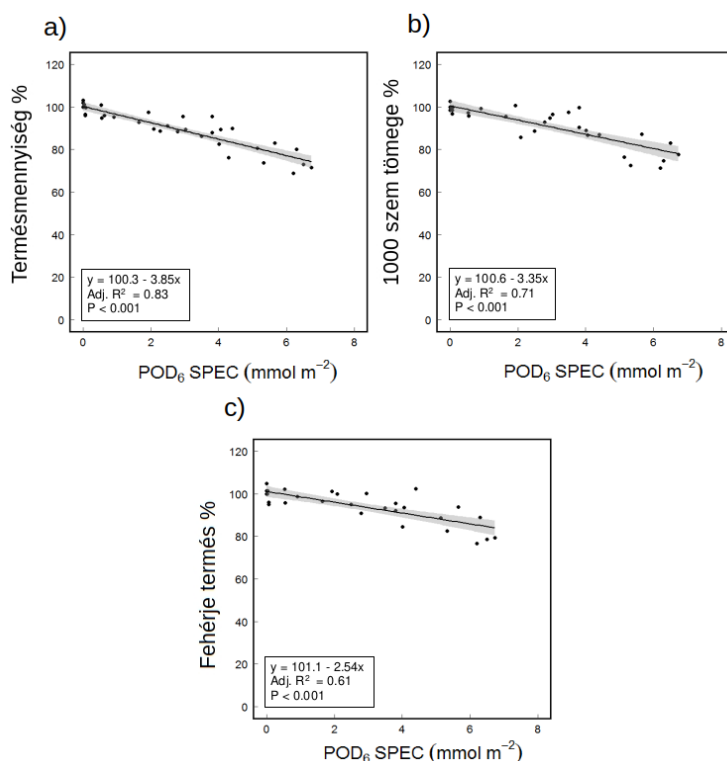
A troposzférikus ózon (O_3) másodlagos légszennyezőként van jelen a felszín közelében, fotokémiai úton az ipari és közlekedési légszennyezésből származó prekursor vegyületekből keletkezik. Az alacsony szintű ózonszennyezés oxidáló hatása miatt károsítja az élő szervezeteket, mezőgazdasági növényállományban a biológiai produktivitás, és ezáltal a termésmennyiség csökkenését okozhatja. A terméskiesés az ózonüledés fluxusával becsülhető. Kutatásunk során célunk, hogy a *FORESEE* klímaadatbázis, és más klímaadatbázisok felhasználásával hosszú távon, az adatbázisok múltra vonatkozó adataiból, és a jövőre megadott projekciókból kiszámoljuk a becsült ózonfluxust Magyarország területén, mezőgazdasági növényállományokon. Ehhez a növényállományon az ózon száraz üledését egy ellenálláshálózat modellel írjuk le. Célunk, hogy meghatározzuk, hogy melyik befolyásoló tényezők a legfontosabbak a fluxus modellezése során, és hogy az adatbázisok pontatlanságai mekkora bizonytalanságot okoznak a terméskiesés becslésében, illetve melyek azok a tényezők, amelyek nagyobb súllyal befolyásolják a becslést.

A felszínközeli ózon száraz üledése növényeken

Az ózon a felszín közelében a nitrogén-dioxidból (NO_2) keletkezik fotokémiai úton, további prekursor légszennyező vegyületek, mint például metán (CH_4), szén-monoxid (CO), illetve nem metán szénhidrogének jelenlétében. Az ipari és a városi közlekedési légszennyezés prekursorokban gazdag kémiai környezetében, ha a $\lambda < 420$ nm hullámhossztartományba eső napsugárzás kellően nagy intenzitású, nagy mennyiségben tud keletkezni ózon, de a szennyező források közvetlen közelében a nitrogén-monoxid (NO) jelenlétében az O_3 gyorsan el is reagál. Ha azonban a szennyezett levegő a forrás közvetlen közeléből elsodródik (például egy város közlekedési szennyezéssel szennyezett területéről a külvárosba és a környező vidéki területekre), akkor a reaktív NO tartalom addigra elreagál, és magasabb ózontartalom jelenléte válik lehetővé (Lagzi et al., 2013). A növények szervezetében az ózon elsősorban a gázcsere nyílásokon behatolva fejt ki oxidáló hatását, a levél mezofill rétegében. A keletkező vegyületek sejtpusztulást (nekrózis) okoznak a levélben, anyagcserezavarokat és stresszhormonok felszabadulását, ami a növekedés és az elsődleges produktivitás (és így a termésmennyiség) csökkenését jelenti (Emberson et al., 2018).

Az UNECE-LRTAP¹ leírása szerint a növényállományokon végzett mérések sorozata azt mutatja, hogy lineáris összefüggés áll fenn a produktivitás csökkenése és a gázcsere nyílásokon a céldőszak során kiüledett ózon kumulatív fluxusa között (lásd: 1. ábra; Pleijel et al., 2007; LRTAP, 2017).

¹ UNECE-LRTAP (United Nations Economic Commission for Europe - Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution) – A nagy távolságra jutó, országhatárokon áttérjedő légszennyezőkről szóló egyezmény



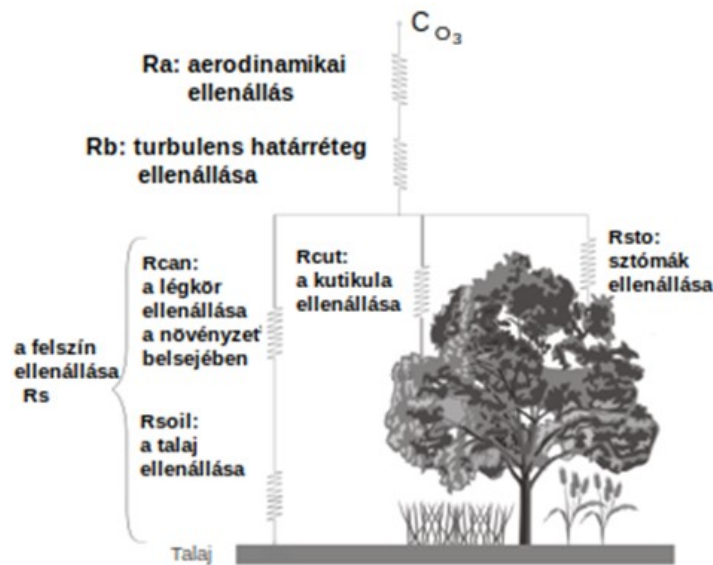
1. ábra: Lineáris kapcsolat a kumulatív ózonfluxus (POD_6SPEC : a napi ózon fluxus összege, ha a napi fluxus a 6 nmol/m^2 küszöbérték felett van) és a búza termésmennyiségének csökkenése között (100%: termésmennyiség ózonfluxus nélkül); a) összes termésmennyiség b) 1000 szem tömege c) termés tömege, csak a fehérjetartalom. Forrás: LRTAP (2017).

Felhasznált modellek

Az UNECE-LRTAP ICP program és az EMEP² protokoll az ózonterhelés mértékének becslésére és a kritikus szennyezési szintek megállapítására a DO_3SE (Deposition of Ozone for Stomatal Exchange – Ózon ülepedése sztómán keresztül gázcsere során) modellt használja (LRTAP, 2017), amely modell az ülepedést az ellenálláshálózat modellel számolja.

Az ellenálláshálózat modellben az ülepedési sebesség (teljes fluxus és a légköri koncentráció hányadosa) az elektromos áramkörökből ismert integrális Ohm-törvénnyel analóg módon képzelendő el, ahol a felszín különböző rétegeinek vezetőképessége (az ülepedési sebesség abszolút értéke) különböző részrendszerek ellenállásából számolható, hasonlóan ahhoz, ahogy az eredő ellenállás, illetve annak reciproka, az eredő vezetőképesség számolandó az elektromos áramkörökben. A DO_3SE modellben az ülepedést leíró részrendszerek a légkör turbulens felszíni rétege a növényzet felett, a kvázilamináris határréteg, a növényzetben a turbulens levegő ellenállása, a talaj ellenállása, a növény ellenállása a gázcsere nyílásokon (sztómákon) keresztül, illetve a sztómákon kívül (2. ábra). A sorba kötött elemek ellenállásai összeadódnak, a párhuzamosan kötött ellenállásoknak pedig a reciprocai, a vezetőképességek (ülepedési sebességek) adódnak össze.

² EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme)– A nagy távolságra jutó légszennyező anyagok megfigyelésére és értékelésére létrehozott Európai Együttműködési Program



2. ábra: A felszínközeli ózon száraz ülepedésének ellenálláshálózata a DO₃SE modellben.

Forrás: [1 – Stockholm Environment Institute].

Általánosan szólva a sztómák vezetőképessége a növény fiziológiai állapotától függ, amit a következő összefüggéssel veszünk figyelembe:

$$g_{sto} = g_{max} \min(f_{phen}; f_{O_3}) f_{light} \max(f_{min}; f_{temp} f_{VPD} f_{SW}),$$

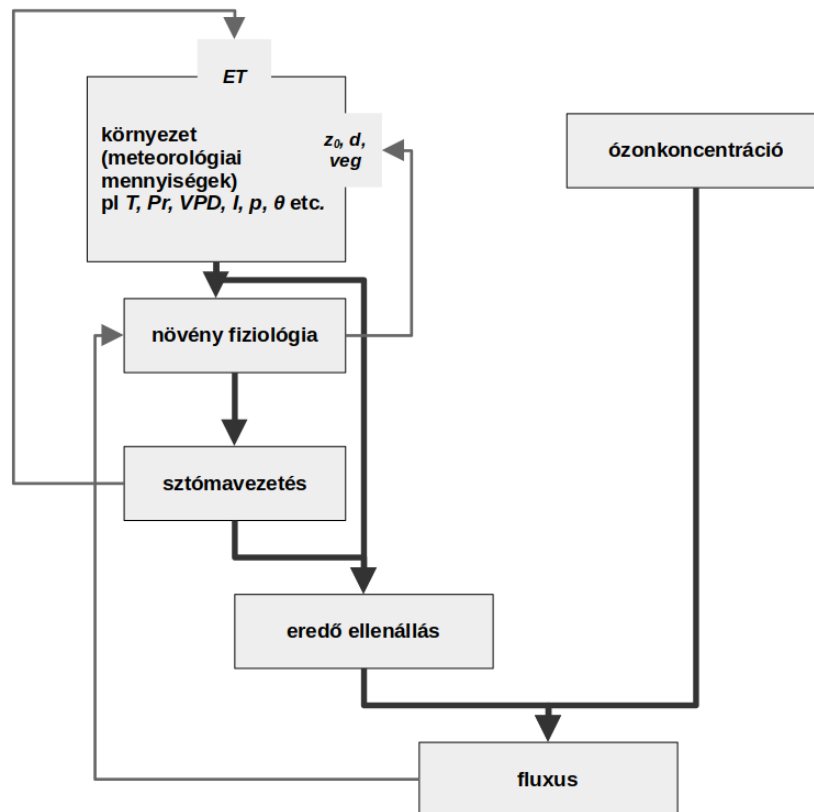
ahol f_{phen} , f_{O_3} , f_{light} , f_{temp} , f_{VPD} , f_{SW} , rendre a növény fenofázisát (adott növényre jellemző paraméter), az ózon kumulatív károsító hatását, a napsugárzást, a hőmérsékletet, a levegő nedvességtartalmát és a talajban a növény számára rendelkezésre álló hasznosítható vízmennyiség hatását leíró stresszfaktor, mindegyik 0 és 1 közötti szám; f_{min} , és g_{max} pedig a növényre jellemző empirikus paraméterek, így minden esetben $0 < g_{sto} \leq g_{max}$ (Jarvis, 1976). Mind vízgőzre, mint az ózon ülepedésére a sztómák vezetése hasonlóan számolandó, a két anyag között egy állandó szorzóval teszünk különbséget (Grünhage et al., 2012; LRTAP, 2017). A fluxus számításához a DO₃SE modellben szükségünk van továbbá a légköri ózonkoncentrációra, a kvázilamináris határreteg ellenállására és a növény sztómán kívüli ellenállására. A terméskiesés becsülhető a fluxus kiszámítása után, a POD_6 mennyiséggel. Az ózon kumulatív károsító hatása is hasonlóan határozható meg, búza esetében a POD_6 , burgonya esetén az AOT_0 mennyiségből. A POD_Y (Phytotoxic O_3 Dose) a tenyészidőszak elejétől kezdve a nappali órákra az Y küszöbértéket ($nmol/m^2s$) meghaladó órás átlag ózonfluxus és a küszöbérték különbségeinek összege, az AOT_X mennyiség a tenyészidőszakban a nappali órákra az X küszöbértéket (ppb) meghaladó órás átlag ózonkoncentráció és a küszöbérték különbségeinek összege (LRTAP, 2017).

Az ózonkár hosszú távú trendjeinek követéséhez tehát két tényezőnek, a felszínközeli ózonkoncentrációnak, illetve a sztómavezetésnek (továbbá az f_{O_3} faktoron keresztül a kettő kapcsolatának) a változását kell tekintenünk. A környezeti tényezők változása a faktorok változásának együttes hatásán keresztül érvényesül. Ehhez szükségünk van a globálsugárzás, a léghőmérséklet, a gőznyomás-hiány (VPD , vapour pressure deficit) és a talajnedvesség, vagy ezekkel ekvivalens mennyiségek (például VPD helyett relatív páratartalom vagy harmatpont hőmérséklet) adataihoz. Ezen kívül a fluxus számításához a szélesebbesre is szükség van. A talajnedvesség becsülhető a napi csapadékösszeg, a csapadék intercepciója (a növényzet felületén felfogott víz mennyisége) és a napi evapotranszpiráció (az összes párolgás és növényi

párologtatás összege) mennyiségével. Természetesen az adott növényállomány fenofázisa, fiziológiai állapota (amely a környezeti tényezők és az ózonkár függvénye) erősen befolyásolja a helyi intercepció és párologtatási viszonyokat, illetve a felszín érdességi paraméterét és kiszorítási rétegvastagságát (a növényzet magasságától függő mennyiségek), ezért a helyi talajnedvességi viszonyok eltérhetnek egy nagyobb felbontású modellben megadottaktól. Egy egyszerű modell esetében is megjelennek visszacsatolások az ülepedési sebességet befolyásoló környezeti tényezők és a növény között (lásd: 3. ábra). A talajnedvességet tehát vehetjük egy alkalmas klímaadatbázisból is, de ha nem ismerjük, vagy a pontosabb érték kedvéért a modellben számíthatjuk is, a

$$\theta_i = \theta_{i-1} + Pr_{i-1} - I_{i-1} + ET_{i-1}$$

összefüggéssel, ahol θ_i az időlépésben vett talajnedvesség (egyrétegű talajmodell esetén), Pr a csapadékösszeg, I az intercepció mennyisége, ET pedig az evapotranszpiráció. A talajnedvesség viszonylag pontos becsléséhez eszerint ismernünk kell az evapotranszpirációt, illetve azt, hogy mekkora részét borítja a talajnak a növényzet, és az milyen magas.

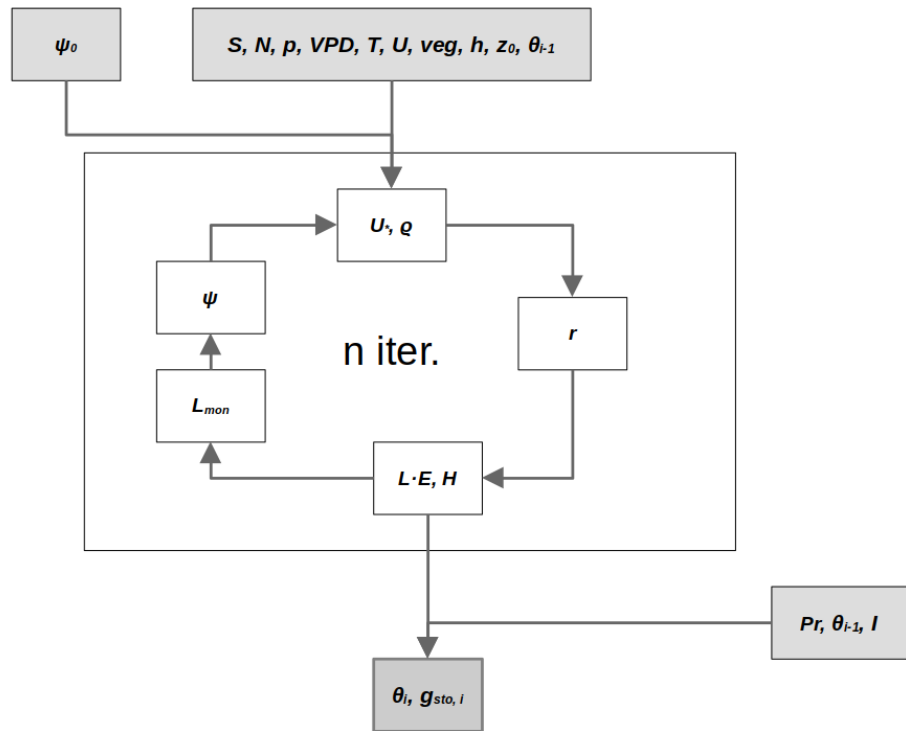


3. ábra: A fluxus és az ellenálláshálózat visszacsatolása a környezeti tényezőkre (meteorológiai mennyiségek). ET : evapotranszpiráció, z_0 : érdességi paraméter, d : kiszorítási rétegvastagság, veg : a felszín relatív növényborítottsága, T : léghőmérséklet, Pr : csapadékösszeg, VPD : gőznyomáshiány, I : napsugárzás, p : légnyomás, θ : talajnedvesség.

A talajnedvességre felállíthatunk egy egyszerű modellt Mészáros et al. (2009) alapján, ahol a talajt egyetlen réteggel modellezzük, és a réteg vastagsága a gyökérszóna mélységével egyezik meg, az evapotranszpirációt pedig az Antal-féle empirikus paraméterezéssel paraméterezzük, a napi átlaghőmérséklet, az aktuális talajnedvesség és a relatív páratartalom értékével.

Pontosabb, de komplexebb, és több bemenő meteorológiai mennyiséget igénylő módszer a Penman–Monteith módszer, ami a talajnedvesség számításához az evapotranszpirációt a felszíni energiamérleg és a felszíni réteg stabilitásának függvényében számolja. A látens és szenzibilis hőáram a felszín és a turbulens felszíni réteg ellenállásától függ. Ezek kiszámításához ismernünk kell, hogy a turbulens felszíni réteg labilis, neutrális, vagy stabilis rétegződésű-e. A felszíni réteg ellenállása függ a stabilitástól és a sűrűlási sebességtől. A rétegződés (a ψ stabilitási függvénnyel jellemezhető) stabilitását a Monin–Obukhov hossz (L_{mon}) kiszámításával adhatjuk meg, ami a léghőmérsékletnek, a látens és a szenzibilis hőáramnak, és magának a sűrűlási sebességnek a függvénye. Neutrális rétegződés $|L_{mon}| > 800$ m, labilis rétegződés $L_{mon} < 0$ m, stabilis rétegződés $L_{mon} > 0$ m esetén áll fenn. A turbulens áramok (látens és szenzibilis hőáram) a felszíni rétegre érkező nettó összes (rövid- és hosszúhullámú) sugárzástól, illetve légnedvességtől és a felszín eredő ellenállásától függenek.

Ezt a számítást iteratív módon tudjuk elvégezni, azaz neutrális rétegződésből indulunk ki ($\psi_0 = 0$), és az így kiszámított turbulens áramokból újra és újra kiszámítjuk a Monin–Obukhov hosszat, az ellenállásokat és a turbulens áramokat, n számú iteráción keresztül (lásd: 4. ábra), addig, amíg az értékek konvergálnak (Ács, 2004).



4. ábra: A Penman–Monteith módszer iteratív számítási eljárása. Ψ : stabilitási függvény, S : beérkező rövidhullámú sugárzás, N : felhőborítottság, p : légnyomás, VPD : gőznyomás-hiány, T : léghőmérséklet, U : szélsébség, veg : növényborítottság, h : növény magassága, z_0 : érdességi paraméter, θ : talajnedvesség, U^* : sűrűlási sebesség, q : levegő sűrűsége, r : felszín ellenállása, $L \cdot E$: látens hőáram, H : szenzibilis hőáram, L_{mon} : Monin–Obukhov hossz, I : napsugárzás, g_{sto} : sztómavezetés.

Felhasznált adatbázisok

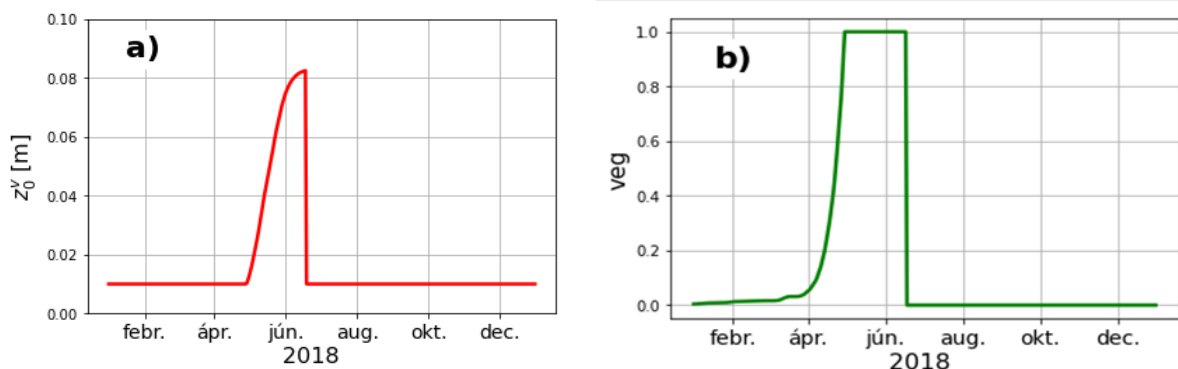
A mesterszakos diplomamunkánkban (Gula, 2022) végzett kutatás során célunk elsősorban a sztómavezetés és az ózonfluxus kiszámítása volt a *FORESEE* adatbázis múltira vonatkozó adataival (1951–2018). Kiszámoltuk a napi sztómavezetés értékeket két pontra, az Országos

Levegőminőségi Mérőhálózat két vidéki háttérállomására, K-pusztára (Alföld) és Farkasfára (Örség), mert ez volt az a két háttérállomás, ahonnan hozzá tudunk férni napi ózonkoncentráció adatokhoz. A FORESEE adatbázisban [2 – FORESEE adatbázis, Eötvös Loránd Tudományegyetem] Közép-Európa területére állnak rendelkezésre napi adatok, vizsgálatainkhoz a $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ felbontású v4.0 verzióból vettük a napi minimum- és maximumhőmérsékleteket és a napi csapadékösszegeket, és a korábbi, $1/6^\circ \times 1/6^\circ$ felbontású v3.1 verzióból a napi átlagos rövidhullámú fluxus és napi átlag gőznyomáshiány-adatokat. Kutatásunk során az így meghatározott értékeket szeretnénk összehasonlítani az ERA5-Land adatbázisból számolt stresszfaktor és sztómavezetés értékekkel. Az ERA5-Land adatbázis az ECMWF modell szárazföldi komponenseit tartalmazza, az ERA5 klíma-reanalízis értékekből számítva, globális skálán, órás és $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ felbontással [3 – Copernicus]. Az adatbázisban minden értéket megtalálunk, amik a sztómavezetés számításához szükségesek (beleértve a talajnedvességet és a szélesebséget, amit a FORESEE nem tartalmaz), és lehetővé teszi azt is, hogy a talajnedvességet a Penman–Monteith módszerrel is kiszámítsuk. Célunk, hogy összehasonlítsuk a különböző adatbázisokból származó meteorológiai adatokkal és különböző talajnedvesség paraméterezésekkel számolt sztómavezetés értékeket, továbbá összevessük a környezeti stresszfaktorok és a meghatározó meteorológiai adatok eltérését egymástól, illetve, hogy ezek az eltérések mekkora hatást okoznak a sztómavezetés és az ózonfluxus értékeiben.

Előzetes eredmények

A korábban végzett számítások során a FORESEE adatbázis napi minimum- és maximumhőmérséklet, napi csapadékösszeg, napi sugárzási átlag és napi átlagos gőznyomáshiány értékeiből az Antal-féle paraméterezést használva kiszámoltuk K-pusztára és Farkasfára állomásokra a talajnedvességet, és ebből becsültük a napi sztómavezetés értékeket őszi búzára és burgonyára.

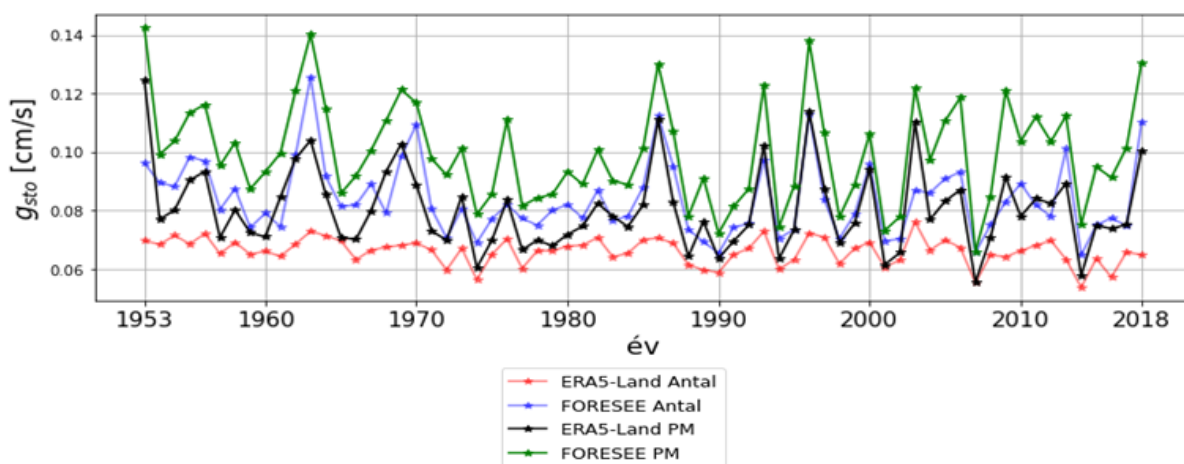
A doktori kutatás során az ERA5-Land adatbázisból a napi átlaghőmérséklet (T), harmatponti hőmérséklet (T_D), légnyomás (p), csapadékösszeg (Pr), szélesebség (u , v) és rövidhullámú napsugárzás (S) adatokat felhasználva kiszámítottuk a talajnedvességet mind a Penman–Monteith módszerrel, mind az Antal-féle paraméterezéssel. Az ebből számított talajnedvesség és sztómavezetés értékeket összehasonlítottuk a FORESEE adatbázis alapján számított értékekkel. Utóbbi esetben is alkalmaztuk a Penman–Monteith módszert, ahol a FORESEE adatbázisból hiányzó inputokat az ERA5-Landból pótoltuk.



5. ábra: A növényzettől függő paraméterek alakulása 2018-ra, K-pusztára állomásra, őszi búza növényre. a) érdeességi magasság, b) növényborítottság.

A Penman–Monteith számításához szükségünk van még a napi felhőborítottság adatokra (N) is. Ehhez a rövidhullámú sugárzásfluxus és az adott nap adott órájában földrajzilag maximálisan lehetséges (S_{max}) rövidhullámú fluxus arányát használtuk, feltételezve, hogy a kettő között lineáris kapcsolat áll fenn. A növényzettől függő paraméterek (intercepció, növényborítottság, vegetációs periódus, kiszorítási rétegvastagság, érdességi paraméter) számításához logisztikus növekedési modelleket használtunk (lásd: 5. ábra).

Ábrázolva a sztómavezetés tenyészidőszaki éves átlagait (6. ábra), K-pusztai állomásra, őszi búza növényre, az éves átlagok hasonló tartományba esnek a különböző számításokban, de rendre a Penman–Monteith (PM) módszerrel számolt értékek nagysága és változékonysága volt a nagyobb.



6. ábra: A sztómakonduktancia tenyészidőszaki átlagértékei 1953 és 2018 között, a négyféle számítással K-pusztai állomásra (ERA5-Land és FORESEE adatbázisok, Antal-féle és PM paraméterezések).

Vizsgálataink során elemeztük a kétféle adatbázisból (ERA5-Land, FORESEE), a kétféle paraméterezéssel (Antal, PM) származtatott talajnedvesség értékeit is, összevetve az ERA5-Land saját talajnedvesség adataival is. A kétféle paraméterezéssel számolt talajnedvesség értékekben egyelőre jelentős különbségeket kaptunk, az ERA5-Land adatok pedig e kettő közé estek, ugyanakkor az adott paraméterezésein belül kisebb különbségek mutatkoznak. A nagy eltérések felhívják a figyelmet a talajnedvesség modellezésének nehézségeire is, és további vizsgálatokat igényelnek.

Összefoglalás

A felszínközeli ózon növényállományokra gyakorolt hatása az ózon száraz ülepedésének modellezésével becsülhető. Az ülepedést ellenálláshálózat-moddellel számíthatjuk. Kutatásunk során az ERA5-Land és a FORESEE adatbázisok adataiból, a DO_{3SE} ellenálláshálózat-moddellel számítottuk az őszi búza növényállomány sztómavezetését, egyelőre K-pusztai állomásra. Összehasonlítottuk a FORESEE és az ERA5-Land adatokból számolt sztómavezetés-értékeket, és a talajnedvesség két paraméterezését, a Penman–Monteith módszert és az Antal-féle paraméterezést. A paraméterezés szignifikáns különbséget okozott a számítások végeredményében, és mindkettő szignifikánsan eltért az ERA5-Land adatbázis talajnedvesség-adataitól. A modellek pontosságának megállapításához a későbbiekben össze kell vetnünk a számított talajnedvesség-értékeket különböző (például liziméteres) mérésekkel. Célunk továbbá, hogy további bemenő adatokra való érzékenységet is megvizsgáljuk a

modelleknek, és hogy végső soron a FORESEE adatbázis adatait felhasználva egy becslést tudjunk adni a sztómavezetés időbeli változására Magyarország területén az adatbázis által lefedett múltbéli és jövőbéli időszakokra egyaránt.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük dr. Kern Anikónak a FORESEE adatokhoz való hozzáférésben nyújtott segítségét, és dr. habil. Barcza Zoltánnak a kutatás során adott tanácsait.

A kutatás az Éghajlatváltozás Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projekt keretében valósult meg.

Hivatkozások

- Ács, F., 2004: A talaj-növény-légkör rendszer modellezése a meteorológiában: A növényi párolgás és a talaj kapcsolata. Eötvös Loránd University, Budapest. 117p.
- Emberson, L.D., Pleijel, H., Ainsworth, E.A., van de Berg, M., Ren, W., Osborne, S., Mills, G., Pandey, D., Dentener, F., Büker, P., Ewer, F., Koeble, R., Van Dingenen, R., 2018: Ozone effects on crops and consideration in crop models. *European Journal of Agronomy*, 100: 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.06.002>
- Grünhage, L., Pleijel, H., Mills, G., Bender, J., Danielsson, H., Lehmann, Y., Castel, J-F., Bethenod, O., 2012: Updated stomatal flux and flux-effect models for wheat for quantifying effects of ozone on grain yield, grain mass and protein yield. *Environmental Pollution*, 165: 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.02.026>
- Gula, M., 2022: A troposzférikus ózon ülepedését befolyásoló tényezők modellezése magyarországi mezőgazdasági növényállományokra. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék. 54p.
- Jarvis, P.G., 1976: The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 273(927): 593–610. <https://doi.org/10.1098/rstb.1976.0035>
- Lagzi, I., Mészáros, R., Gelybó, Gy., Leelőssy, Á., 2013: Atmospheric Chemistry. Eötvös Loránd University, Budapest. 81–87, 154–161.
- LRTAP egyezmény: Mills, G., Harmens, H., Hayes, F., Pleijel, H., Büker, P., González, I., Alonso, R., Bender, J., Bergmann, E., Bermejo, V., Braun, S., Danielsson, H., Gerosa, G., Grünhage, L., Karlsson, P., Marzuoli, R., Schaub, M., Simpson, D., United Nations Economic Commission for Europe - Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution) 2017: Mapping Critical Levels for Vegetation. Revised Chapter 3 of the Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends.
- Mészáros, R., Szinyei, D., Vincze, C., Lagzi, I., Turányi, T., Haszpra, L., Tomlin, A.S., 2009: Effect of the soil wetness state on the stomatal ozone fluxes over Hungary. *International Journal of Environment and Pollution*, 46(1/2/3): 180–194. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2009.021825>
- Pleijel, H., Danielsson, H., Emberson, L.D., Ashmore, M.R., Mills, G., 2007: Ozone risk assessment for agricultural crops in Europe: Further development of stomatal flux and flux–response relationships for European wheat and potato. *Atmospheric Environment*, 41: 3022–3040. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.002>

Internetes hivatkozások

- [1 – Stockholm Environment Institute] <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/do3se-deposition-ozone-stomatal-exchange/>
[2 – FORESEE adatbázis, Eötvös Loránd Tudományegyetem] <https://nimbus.elte.hu/FORESEE/>
[3 – Copernicus] <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>
-

ORCID

Gula M.  <https://orcid.org/0009-0000-2261-0940>
Mészáros R.  <https://orcid.org/0000-0002-0550-9266>