

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Az ózon által okozott környezeti terhelés meghatározása

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

Lázár Krisztina

Földtudományi alapszak,

Meteorológus szakirány

Témavezető:

dr. habil. Mészáros Róbert

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2018

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés.....	3
2	Az ózon légköri körforgalma.....	5
	2.1 Az ózon kialakulása	6
	2.2 Az ózon terjedése.....	9
	2.3 Az ózon nyelői	11
3	Az ózon környezetre gyakorolt hatása	13
	3.1 Az ózon bioszférára gyakorolt hatása	13
	3.2 Az ózon épített környezetre gyakorolt hatása	17
4	A troposzférikus ózon hatását leíró mérőszámok	19
	4.1 Koncentráció alapú mérőszámok.....	19
	4.2 Fluxus alapú mérőszámok.....	20
5	Ülepedési modellek	22
	5.1 Általános leírás	22
	5.2 Alkalmazott almodulok	22
	5.3 Növényi stressz függvények	25
	5.3.1 A hőmérsékleti stressz	27
	5.3.2 Megvilágítás okozta stressz	32
	5.3.3 Oxidatív stressz	34
	5.3.4 Légnedvesség okozta stressz	35
	5.3.5 Talajnedvesség okozta stressz	39
	5.3.6 Ózon okozta stressz	40
6	Összefoglalás	42
7	Köszönetnyilvánítás	43
8	Hivatkozások.....	44

1 Bevezetés

Napjainkban egyre kutatottabb téma a légszennyezés és ennek bioszférára gyakorolt hatása. Jelentős szerepet játszik ebben az ózon is, mely egyrészt nélkülözhetetlen a sztratoszférában betöltött szerepe miatt. Kiszűri a nagy energiájú UV-C sugárzást és az UV-B sugárzás rövidebb hullámhosszú részét, mely roncsoló hatással van minden élő és élettelen szervezetre egyaránt. Másrészt a troposzférikus ózon káros hatásai régóta ismertek. Az ózon nem oldódik vízben, így élő szervezetekbe bejutva más anyagokkal lép reakcióba. Növények esetében fehérjékkel és lipidekkel, melyek a sejtfalak kilyukadásához vezetnek. Az emberi szervezet is számos tünetet produkál kiugró és tartósan fennálló magas ózonkoncentrációk esetében egyaránt.

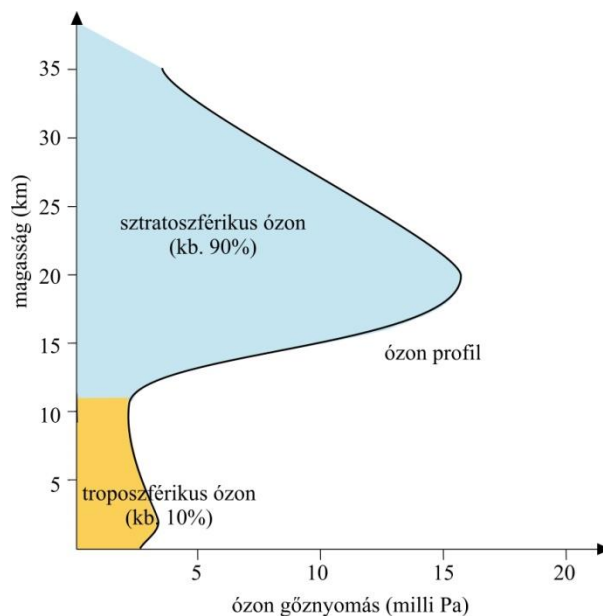
A Meteorológiai Tanszéken korábban is történtek már áttekintések az ózon hatását vizsgálva. Komjáthy (2008) az ülepedési modell vízháztartási almoduljának fejlesztésével foglalkozott. 11 felszín típusra és 7 talajtextúrára számított talajnedvességet a felszint borító növényzet függvényében, valamint térbeli futtatásokat végzett Magyarország területére az ALADIN előrejelző modell felszínhasznosítási kategóriáit használva. Juhász (2006) a csatolt terjedési-ülepedési modellel, Czender (2007) pedig magyarországi erdőállományokra végzett számításokat az ózonerhelés becslésére. Ludányi (2015) a Meteorológiai Tanszéken fejlesztett TREX ülepedési modell adaptálásával és az időlépték sűrűsítésével foglalkozott, amellyel pontbeli számításokat végezve szimulálta a száraz ülepedési sebességet és a fluxust részletes időbeli felbontásban a modellezni kívánt területekre.

Szaktervezésben a témát egy új szempontból közelítettem meg: az ózon által okozott környezeti terhelést – elsősorban a növényeket érő terhelést – vizsgálva és részletesen elemezve a növényállományra történő ülepedést meghatározó ún. stresszhatások szerepét. A növénybe kerülő légszennyező anyagok mennyisége ugyanis a sztómányílások állapotától függnek. Ám a sztómák állapotát meteorológiai változók, továbbá talaj-, felszín- és növényparaméterek befolyásolják. Nyitottabb gázcserenyílások esetén nagyobb nyomgázáram mérhető. Munkámban kitérek a hőmérséklet, a besugárzás, a légnedvesség és a talajnedvesség okozta hatásokra, valamint az oxidatív-, fenológiai- és kumulatív ózonkoncentráció okozta stresszre. Szakirodalmi adatok alapján áttekintést adok a sztómavezetés modellezésekor használt paraméterekről különböző növények esetében.

A második fejezet áttekintést nyújt az ózon körforgalmáról a légkörben, a keletkezéséről, terjedéséről és a légkörből való kikerüléséről. A harmadik fejezet leírást ad az ózon környezetre gyakorolt hatásáról, beleértve az élőlényeket és az épített környezetet. Az ezt követő fejezetben a troposzférikus ózon hatását leíró mérőszámokat ismertetem. Ezt követően az ülepedési modelleket, valamint az egyes stresszfüggvényeket mutatom be.

2 Az ózon légköri körforgalma

Az ózon három oxigén atomból álló molekula. Egyedi szúrós szaga villámláskor is érezhető. Így kezdett el kutatni Christian Friedrich Schönbein, német kémikus és fedezte fel, majd először publikált róla 1840-ben (Lagzi et al., 2013). Közel száz évvel később 1920 és 1929 között Gordon M. B. Dobson kidolgozott egy módszert, amellyel meghatározható a teljes légoszlop ózommennyisége. Az ózon nagy része a sztratoszférában található.



1. ábra: Az ózon koncentrációjának magasság szerinti eloszlása (forrás: Lagzi et al., 2013.)

Az 1. ábrán az ózon koncentrációjának magasság szerinti eloszlása látható. A légköri ózon mennyiségének 90%-a az alsó sztratoszférában található (Gelencsér et al., 2012). Ám a sztratoszférikus ózonréteg közel nem egyenletes. A sarkok felett a mennyiségének maximuma 20 kilométeren, míg a trópusok felett 30 kilométeren található. A maradék 10% a troposzférában helyezkedik el, szerepe kiemelten fontos, hiszen részt vesz a fotokémiai légszennyezésben és annak oxidáló hatásának kialakulásában (Lagzi et al., 2013).

2.1 Az ózon kialakulása

A légköri körforgalom a forrással kezdődik, így az ózon felfedezése után a következő mérföldkő a helyes lebontó és keletkező reakciómechanizmusok felírása volt. Sydney Chapman brit kémikus 1930-as elmélete magyarázta meg a sztratoszférikus ózon keletkezését. A reakcióegyenletek alapja, hogy az oxigén molekulák átalakulási folyamatai sugárzás hatására következnek be [3]. A következő két reakció egyenlet az ózon keletkezését írja le a sztratoszférában:



Ahol: O – oxigén atom, O₂ – 2 atomos oxigén molekula, O₃ – ózon molekula, hν – ultraibolya sugárzás, M – a reakcióban felszabaduló energia elszállítására szolgáló anyag, általában O₂ vagy N₂.

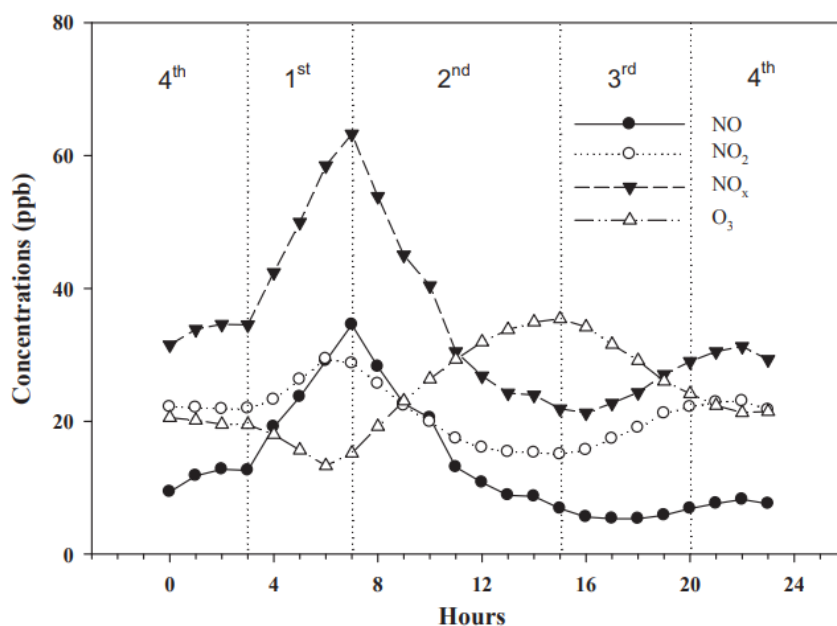
Egyedül az ózon nyeli el az ultraibolya sugárzást a 230–380 nm-es tartományban (*Gelencsér et al., 2012*). Így az ózonréteg nélkülözhetetlen az élet létezéséhez a Földön, hiszen ez az ultraibolya sugárzás elroncsol minden élő- és élettelen szövetet. Ugyanakkor, mivel az ózon elnyeli a keletkezéséhez szükséges sugárzást már a sztratoszférában, sokáig úgy gondolták, hogy a troposzférában nem is keletkezhet ózon, csak a sztratoszférából keveredik le [3], tekintve, hogy a felszínnek nincs ózon kibocsájtása (*Mészáros, 2002*). Az 1950-es évek elején azonban kritikus légszennyezések jelentkeztek Los Angelesben. Ez különbözött az addigra már ismert Londoni típusú szmogtól, ugyanis arra a téli fűtés miatt levegőbe kerülő szennyezőanyagok a jellemzőek, mint például a szén-monoxid (CO) és a kén-dioxid (SO₂). A Los Angeles típusú fotokémiai szmog esetén magas ózon koncentráció szintet mértek. Így felmerült a lehetőség a troposzférában történő ózonképződésre. Az 1960 évek elejére kiforrott az elmélet, miszerint nitrogén-oxidok (NO₂), szén-monoxid (CO), metán (CH₄), illetve VOC-ok (Volatile Organic Compounds – illékony szerves vegyületek) játszanak szerepet az ózon keletkezésében a troposzférában a napsugárzás segítségével [3]. Ezen összetevők forrása elsősorban antropogén eredetű, de természetes úton is kerülhetnek a légkörbe. A villámlás és a denitrifikáció a nitrogén-oxidok, a

biomassza égetés a szén-monoxid, az anaerob bomlások a metán, a belső égésű motorok, a szerves oldószerek és a párolgó üzemanyagok a VOC-ok jelenlétét növelik a légkörben. A 3-5. reakcióegyenletek az O₃ kémiáját írják le a NO-NO₂ függvényében a troposzférában:



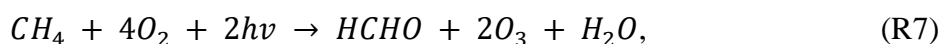
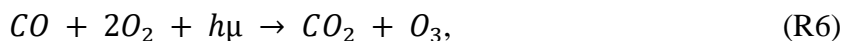
A fentiek alapján nincs nettó ózontermelés, de a napi menet megmagyarázható, amely a 2. ábrán látható.

Song és társai (2011) az Egyesült Államok keleti partján lévő autópályák közelében végeztek méréseket a légköri gázok napi menetét vizsgálva. Munkájukban 4 periódusra bontották a napot. Az első időszak 3.00–7.00 óráig tartott. Ekkor az NO_x koncentráció jelentősen nőtt, ami a gépjárművek és az ipari tevékenység emissziójának köszönhető. A következő időszakban, 7:00 és 15:00 óra között, a napsugárzásnak köszönhetően az O₃ termelő folyamatok domináltak. A 4. és 5. reakcióegyenlet szerint a NO₂ szétbomlik egy NO molekulára és egy O atomra. Így az O atomból és O₂ molekulából egy közvetítő anyag segítségével O₃ képződik. Ennek következtében csökken az NO₂ koncentrációja, ezzel egyidőben pedig nő az O₃ és a NO mennyisége. Mindaddig, míg körülbelül 15.00 óra körül az O₃ koncentráció csúcserőket mutat, ezzel szemben az NO_x koncentrációja minimális. Figyelembe kell venni továbbá, hogy ebben a periódusban a legmagasabb a határreteg magassága. A 15:00–20:00 óráig tartó harmadik időszakban a napsugárzás csökkenésével a harmadik reakcióegyenlet szerint a NO és az O₃ reagál és keletkezik NO₂ és O₂, tehát az O₃ fotokémiai termelése csökken, valamint az NO₂ szint emelkedik. Az NO_x ismét felhalmozódhat a délutáni forgalom miatt, de a még magas határreteg miatt értéke nem lesz akkora, mint az első periódusban volt. A negyedik szakaszban kiegyenlítődik az NO_x és az O₃ egyensúly, tekintve, hogy nincs besugárzás, nincs jelentős forgalom és csökken a határreteg magassága (Song *et al.*, 2011).



2. ábra: Az O_3 és a nitrogén oxidok tipikus napi menete. (Song et al., 2011)

Az NO-NO₂ kémiáján kívül a CO és a CH₄ is hozzájárul a troposzférikus ózon keletkezéséhez:



ahol HCHO a formaldehid.

A 6. egyenlet a szén-monoxid, a 7. egyenlet pedig a metán kémiáját mutatják be. Ezek nettó reakcióegyenletek, közben számos más kémiai reakció is végbemeleg [3].

A troposzférikus ózon tehát döntő többségben fotokémiai reakciók által keletkezik, valamint kis mértékben lekeveredik a sztratoszférából az alsóbb rétegekbe (Sharma et al., 2017).

2.2 Az ózon terjedése

Miután a légköri szennyezőanyagok közvetlen forrás, vagy kémiai reakciók során a légkörbe kerülnek, transzport folyamatok révén elszállíthatódnak a keletkezés helyétől. A számos befolyásoló tényezők következtében ezen transzport folyamatok rendkívül összetettek. Meghatározó szerepet játszanak a légmozgások, melyek lehetnek rendezettek vagy turbulensek, kis- és nagyléptékűek, horizontális vagy vertikális irányúak. Megkülönböztetünk elsődleges szennyezőanyagokat, amelyek közvetlenül a forrásokból kerülnek a levegőbe, illetve másodlagos szennyezőanyagokat, melyek sok esetben az elsődleges vegyületekből kémiai reakciókkal keletkeznek (*Bozó et al., 2006*). Ezen kémiai reakciók bekövetkezhetnek sugárzás, nedvesség vagy oxidáció révén is. Utóbbira példa az ózon, ami tehát másodlagos szennyezőanyag, nem közvetlen kerül a légkörbe (*Lagzi et al., 2013*).

A nyomanyagok hatása markánsan függ a rájuk jellemző, légkörben való tartózkodási időtől. Ez függ a forrás és nyelő folyamatok egyensúlyától. Minél kisebb egy nyomanyag tartózkodási ideje, annál nagyobb koncentrációjának változékonysága. Ennek megfelelően a nagyobb tartózkodású anyagok koncentrációjának változékonysága a térben és az időben kisebb. A reakcióra hajlamosabb és vízben oldódó anyagok tartózkodási ideje jellemzően rövidebb. E szerint a légszennyeződés három fajtáját különböztetjük meg.

Az elsődleges szennyezőanyagok lokális légszennyeződést okoznak (20 kilométeren belüli), hiszen a kibocsátás helyénél a legnagyobb az anyag koncentrációja. Így nagyvárosok és ipartelepek levegőjére jellemző. Ennek következtében a lakosság egészségügyi állapotára veszélyesek, hiszen ezek az anyagok a levegővel együtt kerülnek belélegzésre. Továbbá káros hatást gyakorolnak a látótávolságra és az épületek, műtárgyak és parkok állapotára. A kedvezőtlen időjárási helyzet tovább fokozhatja a hatást jelentéktelen légáramlás és hőmérsékleti inverzió formájában. Ezek vizsgálatára általában lokális skálájú terjedési modellt alkalmaznak.

Regionális léptékben a másodlagos vegyületek jellemzőek, hiszen időre van szükség a forrásoktól való elterjedéshez. Regionális léptéknek a 20–3000 km közötti tartományt tekintjük és vizsgálatára regionális modellt használnak. Tipikus példa a regionális légszennyezésre a savas ülepedés és a troposzférikus ózon.

Globális hatást a hosszú tartózkodási idejű anyagok okoznak, mert megfelelő mennyiségű idő áll a rendelkezésükre a Föld légkörének egészén való elterjedéshez és valamely hatás kiváltásához, mint például az üvegházhatás vagy az ózonlyuk. Globális légszennyeződést okozó üvegházhatású gázok, mint a szén-dioxid, dinitrogén-oxid, metán és freonok megfigyelésére globális modelleket futtatunk (*Bozó et al., 2006*).

A légszennyező anyagok terjedésének leírására két mód van. Az egyik a statisztikus elv, ami adatsorok statisztikai vizsgálatát jelenti. Ez a módszer hosszú távú előrejelzésre alkalmas, a modellek egyszerű felépítésűek és így gyorsan futtathatók. Erre példa a CAR-modell, ami a szén-monoxid éves átlagos koncentrációját becsli egy utcakörnyezetében. A másik mód a dinamikus elv, ami komplex matematikai leírásokat használ a terjedés leírására. Ezen differenciálegyenletek pontos előrejelzésre alkalmasak, de csupán rövid időre, továbbá nagy kapacitású számítógépek szükségesek hozzá.

A dinamikus modellek további csoportokra oszthatók. A legerterjedtebben használt modellek a Gauss-modell, a Lagrange-modell és az Euler-modell. Ezek a modellek különböző elven alapulnak. A Gauss-moddal térbeli eloszlás számolható, de erős peremfeltételei miatt (nincsenek kémiai reakciók, turbulens diffúzió, kiülepedés, valamint az időjárás és a kibocsátás időben változatlan és a felszín sík) csak lokális skálán használható. A Lagrange modell összetettebb, diszkrét részecskék követésének elvén alapul. Ez a modell már képes a hosszabb tartózkodású idejű anyagok egyszerűbb reakcióit is számításba venni a légkörben. Ezen anyagok előrejelzésére is alkalmazható. A Lagrange-moddal ellentétben az Euler-modellek nem a részecskéket követik, hanem egy fix rácshálózatban vizsgálják a bemenő és kimenő anyagáramot. A parciális differenciálegyenlet-rendszer megoldásával bármely pontban kiszámíthatjuk az adott anyag koncentrációját (*Lagzi et al., 2013*).

2.3 Az ózon nyelői

A légköri körfolyamat végén a nyomanyagok a nyelőik által elhagyják a légkört. Ez megtörténhet ülepedéssel vagy kémiai reakciókkal (*Gelencsér et al., 2012*).

Kémiai reakciók révén a troposzférikus ózon elsősorban a 8. reakcióegyenlet szerint fotokémiai reakció során bomlik szét egy O_2 molekulára és egy gerjesztett állapotú O atomra. Majd ez az O atom további O_3 molekulákkal reagálva képez O_2 molekulákat (*Lagzi et al., 2013*). Továbbá fontos szerepet játszik a NO, melyből az ózonnal való gyors reakciója során az 3. egyenlet szerint NO_2 és O_2 keletkezik (*Mészáros, 2002*):



Az ülepedésen belül megkülönböztetünk száraz és nedves ülepedést. A nedves ülepedés a csapadékvízben időegység alatt a talaj vízszintes felületére érkező anyag tömegét jelenti (*Bozó et al., 2006*). Ez annak köszönhető, hogy az aeroszol részecskék egy része vízben oldódó és a felhővíz képes a különböző nyomgázokat elnyelni. A csapadékhullás következtében tisztul a levegő, ugyanakkor a szennyezőanyagokat a litoszférába, illetve a hidroszféra juttatja a csapadékvíz. A nedves ülepedés megkaphatjuk a mintavételi idő alatt a területegységre lehullott csapadékmennyiség és az anyag koncentrációjának a csapadékvízben való szorzatával.

Ezzel szemben a száraz ülepedés csapadékmentes körülmények között megy végbe. A száraz ülepedés révén a nyomanyagok közvetlen megkötődnek a felszínen. Ez a vízben nem oldható anyagokra jellemző. A folyamat alapvető oka, hogy a gázok és aeroszol részecskék a turbulens mozgások hatására függőleges mozgást végeznek. Száraz ülepedés során ez a fluxus lefelé irányul. Minden felszínt egy néhány milliméter vastagságú lamináris réteg borít. Itt nem hatékony a turbulencia, hanem a gázoknak molekuláris diffúzióval, az $1 \mu\text{m}$ -nél kisebb aeroszol részecskéknek Brown-mozgással kell átjutniuk. A nagyobb ($>1 \mu\text{m}$) aeroszol részecskék szedimentációját a gravitációs erő okozta hullásuk határozza meg. Ez az esési sebesség meghatározott hosszúságú

esést követően állandó értéket vesz fel és értéke négyzetesen arányos a részecskék méretével. A száraz ülepedési sebesség függ az adott felszíntípustól, a talajközeli koncentrációtól és a függőleges fluxus által meghatározott ülepedéstől (*Gelencsér et al., 2012*).

Prekursorai révén évente átlagosan 4520 Tg ózon emittálódik a felszínről és 605 Tg keveredik le a sztratoszférából. Az egyensúly fenntartása végett az ózon kémiai reakciókban elbomlik és száraz ülepedés révén a kikerül a légkörből. Előbbit 4130 Tg, utóbbit 995 Tg érték körül becsüljük évente (*Lagzi et al., 2013*).

3 Az ózon környezetre gyakorolt hatása

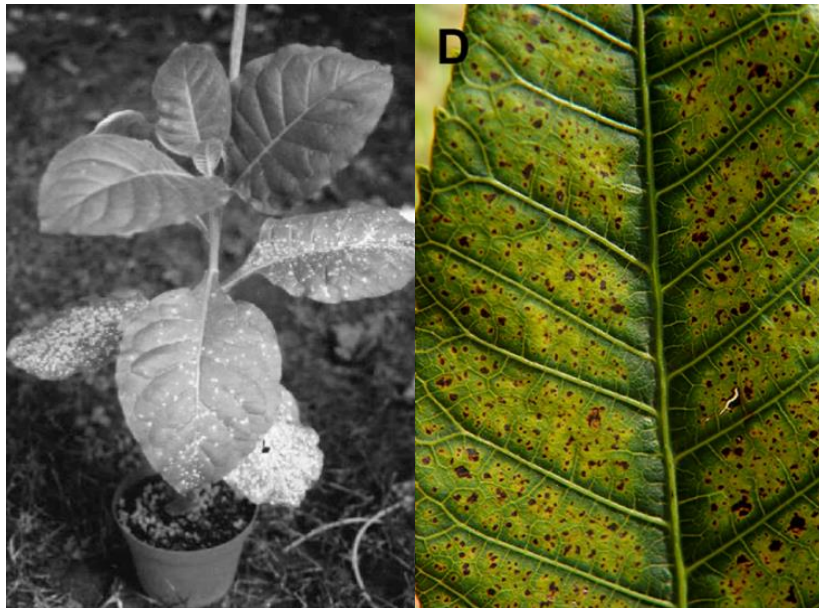
A nagyvárosokra jellemző elsődleges szennyezőanyag kibocsátás az iparnak és a járműveknek köszönhető. Az üzemanyag égetésével ugyanis nitrogén-oxidok, ketonok, aldehidek és szénhidrogének kerülnek a levegőbe (*Sant'Anna et al., 2008*). Napsugárzás hatására számos légköri reakció beindul, melyek következtében káros anyagok, fotokémiai vegyületek képződnek és ennek következtében úgynevezett fotokémiai szmog állhat elő. Az egyik legfőbb troposzférikus szennyezőanyag nyáron az ózon (*Vergé et al., 2002*). Az ózon rendkívül mérgező a szervezetekre az oxidatív stressznek köszönhetően, mely a sejteket roncsolja (*Sant'Anna et al., 2008*). Ez egyaránt igaz minden élőlényre, így kiemelten fontos a levegő minőségének folyamatos felmérése. Ám az ehhez szükséges mérőhálózat kiterjesztése igencsak magas költségekkel járna. Ehelyett gyakran alkalmaznak egy könnyebben megvalósítható és költséghatékonyabb megoldást, a bioindikátor növényeket (*Esposito et al., 2009*). Az élő szervezetek mellett az épített környezetre is hatással lehet az ózon.

3.1 Az ózon bioszférára gyakorolt hatása

Egyes növények kifejezetten érzékenyek a környezeti paraméterek kismértékű megváltozására, például az ózon koncentrációjának növekedésére (*Esposito et al., 2009*). Ezeket a növényeket biológiai indikátoroknak nevezzük és kiválóan alkalmasak a mérőhálózatok kiegészítésére olyan helyeken, ahol gazdasági okok miatt nem volt lehetőség műszereket telepíteni. Az ózon okozta sejthalál a leveleken egyedi, szemmel látható nyomokat hagy és ez által pontosabban feltérképezhetjük az ózon által terhelt területeket. A pontszerűen elhelyezett műszerekkel szemben a növényekkel területeket boríthatunk be.

Az ózonra egyik legérzékenyebb bioindikátornak több tanulmány is a *Nicotiana tabacum* (dohány) Bel-W3 típusát tartja (*Esposito et al., 2009; Sant'Anna et al., 2008; Janzik et al., 2005; Vergé et al., 2002*), melyet az 1950-es évek vége felé fejlesztettek ki Washington környékén (*Vergé et al., 2002*). Az 1960-as évek elején már ózonindikátorként is alkalmazták Európa szerte. A növény legjellemzőbb tünete

ózonterhelés esetén a levél nektrózis, ami a levél sejteinek elhalálózását jelenti, ezáltal barna foltok jelennek meg a leveleken.



3. ábra: Ózon okozta levél nektrózis a *Bel-W3* típusú dohánynövény levelén (baloldal) és az *Astronium graveolens* levelén (jobb oldal) (Vergé et al., 2002; Cassimiro et al., 2016)

A 3. ábrán levél nektrózis látható, bal oldalt a *Bel-W3* típusú dohánynövény, jobb oldalt pedig az *Astronium graveolens* levelein. Ezek a foltok terhelés hatására tovább nőnek, amíg összeolvadnak, miközben gátolják a fotoszintézist és a növény idő előtti elöregedéséhez vezetnek. Az ózon küszöbértéke nagyon alacsony, már 30 ppb (parts per billion) koncentrációnál jelenik meg elváltozás a dohányleveleken, a 8 órára kitett leveleken esetében pedig már a vissza nem fordítható nektrózis áll fent, mely gyakran a levél mindkét oldalán megjelenik (Vergé et al., 2002).

Erős lineáris kapcsolatot mutattak ki az ózon koncentrációja és a nektrózis által lefedett levélszövet százalékos aránya között. Ezt a lineáris kapcsolatot viszont jelentősen befolyásolhatják a meteorológiai tényezők (Sant'Anna et al., 2008), mint a léghőmérséklet, relatív páratartalom és a napsugárzás. Fontos ezen hatások felismerése és számításba vétele. Az ózonfluxus ugyanis a levelekbe a sztómányílásokon keresztül érkezik. Az egészséges sztómák állapotáért pedig a meteorológiai paraméterek felelősek. Az ózonkoncentráció napi átlaga pozitívan korrelál a globális besugárzással

és negatív összefüggésben áll a hőmérséklettel és a páratartalommal. Minél nyitottabbak a sztómányílások, annál nagyobb az ózonfluxus, ami több kárt okozhat a növényben (*Esposito et al., 2009*).

Nemcsak a környezeti tényezők, de bizonyos antioxidáns mutatók is befolyásolják a levelek sérüléseinek mértékét az ózonterhelés következtében. A környezeti tényezők hatására ugyanis a növényben antioxidánsok lépnek fel válaszként, a növény védelmének érdekében. A C-vitamin és a szuperoxid-diszmutáz kis mértékben kontrolálja a reaktív oxigénfajok (ROS – reactive oxigene species) káros hatását a sejtekben (*Sant'Anna et al., 2008*).

Elhanyagolhatatlan paraméter az idő, mely nem lineáris kapcsolatban áll a sérülés mértékével. Xavier Vergé tanulmánya ugyanis kimutatta, hogy az egy hétre ózonnak kitett egyetlen növény leveleinek sérülésének mértéke akár kétszer akkora lehet, mint hét darab különböző, felváltva egy-egy napra kitett növény összesített sérülése ugyanazon a hét nap során.

Az ózonra való érzékenység genetikailag öröklődő tulajdonság. A dohány Bel-W3 típusának esetében legalább két génről is beszámoltak az ózonkárosodás szabályozására (*Vergé et al., 2002*). Viszont nem mindegyik Bel W3 típusú dohány volt érzékeny az ózon koncentrációjára. A kísérletekhez viszont kiemelten fontos volt a megfelelő növényekkel dolgozni. Vergé és társai a fejlődő szakaszuk kezdetén járó növényeket vizsgálva csoportokra osztották őket. Amelyiknek már ekkor megjelent a nekrozis a levelein, azokat az érzékeny kategóriába sorolták, amelyiknek nem, az az ellenálló kategóriába került. Amikor a növények elérték a megfelelő fejlettségi szintet, akkor eltávolították a nekrozissal érintett leveleket és kivitték őket a vizsgálandó területre. A kísérlet 68 napig tartott (1996. 07. 24. – 09.30.), ez alatt az első körben nekrozissal érintett levelek teljesen elhaltak és le is estek.

Az ózon által terhelt Bel-W3 típusú dohánynövényeknek először mindig az idősebb leveleiken jelent meg a károsodás és ezt követően terjed át a fiatalabb hajtásokra is. Ez a jelenség szintén megfigyelhető a 3. ábrán. Az alsó és egyben idősebb levelein sűrű foltok jelentek meg az ózon kellően magas koncentrációjának huzamosabb ideig való fennállásának következtében. Míg a friss, újabb hajtások egészségesebbnek mutatkoztak.

A kísérlet végére az ellenálló példányok csoportjának csak egy része sérült, több példány is sértetlen maradt. Amelyik növényen megjelent a nekrozis, kevesebb, mint a levélfelületek 5%-át érintette. Az ellenálló példányokon megjelenő sérülések időpontja és mennyisége nem mutatott semmilyen korrelációt az ózonkoncentráció szintjével. Ezzel szemben az érzékeny példányok mindegyikén megjelent a nekrozis. A legmagasabb szintű sérülés több levél esetében is meghaladta a 75%-ot (*Vergé et al., 2002*).

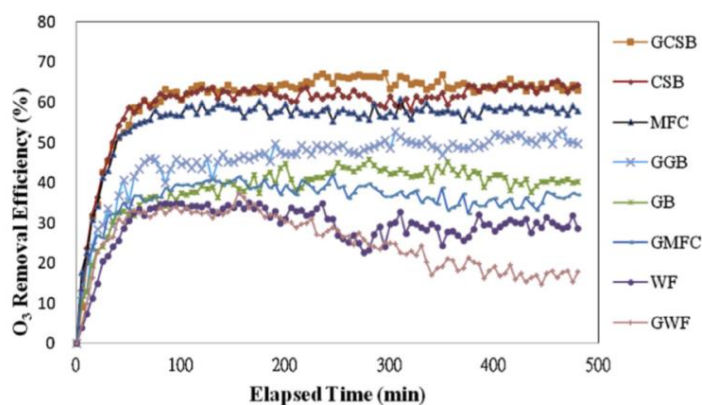
Mivel az ózon gátolja a fotoszintézist, ezáltal csökkentve a növény növekedését és fejlődését, súlyos kárt tehet egész termésállományokban és komoly terméskiesést okozhat (*Dingenen et al., 2009*). A legmagasabb ózon koncentráció értékek a legnagyobb besugárzás idejére tehetőek, mivel az ózon keletkezéséhez napsugárzás szükséges. Ennek következtében az ózon károsító hatása a legtöbb fénykedvelő növény vegetációs időszakában a legintenzívebb (*Juhász, 2006*). Ez számos kultúr- és takarmánynövényt érint. Az ózon a rizs levelén látható sérüléseket okoz, továbbá hatást gyakorol a rizslevél nitrogén-, cukor- és fehérje tartamára és a nitrát redukáz aktivitásra. Az ózonkoncentráció növekedésével az ammónium nitrogén és nitrát nitrogén tartalma egyértelműen csökkent (*Huang, 2012*). Az ózon okozta stressz a gabona keményítőtartamának csökkenéséhez vezet, aminek következtében a növényben található oldható cukor mennyiségének nagyobb százalékát eredményezi (*Thomson, 2018*). A magasabb ózonkoncentráció hatására a szója levelének erein eleinte vörös-barna elváltozások jelennek meg, ami később azon sejtek elhalálzásához vezet. Kísérletet végeztek lóherékkel és a naponta előkezelt egyedeknek csupán 20–30%-a sérült, szemben a nem előkezelt lóherékkel, melyeknek 60–70%-a károsodott. További kutatásokat végeztek még számos más hazánkban is termelt kultúrnövényre (mint például árpa, kukorica, lucerna, gyapot, bab, saláta, földi mogyoró, paradicsom, köles, fehér és vörös here, valamint dohány) és a tapasztalatok azt mutatták, hogy 0,02 g m⁻³ koncentrációnál még nincs számottevő termésállománybeli változás. Ennél magasabb koncentrációnál viszont már lineárisan csökken (*Borhidi, 1991*).

A vegetáció védelmére az ózonkárosodás ellen megszabott küszöbérték 40 ppbV (AOT40), melyet a növények növekedési szakaszában túllépve maradandó károk keletkeznek (*Dingenen et al., 2009*).

Az emberi egészség érdekében nem ajánlatos az egészségügyi küszöbérték (120 mg m^{-3} – napi 8 órás mozgó átlag-koncentrációk maximuma) túllépése évente három alkalomnál többször. A magas ózonkoncentráció ugyanis a következő tüneteket okozhatja: száraz köhögés, szapora légzés, émelygés, zihálás, szemirritáció, továbbá tüdőgyulladás. A tartósan fennálló magas ózonkoncentráció asztmával, allergiával és hörghuruttal járhat, valamint az immunrendszer gyengülését okozza, ami különösen veszélyezteti a gyerekeket (Juhász, 2006).

3.2 Az ózon épített környezetre gyakorolt hatása

Az ózon emberi egészségre gyakorolt káros hatásainak következtében a vizsgálatok kiterjedtek az épületekre is. A felületükön ugyanis az ózon reakciókkal kikerülhet a légkörből. A beltéri falakon történő ózonnal való reakciók következtében a beltéri ózonkoncentráció általában alacsonyabb, mint a kültéri. Lin és Hsu (2015) tanulmányukban nyolc különböző építési alapanyagot vizsgált: kalciumszilikát szigetelő lap (CSB), környezetbarát kalciumszilikát szigetelő lap (GCSB), kőzetgyapot (MFC), környezetbarát kőzetgyapot (GMFC), gipszkarton (GB), környezetbarát gipszkarton (GGB), fapadló (WF) és környezetbarát fapadló (GWF). Ezek az anyagok mind napjainkban elterjedten használt beltéri építkezési alapanyagok. Környezetbarát alapanyagok alatt értjük mindazon anyagokat, melyeknek gyártási eljárásuk módosították, hogy VOC kibocsátásuk alacsonyabb legyen. Minden anyagot 8 órán keresztül vizsgáltak egy rozsdamentes acél $60 \times 60 \times 60$ cm-es kamrában, mesterségesen beállított kezdeti 75 ppb ózon koncentrációval.



4. ábra: Az ózon eltávolításának hatékonysága különböző építési alapanyagokon (Lin and Hsu, 2015)

A 4. ábrán a kísérlet eredményei láthatók, a diagram az ózon elnyelés hatékonyságát ábrázolja az idő függvényében. Az első egy órában emelkedik a legnagyobb mértékben az elnyelés mértéke minden anyag esetében, majd egy konstans érték körül konvergál. A legnagyobb mértékű ózon elnyelést a zöld karbonszilikát és karbonszilikát anyagok mutatták, a 4. ábrán ezeknek a menetei veszik fel a legmagasabb értékeket. A legalacsonyabb értékeket a fapadló, illetve zöld fapadló esetében mérték. Kimutatták továbbá, hogy az anyag felszínének nagysága jobban korrelál az ózonnal való reakció valószínűségével, mint a teljes pórustérfogat. Ez azzal magyarázható, hogy az ózon reaktív vegyületként hatékonyabban diffundál a számos apró pórusokba, mint a kisebb mennyiségű nagyméretű pórusokba (*Lin and Hsu, 2015*).

Ami az építkezési alapanyagoknál is számottevőbb tényező épületek esetén, az a felületkezelt anyagok borítása. Porózusabb felületeken való reakciók valószínűsége magasabb, mint a sima felületeké. A magasan kiugró ózonkoncentrációk esetén a reakciópotenciál alacsonyabbnak bizonyult, mint a normál koncentrációs értékek esetén, hiszen a rendelkezésre álló felület hamar felhasználódott (*Shen and Gao, 2018*).

4 A troposzférikus ózon hatását leíró mérőszámok

Az ózon esetében megkülönböztetünk koncentráción alapuló és fluxus alapú mérőszámokat. Előbbi a légköri ózon koncentrációjának nagyságát, utóbbi a ténylegesen a levélszövetben felszívódó ózon mennyiségét állítja párhuzamba az ózonterhelés mértékével. Mindkét típusú mérőszámok túlbecsülhetik a növényi válaszokat (*Musselman et al., 2006*). Eleinte a koncentráción alapuló indexeket használták és kimutatták, hogy a kiugró koncentrációs értékek és az alacsonyabb, de folyamatos értékek is egyaránt befolyással vannak a növényi károk keletkezésében. A későbbiekben a fluxus alapú mérőszámok használatát részesítették előnyben, mert a növényi válaszok szorosabb összefüggést mutattak a ténylegesen a légkörből a felszínre abszorbeáló, levélszövetekben felszívódó ózon mennyiségével.

A fluxuson alapuló indexeknek számításba kell venniük a növény védőmechanizmusait az ózonnal szemben, de mivel ennek számszerűsítése meglehetősen bizonytalan, bizonyosabbnak tűnik a koncentráción alapuló mérőszámok használata.

4.1 Koncentráció alapú mérőszámok

Az alábbiakban felsorolom a koncentráción alapuló mérőszámokat:

- SUM06: A SUM06-os index megmutatja a 60 bbp (0,06 ppm) határérték feletti összes óras átlag koncentrációk összegét a vizsgált időszakban (*Fuhrer et al., 1997*):

$$SUM06 = \sum C \Delta t, \text{ ha } C > 60 \text{ ppb.} \quad (1)$$

- AOTxx: A SUM06 mérőszámmal szemben az AOTxx az adott küszöbérték feletti halmozott óránkénti ózommennyiség (EMEP, 2016), tehát a megadott határérték és a tőle magasabb mért koncentrációs értékek különbségeinek összege. Így az AOTxx inkább a külső hatásnak

való kitétel azon részére koncentrálnak, amiről úgy véljük, hogy biológiailag már káros (Fuhrer et al., 1997):

$$AOT_{xx} = \sum (C - xx)\Delta t, \text{ ha } C > xx, \quad (2)$$

ahol xx a megadott küszöbérték, leggyakrabban 40 vagy 60 ppb. A C az átlagkoncentráció és a Δt a vizsgált időszakot jelöli. Az AOT_{xx} mértékegysége ppb óra (Zhang et al., 2006).

- MDA8: Az MDA8 a napi 8 órás ózommennyiség átlagai közül a legmagasabb értéket jelenti.
- SOMO35: Az emberi egészségre és az ökoszisztémára gyakorolt hatásokat a SOMO35 mérőszámmal jellemezhetjük. Értékét a 35 ppb-nél magasabb MDA8 indexek egész évre való összegzésével kapjuk (EMEP, 2016):

$$SOMO35 = \sum \max (A - 35 \text{ ppb}, 0), \quad (3)$$

ahol A az adott nap 8 órás futtatásból származó óránkénti átlagai.

A SOMO35 és AOT40 indexek alapján az ózon-prekursor csökkentési intézkedések hatékonyak voltak, ugyanis 2002 és 2012 között előbbi relatív csökkenése 30%, utóbbié 37% (EMEP, 2016).

4.2 Fluxus alapú mérőszámok

Az alábbiakban felsorolom a fluxus alapú mérőszámokat:

- Sztóma fluxus: A sztómák szerepe kiemelt fontosságú, elsősorban ezek határozzák meg az anyagáramot a növény és környezete között (Mészáros et al., 2015). Az erre használatos mérőszám a sztóma fluxus, amely megadja azt a szennyezőanyag mennyiséget, amely a gázcsere nyílásokon keresztül jut be a növénybe (Esposito et al., 2009).

- Teljes fluxus: A légkörből a felszínre irányuló teljes nyomgázáram, ebbe beletartoznak mind a sztomatikus és a nem sztomatikus felszínek is (*Zhang et al., 2006*).
- Effektív fluxus: A sztómafluxus egy részét a növényben lezajló méregtelenítő folyamatok ellensúlyozzák, a sztóma fluxus azon részét, mely ténylegesen károsítja a növényt effektív fluxusnak nevezzük (*Esposito et al., 2009*).
- Dózis: Időegység alatt a gázcserenyílásokon keresztüli fluxus összesítése (*Czender, 2007*).

5 Ülepedési modellek

5.1 Általános leírás

Az ülepedési modellek felépítése a céltól függően a legkülönbözőbb félék lehetnek, az egészen leegyszerűsített modellektől a sok paramétert alkalmazó, többszintű, bonyolult modellekig. Egy talaj-növény-légkör rendszerben (SVAT modellek – Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer) figyelembe kell venni a meteorológiai, fizikai, kémiai és biológiai folyamatokat is (*Mészáros et al., 2015b*). Minél pontosabb bemenő adataink vannak, annál megbízhatóbb lesz a modelleredmény. Ugyanakkor a túl komplex modellek számos paraméterei nagyobb bizonytalanságot hordozhatnak magukban, ezzel az eredmények instabilitását növelve (*Komjáthy, 2008*). Egyszerűsítésekkel élhetünk, de mindig az adott feladathoz viszonyítva, figyelembe véve a kiemelt fontosságú, illetve kevésbé jelentős paramétereket.

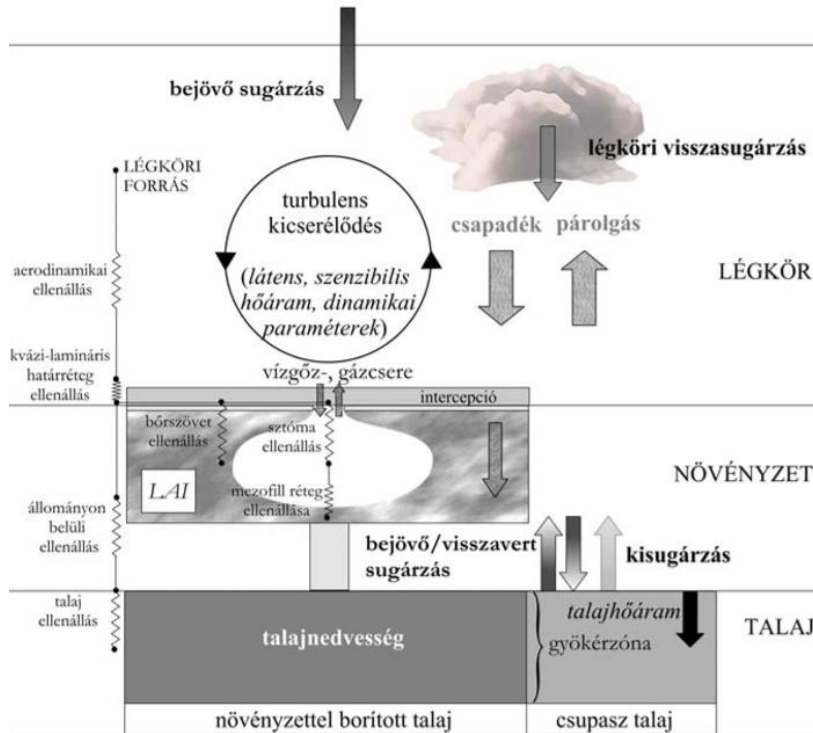
Száraz ülepedés során turbulens áramlással szállítódik a felszínközeli ózon a légkörből a felszínre, ám a különböző felszínek ózonfelfogó képessége más és más (*Juhász, 2006*). Az egyik legelterjedtebb módszer a száraz ülepedés becslésére az úgynevezett „big-leaf”, azaz „nagy-levél” eljárás. Ennek lényege, hogy a vizsgálandó növényzet teljes felszínét egyetlen levélnek tekintik (*Baldocchi et al., 1987*) és ez az egyetlen számérték reprezentálja a teljes növényzet ellenállását.

5.2 Alkalmazott almodulok

Az ülepedési modellekben általánosan alkalmazott almodulok a vízháztartást, sugárzást és az ellenállás hálózatot leíró algoritmusok. Az 5. ábrán az Eötvös Loránd Tudományegyetemen fejlesztett TREX (TRansport–EXchange) ülepedési modell folyamatábrája látható.

A vízháztartási modul a talajban zajló vízforgalmat írja le. Ezt befolyásolja a csapadék, a párolgás, az öntözés, valamint a növényzet által felvett víz mennyisége.

A sugárzási almodul a felszínközeli turbulens folyamatok leírása szempontjából lényeges. Összetevői a látens-, szenzibilis- és a talajhőáram, ezek mind egységnyi felületre vonatkoztatott hőmennyiségek, mértékegységük [W m^{-2}].



5. ábra: A TREX ülepedési modell folyamatábrája (Mészáros et al., 2015b)

Az ülepedést gátló tényezőkre, mint ellenállás tagokra tekintünk. Megkülönböztetünk aerodinamikai ellenállást (R_a), kvázi lamináris határréteg ellenállást (R_b) és felszíni ellenállást (R_c). Ezek összegének reciproka adja meg az ülepedési sebességet (v_d) (Zhang et al., 2006):

$$v_d = (R_a + R_b + R_c)^{-1}. \quad (4)$$

Stabil rétegződés esetén:

$$R_a = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \cdot u + 4,7 \frac{z-d-z_0}{L}. \quad (5)$$

Instabil rétegződés esetén:

$$R_a = \frac{1}{\kappa \cdot u} \ln \left(\frac{1-y}{1-y_0} \cdot \frac{1+y_0}{1+y} \right), \quad (6)$$

$$R_b = \frac{2}{\kappa \cdot u} \cdot \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^p, \quad (7)$$

ahol Sc az adott gázra jellemző Smidt-szám, Pr pedig a kinematikai viszkozitás és a hővezetési együttható aránya, a Prandtl-szám.

$$R_c = \left((R_{st}^{-1} + R_m^{-1}) + R_{soil}^{-1} + R_{cut}^{-1} \right)^{-1}, \quad (8)$$

ahol R_m a mezofill réteg ellenállása, R_{soil} a talaj ellenállása, R_{cut} a kutikulák ellenállása és R_{st} a sztómaellenállás, melynek értékét a következő képlet adja meg:

$$R_{st} = \left(G_{st}(PAR) \cdot f_t(t) \cdot f_e(e) \cdot f_\theta(\theta) \cdot f_{D,i} \right)^{-1}. \quad (9)$$

A 9. egyenletben $f_t(t)$, $f_e(e)$ és $f_\theta(\theta)$ rendre a hőmérséklet- vízgőznyomás- és talajnedvességet leíró stresszfüggvényeket jelöli, $f_{D,i}$ az ózonra és a vízgőzre vonatkozó molekuláris diffúzió aránya, $G_{st}(PAR)$ pedig a sztómavezetést írja le.

Az aerodinamikai és a molekuláris diffúzió a turbulencia által végzett szállítást akadályozza a vizsgált terület fölött. A kvázi lamináris határréteg ellenállása az aktív réteg feletti vékony réteg, mely megakadályozza az ülepedést a szennyezőanyag és a vizsgált anyag molekuláris diffúziójának függvényében (Mészáros *et al.*, 2015a). A felszíni ellenállás további négy csoportra bontható: sztómaellenállás, a kutikulaellenállás a mezofill réteg ellenállása és a talajellenállás.

Az ülepedési sebesség (v_d) és a koncentráció (C) ismeretében számítható az ülepedési fluxus (F):

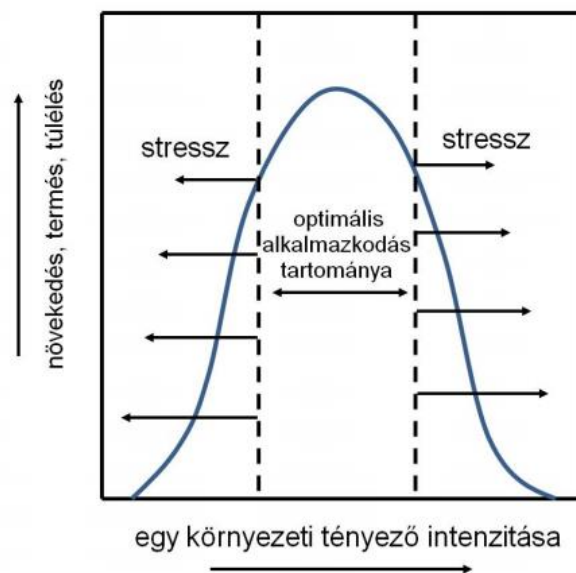
$$F = -v_d C. \quad (10)$$

Az ülepedési sebesség mértékegysége [m s^{-1}], az ózonfluxus mértékegysége [$\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$] és a koncentráció mértékegysége [$\mu\text{g m}^{-2}$].

5.3 Növényi stressz függvények

Modellünket tovább pontosíthatjuk az általunk vizsgált növény stressz függvényeinek ismeretében. Az első definíciót a növényeket érintő stresszt illetően Larcher adta meg 1987-ben: „A stressz egy olyan terheléses állapot, amelyben a növényvel szembeni fokozott igénybevétel a funkciók kezdeti destabilizációját követően egy normalizálódáson át az ellenállóság fokozódásához vezet, majd a tűréshatár túllépésekor tartós károsodást vagy akár pusztulást is okoz” (Bratek, 2012).

Napainkban a stresszre, mint fiziológiai állapotra tekintünk, melybe a stressz faktorok hatására kerül a növény. Megkülönböztetünk természetes és antropogén (emberi tevékenységből eredő) tényezőket. Előbbi a környezeti tényezők hirtelen módosulásait jelenti, mint például a hőhatás, a fagy, a szárazság, a nagy fényintenzitás vagy az ásványi tápanyag hiánya. Utóbbi az emberi tevékenységből eredő tényezők összessége, például savas eső, légszennyező anyagok, fokozott UV-sugárzás, toxikus nehézfémek feldúsulása, vagy talajsavasodás.



6. ábra: Környezeti tényezők hatása az élettani funkciókra
(Forrás: Bratek, 2012)

A 6. ábrán az élettani funkciók, mint a növekedés, termelés és túlélés változásai láthatók környezeti tényezők hatására. Az optimális alkalmazkodás tartományában a

legoptimálisabbak a körülmények a növény számára. Ettől eltávolodva stresszről beszélünk, melynek a növény ellen tud állni, de egy tűréshatárt átlépve már maradandó károk keletkeznek. Haranggörbét mutatnak a hőmérséklet, a megvilágítás, a talajnedvesség és a légnedvesség. A különböző növények igényei eltérőek, de minden növényre jellemző egy legoptimálisabb érték minden paraméterre, amikor a leggyorsabb a növekedés, vagy legoptimálisabb a sztómaműködés. Illetve van egy minimum és egy maximum érték is, melyet túllépve a növény nem képes az egészséges működésre. Mindig a legoptimálisabb érték található az optimális alkalmazkodás tartomány közepén.

Az ózon növényzetre való kiülepedésének meghatározásához kiemelten fontos paraméter a sztómák állapota. Ugyanis minél zártabb egy gázcsereváltás, annál kisebb a rajta keresztül áramló nyomgázáram. A sztómák állapotát viszont lényegesen befolyásolják a meteorológiai paraméterek. Az optimális alkalmazkodás tartományán kívül a növényzet stressz hatása alatt áll és a sztómák működésében rendellenesség lép fel. Megkülönböztetünk hőmérséklet, megvilágítás, oxidatív folyamatok, talajnedvesség, légnedvesség és ózon okozta stresszt.

A sztómák működése továbbá a növény fejlettségi szintjének is függvénye, melyet a fenológiai függvény ír le. Megkülönböztetünk virágzás megkezdése előtti, illetve utáni fenológiai függvényt, ugyanis ezen időpillanat előtt és után máshogy viselkednek a gázcsereváltások. Virágzás előtt:

$$f_{phen} = 1 - \left(\frac{f_a - 1}{f_c}\right) tt, \quad (11)$$

illetve virágzás utáni fenológiai függvény:

$$f_{phen} = 1 - \left(\frac{1 - f_b}{f_d}\right) tt, \quad (12)$$

ahol tt az effektív hőösszeg °C-ban, f_a , f_b , f_c , f_d pedig növényfüggő paraméterek (Pleijel et al., 2007).

A stresszfüggvényekkel leírható a sztómavezetés (g_{sto}) a következő képlettel:

$$g_{sto} = g_{max} [\min(f_{phen}, f_{O_3})] f_{light} \cdot \max\{f_{min}, (f_{temp} f_{VDP})\}, \quad (13)$$

ahol a g_{max} a faj-specifikus maximális sztóma vezetés, f_{phen} a fenológiai függvény, f_{O_3} az ózon stressz, f_{light} a megvilágítás okozta stressz, f_{temp} a hőmérséklet- és f_{VDP} a légnedvesség okozta stressz. A sztómavezetés mértékegysége a következő: [mmol O₃ m⁻² PLA s⁻¹] (Pleijel et al., 2007).

5.3.1 A hőmérsékleti stressz

A hőmérsékleti stresszt okozhatja extrém magas vagy extrém alacsony hőmérséklet egyaránt. Mindkét esetben markáns változás figyelhető meg a növény növekedésében és anyagcseréjében egyaránt. A magas hőmérsékleti konformáció a membránok állapotát és a proteinek szerkezetét károsítja. A növények esetében kiemelt fontosságú a fotoszintézis folyamatosságának fenntartása, egyes folyamatai viszont rendkívül érzékenyek. A hőstressz egyik legelső jeleként a fotoszintetikus funkciók zavarait jegyzik.

A magas hőmérséklet elleni egyik legeredményesebb oltalmat a hősokkproteinek (HSP) nyújtják. Élővilágban elterjedt skálájuk igen széles, tehát nem csak a növényeket védik. Továbbá a szervezetek magas hőmérséklet káros hatásai ellen való patronálása mellett még számos védelmi mechanizmust ellátnak, például a glukózhány vagy egyes nehézfémek okozta terhelés csillapítása.

Alacsony hőmérsékleti stressz esetében megkülönböztetünk további két alkategóriát: a hidegstresszt és a fagystresszt. Míg a hidegstressz a fehérjék, ezáltal az enzimek serkentését, vagy adott esetben gátlását befolyásolja, a fagystressz a membránokat károsítja. A sejtmembránok számos növényben lezajló folyamatok fontos színterei, melyek fagystressz következtében mind módosulnak, például a membrán elveszti iontranszportáló képességét. Ám a legmarkánsabb fenyegetést a sejten belüli jégképződés jelenti (Bratek, 2012).

A hideg éghajlati övezetet kemény, hideg tél és negatív évi középhőmérséklet jellemzi. Hőmérséklet alapján megkülönböztetünk sarkkörüi és sarkvidéki övet. A sarkvidék zord körülményei nem engedik növény- és talajtakaró létrejöttét. A sarkkör természetes növénytakarója a tundra (törpefák, cserjék, lágy szárú virágos növények, zuzmók, mohák) (Jónási, 2011). A tundra két módot is talált a tartósan 0°C alatti

hőmérséklet átvészelésére: ezek a fagy kikerülése, illetve eltűrése. A túlhűlés a fagy kikerülésének egy lehetséges megoldása, mely a következőképpen működik: a sejtben oldott anyagok gyűlnek fel és a nagyobb nyomás következtében lecsökken a fagyáspont a sejtben. A fagyűrész kialakulásához egy úgy nevezett hideg akklimatizációs időszak szükséges, mely időszak alatt védelmi mechanizmusokat ellátó fehérjék halmozódnak fel a növényben. Ezek a fehérjék hatással vannak a sejtfalakra, a fertőző gombákra mérséklésére, illetve az antifreeze proteinek (AFP) kötődnek a kristályosodási góchoz, redukálva annak aktivitását, ezáltal csökkentve a jégkristályok növekedését és az átkristályosodást (Bratek, 2012).

Különböző kutatások kimutatták, hogy a hőstressz a legkülönbözőbb növényfajokat is érinti, mint a kukorica (Lizaso, 2018), rizs (Shi, 2015), mangrove erdő (Pastor-Guzman, 2018) és a hegyi gyep (Cremonese, 2017).

A hőmérsékleti stressz függvény képlete a következő $T_{min} < T < T_{max}$ esetén:

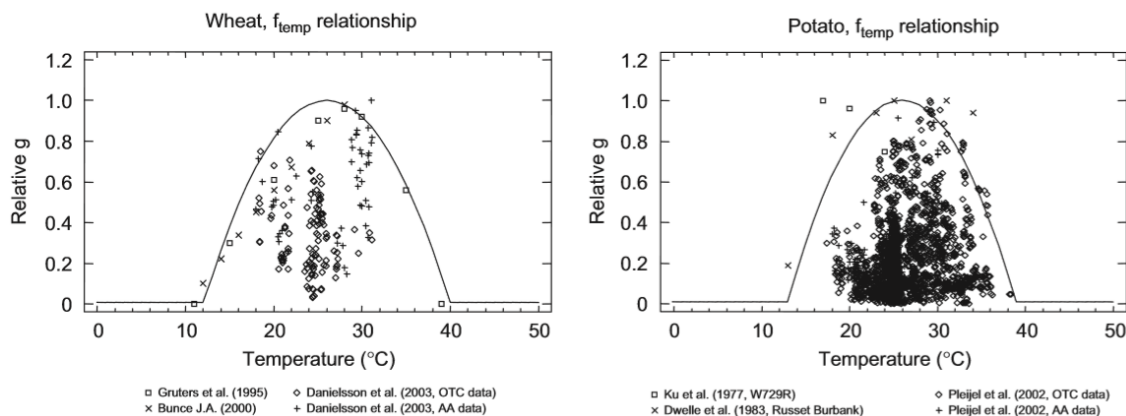
$$f_{temp} = \left(\frac{(T-T_{min})}{(T_{opt}-T_{min})} \cdot \frac{(T_{max}-T)}{(T_{max}-T_{opt})} \right)^{bt}, \quad (14)$$

ha pedig $T \geq T_{max}$ vagy $T \leq T_{min}$ akkor:

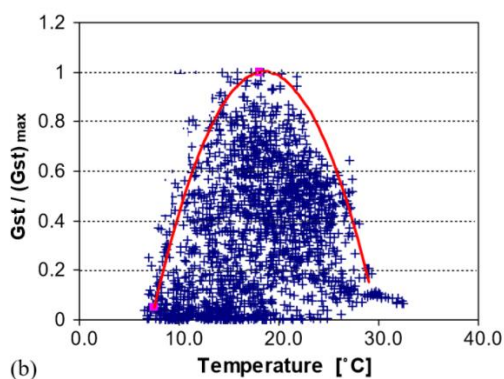
$$f_{temp} = f_{min}, \quad (15)$$

ahol T az aktuális léghőmérséklet, T_{min} és T_{max} az adott növényre jellemző hőmérsékleti határértékek szintén, T_{opt} a növényre jellemző optimális hőmérséklet. Ezen hőmérsékleti értékek mértékegysége °C-ban értendő. A bt pedig az alábbi képlettel határozható meg:

$$bt = \frac{(T_{max} - T_{opt})}{(T_{opt} - T_{min})} \quad (16)$$



7/a. ábra: A hőmérséklet és a sztóma vezetés kapcsolata búzára (balra) és burgonyára (jobbra) (Pleijel et al., 2007)



7/b. ábra: A hőmérséklet és a sztóma vezetés kapcsolata árpa esetében (Gerosa et al., 2004)

A 7 a,b ábrákon a sztóma vezetőképesség látható a hőmérséklet függvényében. Az empirikus úton kirajzolt hőmérsékleti stresszfüggvény látható mind a búza (7/a balra), a burgonya (7/b jobbra) (Pleijel et al., 2007), illetve az árpa (7/b) (Gerosa et al., 2004) vonatkozásában. A függvény alakja haranggörbe. Ahol a függvény felveszi a maximális értéket, ott található az optimális hőmérséklet, ott működnek a legintenzívebben a sztómanyílások. A haranggörbe két szélén olvasható le a minimum, illetve a maximum hőmérséklet, amely határértékeket meghaladva a növény a stressz állapotba kerül. A különböző növények eltérő igényekkel rendelkeznek, így ezek az értékek is eltérnek egymástól. Az 1. táblázat az egyes növények minimum-, maximum, illetve komfort hőmérsékleteit tartalmazza szakirodalmi adatok alapján.

Táblázat 1: A hőmérsékleti minimum, maximum és optimális hőmérsékleti adatok különböző növényekre

Növény	T _{min} [°C]	T _{opt} [°C]	T _{max} [°C]	Hivatkozás
Aleppói fenyő	10	27	38	Calatayud et al., 2016; Büker et al., 2015
Árpa	7	11	30	Gerosa et al., 2004
Brokkoli	5	25	45	Op de Beeck et al., 2010
Burgonya	13	28	39	Pleijel et al., 2007
Búza	12	26	40	Pleijel et al., 2007
	7	34	50	Büker et al., 2007
	13	26	40	Emberson et al., 2000
Bükk	4	21	37	Calatayud et al., 2016
	5	16	33	Büker et al., 2015
	17	25	39	Büker et al., 2007
	13	24	34	Emberson et al., 2000
Bükk (<i>Fagaceae crenata</i>)	7	32	40	Kinose et al., 2014
Cukornád IACSP94-2094 genotípusa	13	32	46	Moura et al., 2018
Cukornád IACSP95-5000 genotípusa	15	32	46	Moura et al., 2018
Durum búza	11	28	45	González-Fernández et al., 2013
Európai bükk (<i>Fagus sylvatica</i>)	12	27	35	Gerosa et al., 2009
Fehér akác (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	10	22	40	Xu et al., 2018
Fekete nyár (<i>Populus nigra</i>)	11	27	36	Gerosa et al., 2009
Fenyves erdő (<i>San Rossore</i>)	6	20	39	Hoshika et al., 2017
Földben termő here (<i>Trifolium subterraneum</i>)	8	22	33	González-Fernández et al., 2010
Havasi cirbolyafenyő	-	6	-	Sicard et al., 2016
Hegyes levelű tölgy (<i>Quercus Serrata</i>)	15	32,5	38	Kinose et al., 2014

Japán fehér bükk	8,8	29,8	50,5	<i>Azuchi et al., 2014</i>
Japán gyertyánszil (<i>Zelkova serrata</i>)	11	27	45	<i>Hoshika et al., 2012</i>
Keleti platán (<i>Platanus orientalis</i>)	8	22	41	<i>Xu et al., 2018</i>
Kenyérbúza	12	28	39	<i>González-Fernández et al., 2013</i>
Kínai kőris (<i>Fraxinus chinensis</i>)	8	22	42	<i>Xu et al., 2018</i>
Kocsányos tölgy (<i>Quercus robur</i>)	12	27	35	<i>Gerosa et al., 2009</i>
Közönséges lucfenyő (<i>Közép-Európa</i>)	0	14	35	<i>Büker et al., 2015</i>
Legelő	12	26	40	<i>Ashmore et al., 2007</i>
Magas kőris (<i>Fraxinus excelsior</i>)	11	27	36	<i>Gerosa et al., 2009</i>
Mediterrán örökzöld fajok	2	23	38	<i>Fares et al., 2013</i>
Nagylevelű nyír (<i>Betulaceae platyphylla</i>) nyári levél	12	28,5	41,5	<i>Kinose et al., 2014</i>
Nagylevelű nyír (<i>Betulaceae platyphylla</i>) tavaszi levél	13,5	25	40	<i>Kinose et al., 2014</i>
Nyárfa	11	27	36	<i>Büker et al., 2015</i>
Nyírfa	-5	20	39	<i>Büker et al., 2007</i>
Olajrepce	5	22	39	<i>Op de Beeck et al., 2010</i>
Skót fenyő	0	20	36	<i>Büker et al., 2015</i>
Szappanfavirágúak (<i>Astronium graveolens</i>)	13	27	40	<i>Cassimiro et al., 2016</i>
Szójabab	22,31	35,01	41,67	<i>Zhang et al., 2017</i>
Szőlőtő	9	32	45	<i>Büker et al., 2007</i>
Tölgy (<i>Quercus Mongolica</i>)	15	33,5	37,5	<i>Kinose et al., 2014</i>
Tölgy (<i>Quercus frainetto</i> – <i>Magas tölgy</i>)	1	23	39	<i>Calatayud et al., 2016</i>
	1	23	39	<i>Fares et al., 2013</i>
	1	23	39	<i>Büker et al., 2015</i>
Tölgy	0	20	35	<i>Büker et al., 2015</i>
Tölgyes erdő (<i>Castelporziano</i>)	6	20	50	<i>Hoshika et al., 2017</i>

5.3.2 Megvilágítás okozta stressz

Megvilágítás alapján megkülönböztetünk intenzív megvilágítást igénylő fénynövényeket és alacsony megvilágítást kedvelő árnyéknövényeket. Ebből következik, hogy a növényeket akkor éri látható fény okozta stresszhatás, ha az optimális alkalmazkodási tartományhoz képest jelentős eltérésű fényintenzitás éri őket. Az erős fényhez alkalmazkodott növény az elnyelt fényenergia minél nagyobb hányadát el kell tudja vezetni, míg a gyenge fényhez igazodott növény a rendelkezésre álló fény minél nagyobb százalékát el kell tudja nyelni. Károsodáshoz vezet, ha a beérkező sugárzás energiafeleslegét a növény nem képes hasznosítani, ugyanis ez hő kibocsájtással jár és a levél felmelegszik. Gyenge megvilágítás esetén, alacsonyabb fokozaton működik a fotoszintézis, mely az oxigén – szén-dioxid egyensúly kibillentésével járhat.

A korábban említett, alacsony hőmérséklet ellen védő AFT molekulák aktivitását a hidegen kívül a nappalok rövidülése is elősegíti a tél érkezésével. Továbbá egyes xantofilok mennyisége is korrelál a fényintenzitás mértékével (*Bratek, 2012*).

A stressz függvény alakja a következőképpen írható le:

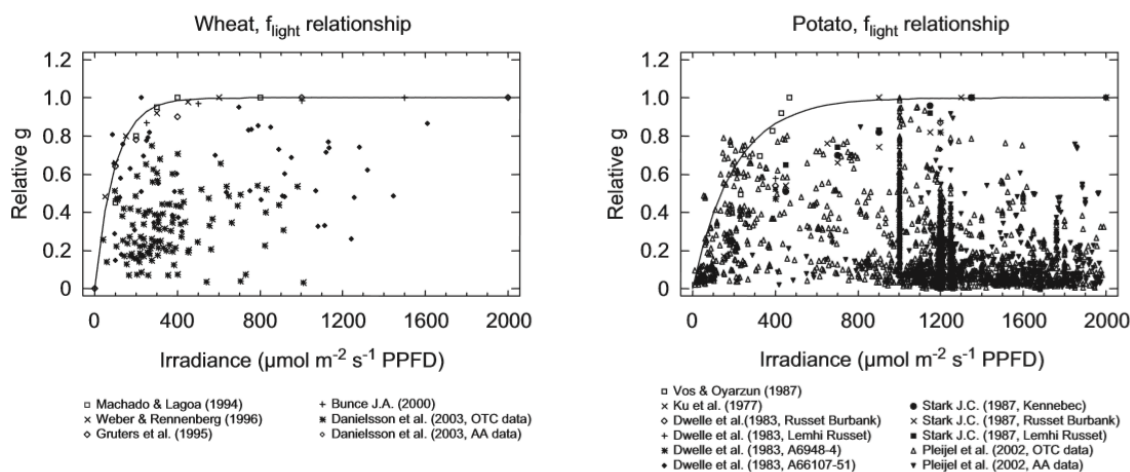
$$f_{light} = 1 - e^{-L \cdot PDF}, \quad (17)$$

ahol L egy faj-specifikus állandó és PDF a fotoszintetikus foton sűrűséget jelenti, amelynek mértékegysége [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$].

A 16. képletben meghatározott f állandó értékei a különböző növények esetében a 2. táblázatban láthatóak:

2. táblázat: sztómafluxus modellekben alkalmazott f_{light} állandó értéke különböző növények esetében

Növény	f_{light}	Forrás
Aleppói fenyő	0,013	<i>Calatayud et al., 2016</i>
	0,013	<i>Büker et al., 2015</i>
Bükk	0,006	<i>Calatayud et al., 2016;</i> <i>Büker et al., 2015</i>
Fehér akác (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	0,005	<i>Xu et al., 2018</i>
Keleti platán (<i>Platanus orientalis</i>)	0,004	<i>Xu et al., 2018</i>
Kínai kőris (<i>Fraxinus chinensis</i>)	0,003	<i>Xu et al., 2018</i>
Közönséges lucfenyő (Észak-Európa)	0,006	<i>Büker et al., 2015</i>
Közönséges lucfenyő (Közép-Európa)	0,01	<i>Büker et al., 2015</i>
Legelő	0,009	<i>Ashmore et al., 2007</i>
Magas tölgy	0,012	<i>Büker et al., 2015</i>
Nyírfa	0,0042	<i>Büker et al., 2015</i>
Skótfenyő	0,006	<i>Büker et al., 2015</i>
Szappanfavirágúak (<i>Astronium graveolens</i>)	0,035	<i>Cassimiro et al., 2016</i>
Tölgy	0,012	<i>Calatayud et al., 2016</i>
	0,003	<i>Büker et al., 2015</i>



8. ábra: Megvilágítás okozta stressz függvény ábrázolása mérések alapján a búza (balra) és a burgonya (jobbra) esetében (Pleijel et al., 2007)

A 8. ábrán a sztóma vezetőképesség látható a besugárzás függvényében a búza (balra) és a burgonya (jobbra) esetében. A két görbéről az olvasható le, hogy a mindkét kultúrnövény fénykedvelő növény, ezért nincs felső küszöbértéke a besugárzásnak, ami felett már káros lenne a fény mennyisége ennek a két növénynek a számára. A búza görbéje a kezdetnél meredekebb, ez azt jelenti, hogy napfelkelte után hamarabb reagál a megváltozott fényviszonyokra (Pleijel et al., 2007).

5.3.3 Oxidatív stressz

Bár az oxigén az aerob, földi élet kulcsfontosságú szereplője, mégis jó néhány romboló mechanizmus okozója két párosítatlan elektronja. Az oxigén egyértékű redukció során először szuperoxid, majd hidrogén-peroxid, hidroxil gyök, végül víz keletkezik. A hidrogén-peroxid könnyedén áthatol a membránokon, így a reakció sorozat nem korlátozódik a sejtekben, térben és időben akadálymentesen elterjed. A szinglet oxigén (a két elektron spinje ellentétes) és a hidroxil-gyök keletkezése fénystresszhez kötődik és rendkívül reaktánsak, kölcsönhatásba lépnek vízzel és a sejt más komponenseivel egyaránt. A hidroxil gyök minden szerves molekulával reakcióba lép. A szuperoxid-anion gyök és a hidrogén-peroxid felelősek olyan láncreakciók beindításáért, melyek végén képes gyökök keletkeznek (Bratek, 2012). Oxidatív stresszt okoz az ózon, ami a tüdőt irritálva gyulladást és szöveti sérülést okoz (Sunil, 2012). Az ózonkoncentráció növekedése a légkörben továbbá a mezőgazdaságban termésvesztést eredményez (Labanowska, 2015).

Az előbbi szabályozatlan oxidációs láncreakcióval az antioxidánsok veszik fel a versenyt, melyek nem alakulnak gyökké az aktív oxigén formákkal való reakcióba lépést követően (*Bratek, 2012*).

5.3.4 Légnedvesség okozta stressz

A relatív nedvesség a levegő tényleges párányomása és az adott hőmérséklethez tartozó telítési párányomás közötti arány [2], vagyis megadja, hogy a lehetséges víztartalom hány százaléka van a levegőben. A specifikus nedvesség egy dimenzió nélküli mérőszám, ami megadja az 1 kg nedves levegőben levő vízgőz tömegét. A légköri víztartalom rendkívül fontos paraméter, hiszen befolyással van a felszín és a légkör közti sugárzás- és energiaháztartásra. Előbbi esetben mind a rövid- és hosszuhullámú tartományban jelentős elnyelési sávokkal rendelkezik, utóbbi esetben a látens hőáramon keresztül hat a felszínre (*Mészáros, 2015b*).

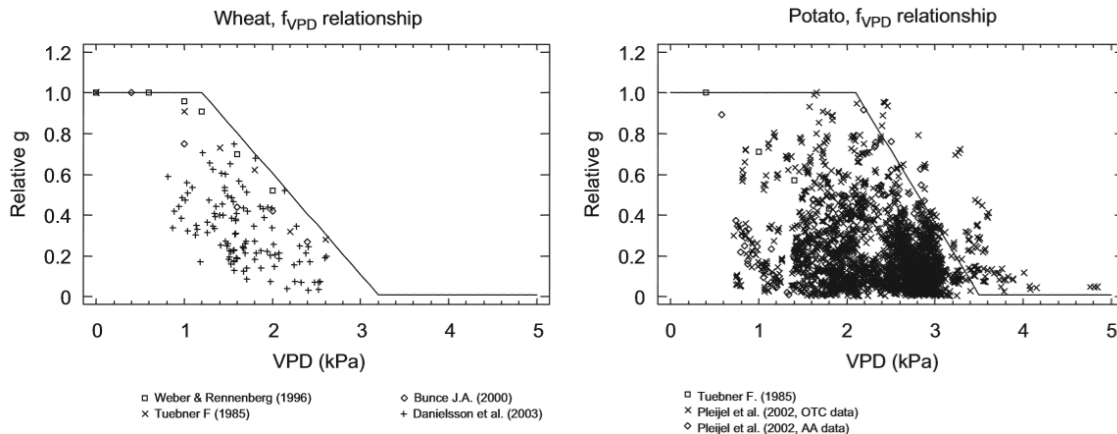
Az alsóbbrendű növények nem rendelkeznek szabályozott vízfelvétellel és leadással. A telepes növények a nedves aljzatról felveszik a vizet és megduzzadnak. Egyes algák, zuzmók és mohák számára a légnedvesség is felvehető, így annak mennyisége meghatározó ezen növények számára. Vízleadásuk elsősorban a környezeti feltételektől függ. A magasabb rendű szárazföldi növények kutikulamentes gyökerükkel veszik fel a vizet, aminek leadását a kutikula és a szabályozott sztomatozmozgás csökkenti. A növény talaj feletti részein át minimális a vízfelvétel (*Ördög és Molnár, 2011*).

Minél magasabb a hőmérséklet, a levegő annál nagyobb mennyiségű vizet képes magába felvenni, így ez a két paraméter erősen függ egymástól, így elengedhetetlen az két tényező együttes vizsgálata Több tanulmány (pl. *Gamage, 2017; Liu et al., 2017*) a hőmérséklet és a páratartalom okozta stressz védőmechanizmusát térképezték fel. A magas hőmérséklet és a páratartalom okozta stressz toleranciáját segíti a növényekben a Gm1-MMP, amely továbbá részt vesz a növények növekedésében és fejlődésében is (*Liu et al., 2017*).

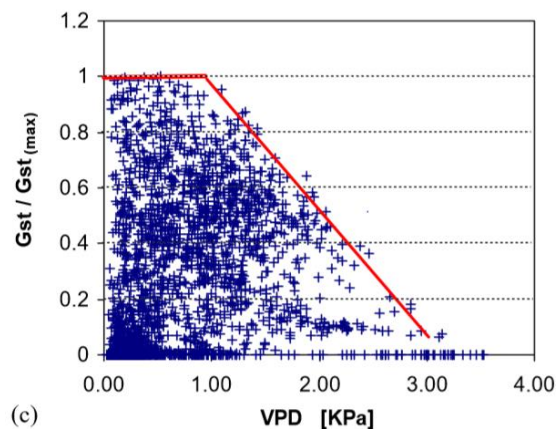
A *VPD* (vapour pressure deficit) egy olyan mérőszám, amely megmutatja a levegő tényleges és maximálisan felvehető nedvességtartama közti különbséget. Minél nagyobb ez a mérőszám, annál nagyobb a növényre gyakorolt stressz mértéke. A

modellekben a légnedvesség okozta hatásokat ezen értékek segítségével építhetjük be (18. egyenlet). A légnedvességi függvény képe a 9. ábrán látható.

$$f_{VPD} = \min \left\{ 1, \max \left[f_{min}, \frac{(1 - f_{min})(VPD_{min} - VPD)}{(VPD_{min} - VPD_{max})} + f_{min} \right] \right\}. \quad (18)$$



9/a ábra: A légnedvesség okozta stressz függvény ábrázolása mérések alapján a búza (balra) és a burgonya (jobbra) esetében mérések alapján (Pleijel et al., 2007)



9/b ábra: A légnedvesség okozta stressz függvény ábrázolása mérések alapján az árpa esetében (Gerosa et al., 2004)

Megadható egy minimum és egy maximum VPD érték, melyet túllépve a növény stressz állapotba kerül és nem működnek megfelelően a sztómányílásai. Az különböző növények esetében viszont ez a szám más-más érték. A 3. táblázat erről nyújt áttekintést.

3. Táblázat: VDP minimum és maximum paraméterek különböző növények esetében

Növény	VDP _{MIN} [kPa]	VDP _{MAX} [kPa]	Hivatkozás
Aleppói fenyő	4	2,2	<i>Calatayud et al., 2016</i>
	3,2	1,0	<i>Büker et al., 2015</i>
Brokkoli	4,3	1,7	<i>Op de Beeck et al., 2010</i>
Burgonya	3,5	2,1	<i>Pleijel et al., 2007</i>
Búza	3,2	1,2	<i>Pleijel et al., 2007</i>
	6,9	2,3	<i>Büker et al., 2007</i>
	2,8	0,9	<i>Emberson et al., 2000</i>
Bükk	4	1	<i>Calatayud et al., 2016</i>
	3,1	1,0	<i>Büker et al., 2015</i>
	3,0	1,1	<i>Büker et al., 2007</i>
	3,1	1,1	<i>Emberson et al., 2000</i>
Bükk (<i>Fagaceae crenata</i>)	6,1	1,8	<i>Kinose et al., 2014</i>
Cukornád IACSP94-2094 genotípusa	6,82	1,6	<i>Moura et al., 2018</i>
Cukornád IACSP95-5000 genotípusa	5,40	1,93	<i>Moura et al., 2018</i>
Durum búza	4,9	3,1	<i>González-Fernández et al., 2013</i>
Fehér akác (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	5,5	3	<i>Xu et al., 2018</i>
Fenyves erdő (<i>San Rossore</i>)	4,2	0,6	<i>Hoshika et al., 2017</i>
Földben termő here (<i>Trifolium subterraneum</i>)	4,3	2,2	<i>González-Fernández et al., 2010</i>
Japán fehér bükk	12,9	1,27	<i>Azuchi et al., 2014</i>
Japán gyertyánszil (<i>Zelkova serrata</i>)	4,9	1,1	<i>Hoshika et al., 2012</i>
Keleti platán (<i>Platanus orientalis</i>)	5	1,5	<i>Xu et al., 2018</i>

Kenyérbúza	4,6	3,2	<i>González-Fernández et al., 2013</i>
Kínai kóris (<i>Fraxinus chinensis</i>)	4	1,5	<i>Xu et al., 2018</i>
Közönséges lucfenyő (Észak-Európa)	2,8	0,8	<i>Büker et al., 2015</i>
Közönséges lucfenyő (Közép-Európa)	3,0	0,5	<i>Büker et al., 2015</i>
Legelő	3,0	1,3	<i>Ashmore et al., 2007</i>
Mediterrán örökzöld fajok	4	2,2	<i>Fares et al., 2013</i>
Nagylevelű nyír (<i>Betulaceae platyphylla</i>) nyári levél	4,4	1,7	<i>Kinose et al., 2014</i>
Nagylevelű nyír (<i>Betulaceae platyphylla</i>) tavaszi levél	4,5	2,2	<i>Kinose et al., 2014</i>
Nyárfa	3,7	2,1	<i>Büker et al., 2015</i>
Nyírfa	2,7	0,5	<i>Büker et al., 2015</i>
	3,0	0,9	<i>Büker et al., 2007</i>
Olajrepce	3,5	1,5	<i>Op de Beeck et al., 2010</i>
Skót fenyő	2,8	0,6	<i>Büker et al., 2015</i>
Szappanfavirágúak (<i>Astronium graveolens</i>)	3,9	1,1	<i>Cassimiro et al., 2016</i>
Szójabab	6,053	4,187	<i>Zhang et al., 2017</i>
Szőlőtő	6,2	0,6	<i>Büker et al., 2007</i>
Tölgy	4	2,2	<i>Calatayud et al., 2016; Fares et al., 2013</i>
	3,25	1,0	<i>Büker et al., 2015</i>
Tölgy (<i>Quercus frainetto</i> – Magas tölgy)	4,0	2,2	<i>Büker et al., 2015</i>
Tölgy (<i>Quercus Mongolica</i> – Mongol tölgy)	4,6	2,4	<i>Kinose et al., 2014</i>
Tölgy (<i>Quercus Serrata</i> – Hegyes levelű tölgy)	4,2	2,3	<i>Kinose et al., 2014</i>
Tölgyes erdő (Castelporziano)	3,9	0,6	<i>Hoshika et al., 2017</i>

5.3.5 Talajnedvesség okozta stressz

A talajnedvesség mértéke nagymértékben meghatározza a növények állapotát, kihatással van fejlődésük minden fázisára. Talajnedvesség okozta stressz két esetben fordulhat elő: túl kevés vagy túl sok vízmennyiség esetén. A szárazság az egyik legveszélyesebb tényező a növények számára, mivel molekuláris, sejt- és szervi szinteken is kihat a növényre (*Li and Liu, 2016*).

A árasztással termelt rizs fajok esetében a növekedés minden szakaszára különböző elváltozások jellemzőek aszályos stressz esetén. A nagy vízmennyiség az erőforrások megszerzésének alacsonyabb képességét kompenzálja (*Singh, 2017*). Rizs esetén megkülönböztetjük a szezon elején, közepén, illetve végén fellépő szárazságot. Mindhárom növekedési stádiumban más morfológiai elváltozások jellemzőek. A fejlődés korai szakaszában szárazsággal érintett növények fejlődése lassabb, így eltolódik az átültetés ideje. A szezon végi szárazság leginkább a későn érő fajokat veszélyezteti (*Fukai and Cooper, 1995*). Egyéb időközben fellépő változások a következők lehetnek: gyökér megvastagodás a nagyobb tápanyagfelszívás érdekében a talaj mélyebb rétegeiből is, ez leginkább a fűszeres rizsre jellemző. Továbbá alacsonyabb növényi magasság, légcserenyílás záródása, a levél feltekeredése és előregedése (*Singh, 2017*). A kisebb növények terméshozama alacsonyabb, amely kiterjedt esetben akadályozza a világtermesztést, további globális problémákat okozva (*Li and Liu, 2016*). A szárazság következtében a nem megfelelően működő légcserenyílások a fotoszintézis és a vízfelszívás hatékonyságát korlátozza. Az aszályállapot egyik legfőbb következménye a sejtekben való reaktív oxigénfajok (ROS – reactive oxygen species) túltermelése, amely a sejtmembránok rombolásához, valamint nukleinsavak és enzimek lebomlásához vezet. Ebből következik az alacsony növénymagasság és a termelékenység csökkenése.

A szárazság ellen biokémiai és fiziológiai védelmi mechanizmusok segítik a növényeket több szerveződési szinten is. A melatonin, abszcizin sav és szalicilsav is a szárazság túrést segítik. A légcserenyílások megfelelő működésével a növényi vízvesztés lecsökken és a gyökerek megvastagodásával nagyobb mennyiségű vízfelvétel lehetséges. A reaktív oxigénfajok mennyiségét enzimatis és nem-

enzimatis rendszerek is szabályozzák. További szárazságtűrő mechanizmus a sejtmembránok stabilitása (*Li and Liu, 2016*).

5.3.6 Ózon okozta stressz

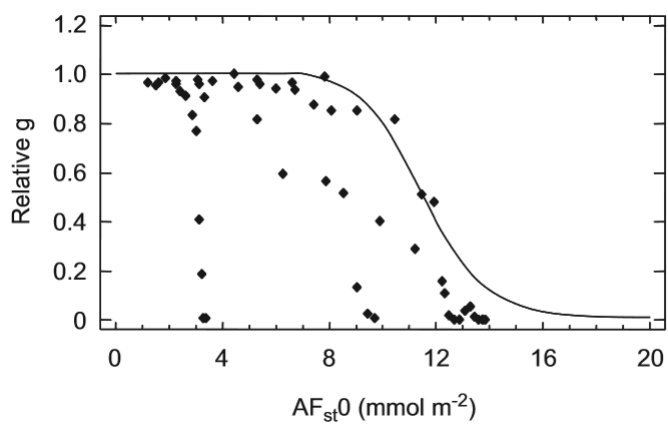
Egy korábban említett, növényi stressz faktorok egyik lehetséges csoportosítása a természetes és az antropogén forrásból származó tényezők megkülönböztetése. Utóbbi kategóriába tartoznak a légszennyező anyagok, melyek koncentrációja egy adott érték felett a növények stresszelését okozza. Ilyen légszennyező anyagok például a kén- és nitrogén-oxidok, valamint az ózon is (*Bratek, 2012*). Jelentős mértékben függ a sztómák állapotától, hogy mennyi légszennyező anyag jut a növénybe. A többi stressz faktorokhoz hasonlóan egy küszöbérték fölött az ózon is működési zavarokat okoz a növények gázcsere nyílásainak működésében (*Hoshika, 2013*). Mivel az ózon nem oldódik vízben, a növényben más anyagokkal, mint fehérjék és lipidek, lép reakcióba, melynek következtében kilyukadnak a sejtfaalak.

Az ózon stressz függvényét a tavaszi búzára a tavaszi búzára a következő képlet írja le:

$$f_{O_3} = \left(\left(1 + \left(\frac{AF_{st0}}{11.5} \right)^{10} \right)^{-1} \right), \quad (19)$$

A burgonyára vonatkozó ózon okozta stressz függvény képlete:

$$f_{O_3} = \left(\left(1 + \left(\frac{AOT0}{40} \right)^5 \right)^{-1} \right). \quad (20)$$



10. ábra: Az ózonnak való hosszú távú kitettség hatása (Pleijel et al., 2007)

A 10. ábrán a búza hosszú távon ózonnak kitett hatását ábrázolja. Látható, hogy egy bizonyos érték fölött a sztomák állapota hirtelen és drasztikusan lecsökken és a növény korai előregedését, majd halálát okozza.

6 Összefoglalás

Dolgozatomban áttekintettem az ózon bioszférára, illetve épített környezetre gyakorolt hatását, kifejezetten a növények stresszfüggvényeire koncentrálva. A sztómák állapotát a meteorológiai paraméterek nagymértékben befolyásolják és ez kifejezetten fontos a sztómafluxus meghatározásakor. Minél nyitottabb állapotban találhatók a gázcserenyílások, annál nagyobb nyomgázáram mérhető. A környezeti paraméterek változásához a növények bizonyos fokig képesek alkalmazkodni, ezt hívjuk optimális alkalmazkodási tartománynak. A komfort tartománytól távolodva a növény egyre nagyobb stressz hatásának van kitéve, ami visszahat a növényben lezajló funkciókra, többek közt a gázcserenyílások működtetésére. Tartósan fennálló stressznek kitéve a növények elvesztik regeneráló képességüket, amely idő előtti elöregedésükhöz vezet.

A szakdolgozatban, szakirodalmi adatok alapján részletes összefoglalást adtam az egyes stresszfüggvényekben használt és adott növényekre jellemző paramétereikről. Ezen értékek ülepedési modellek fejlesztéséhez és alkalmazásához nyújthatnak segítséget.

7 Köszönetnyilvánítás

Rengeteg köszönettel tartozom témavezetőmnek dr. habil. Mészáros Róbertnek, aki felkeltette érdeklődésemet a téma iránt és fáradhatatlanul koordinálta munkámat a legnagyobb hozzáértéssel, precízséggel és odaadással.

Továbbá köszönöm a családomnak és szeretteimnek a sok támogatást és mindazt, amit eddig értem tettek. Külön köszönet Kövesi Ákosnak a töretlen biztatásért és azért, hogy mindig mellettem áll.

8 Hivatkozások

- [1.] *Ashmore M.R., Büker P., Emberson L.D., Terry A.C. and Toet S. (2007):* Modelling stomatal ozone flux and deposition to grassland communities across Europe. *Environmental Pollution* 146, 659-670.
- [2.] *Azuchi F., Kinose Y., Matsumura T., Kanomata T., Uehara Y., Kobayashi A., Yamaguchi M. and Izuta T. (2014):* Modelling stomatal conductance and ozone uptake of *Fagus crenata* grown under different nitrogen loads. *Environmental Pollution* 184, 481-487.
- [3.] *Baldocchi D. D., Hicks B. B. and Camara P. (1987):* A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated canopies. *Atmospheric Environment* 21, 91–101.
- [4.] *Borhidi A.(1991):* Az ózon hatása a növényzetre. *Időjárás* 95. évf. 2-3. szám (március-június)
- [5.] *Bozó L., Mészáros E. and Molnár Á. (2006):* Levegőkörnyezet, Modellezés és megfigyelés. *Akadémia Kiadó*
- [6.] *Bratek Z., Fodor F., Kirákyi I., Nyitrai P., Parádi I., Rác I., Rudnóy Sz., Sárvári É., Solti Á., Szigeti Z. and Tamás L. (2012):* A növényi anyagcsere élettana, 10. fejezet, *Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest. Elérhető:* <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/ANovenyiAnyagcsere/book.pdf>
- [7.] *Büker P., Emberson L.D., Ashmore M.R., Cambridge H.M., Jacobs C.M.J., Massman W.J., Müller J., Nikolov N., Novak K., Oksanen E., Schaub M. and de la Torre D. (2007):* Comparison of different stomatal conductance algorithms for ozone flux modelling. *Environmental Pollution* 146, 726-735.
- [8.] *Büker P., Feng Z., Uddling J., Briolat A., Alonso R., Braun S., Elvira S., Gerosa G., Karlsson P.E., Le Thiec D., Marzuoli R., Mills G., Oksanen E., Wieser G., Wilkinson M. and Emberson L.D. (2015):* New flux based dose response relationships for ozone for European forest tree species. *Environmental Pollution* 206, 163-174.
- [9.] *Calatayud V., Diéguez J.J., Sicard P., Schaub M. and De Marco A. (2016):* Testing approaches for calculating stomatal ozone fluxes from passive samplers. *Science of the Total Environment* 572, 56-67.

- [10.] Cassimiro J.C., Moura B.B., Alonso R., Meirelles S.T. and Moraes R.M. (2016): Ozone stomatal flux and O₃ concentration-based metrics for *Astronium graveolens* Jacq., a Brazilian native forest tree species. *Environmental Pollution* 213, 1007-1015.
- [11.] Cremonese E., Filippa G., Galvano M., Siniscalco C., Oddi L., Morra di Cella U. and Migliavacca M (2017): Heat wave hinders green wave: The impact of climate extreme on the phenology of a mountain grassland. *Agricultural and Forest Meteorology* 247, 320-330.
- [12.] Czender Cs., (2007): A magyarországi erdőállományokat érő ózonerhelés becslése. *Diplomamunka, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest*
- [13.] Dingenen R.V., Dentener F. J., Raes F., Krol M. C., Emberson L. and Cofala J., (2009): The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation. *Atmospheric Environment* 43, 604-618.
- [14.] Emberson L.D., Ashmore M.R., Cambridge H.M., Simpson D. and Tuovinen J.-P. (2000): Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environmental Pollution* 109, 403-413.
- [15.] Esposito M., Ferreira M., Sant'Anna S., Domingos M. and Souza S. (2009): Relationship between leaf antioxidants and ozone injury in *Nicotiana tabacum* 'Bel-W3' under environmental conditions in Sao Paulo, SE – Brazil. *Atmospheric Environment* 43, 619-623.
- [16.] Fares S., Matteucci G., Scarascia Mugnozza G., Morani A., Calfapietra C., Salvatori E., Fusalo L., Manes F. and Loreto F. (2013): Testing of models of stomatal ozone fluxes with field measurements in a mixed Mediterranean forest. *Atmospheric Environment* 67, 424-251.
- [17.] Fuhrer J., Skarby L. and Ashmore M. R. (1997): Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environmental Pollution* 97, 91-106.
- [18.] Fukai, S. and Cooper, M. (1995): Development of Drought-Resistant Cultivars Using Physio-Morphological Traits in Rice. *Field Crops Research*, 40, 67-86.
- [19.] Gamage J.C.P.H., Al-Mahaidi R., Wong B. and Ariyachandra M.R.E.F. (2017): Bond characteristics of CFRP-strengthened concrete members subjected to cyclic temperature and mechanical stress at low humidity. *Composite Structures* 160, 1051-1059.
- [20.] Gelencsér A., Molnár Á. and Imre K. (2012): Levegőkörnyezet és az emberi tevékenység, *Pannon Egyetem*

- [21.] Gerosa G., Marzouoli R., Desotgiu R., Bussotti F. and Ballarin-Denti A. (2009): Validation of the stomatal flux approach for the assessment of ozone visible injury in young forest trees. Results from the TOP (transboundary ozone pollution) experiment at Curno, Italy. *Environmental Pollution* 157, 1497-1505.
- [22.] Gerosa G., Marzuoli R., Cieslik S. and Ballarin-Denti A. (2004): Stomatal ozone fluxes over a barley field in Italy. „Effective exposure” as a possible link between exposure- and flux-based approaches. *Atmospheric Environment* 38, 2421-2432.
- [23.] González-Ferdinández I., Bermejo V., Elvira S., Sanz J., Gimeno B.S. and Alonso R. (2010): Modelling annual pasture dynamics: Application to stomatal ozone deposition. *Atmospheric Environment* 44, 2507-2517.
- [24.] González-Ferdinández I., Bermejo V., Elvira S., Torre de la D., González A., Navarrete L., Sanz J., Calvete H., García-Gómez H., López A., Serra J., Lafarga A., Armesto A.P., Calvo A. and Alonso R. (2013): Modelling ozone stomatal flux of wheat under mediterranean conditions. *Atmospheric Environment* 67, 149-160.
- [25.] Hoshika Y., Omasa K. and Paoletti E. (2013): Both ozone exposure and soil water stress are able to induce stomatal sluggishness. *Environmental and Experimental Botany* 88, 19-23.
- [26.] Hoshika Y., Fares S., Savi F., Gruening C., Goded I., De Marco A., Sicard P. and Paoletti E. (2017): Stomatal conductance models for ozone risk assessment at canopy level in two Mediterranean evergreen forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 234-235, 212-221.
- [27.] Hoshika Y., Paoletti E. and Omasa K. (2012): Parametrization of *Zelkova serrata* stomatal conductance model to estimate stomatal ozone uptake in Japan. *Atmospheric Environment* 55 271-278.
- [28.] Hunag Y.Z., Sui L.H., Wang W., Geng C.M. and Yin B.H. (2012): Visible injury and nitrogen metabolism of rice leaves under ozone stress, and effect on sugar and protein contents in grain. *Atmospheric Environment* 62, 433-440.
- [29.] Janzik I., Preiskowski S. and Kneifel H. (2005): Ozone has dramatic effects on the regulation of the prechorismate pathway on tobacco (*Nicotiana tabacum* L. cv. Bel W3). *Planta* 223, 20-27.
- [30.] Jónás I., Kovács L. and Vízvári A. (2011): Földrajz 7. Kontinensek földrajza. *Mozaik kiadó, Szeged*, 144-146.o.

- [31.] *Juhász Á.* (2006): Az ózonterhelés becslése csatolt terjedési-ülepedési modellel. *Diplomamunka, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest*
- [32.] *Kinose Y., Azuchi F., Uehara Y., Kanomata T., Kobayashi A., Yamaguchi M. and Izuta T.* (2014): Modelling of stomatal conductance to estimate stomatal ozone uptake by *Fagus crenata*, *Quercus serrata*, *Quercus mongolica var. crispula* and *Betula platyphylla*. *Environmental Pollution* 194, 235-245.
- [33.] *Komjáthy E.* (2008): Ülepedési modell fejlesztése és alkalmazása az ózonterhelés becslésére. *Diplomamunka, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest*
- [34.] *Labanowska M., Kudziel M. and Filek M.* (2015): Changes of paramagnetic species in cereal grains upon short-term ozone action as a marker of oxidative stress tolerance. *Journal of Plant Physiology* 190, 54-66.
- [35.] *Lagzi I., Mészáros R., Gelybó Gy. and Leelőssy Á.* (2013): Atmospheric Chemistry. *Eötvös Loránd University, Budapest*, Elérhető: <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/AtmosphericChemistry/index.html>
- [36.] *Li X. and Liu F.* (2016): Drought Stress Tolerance in Plants – Chapter 2: Drought Stress Memory and Drought Stress Tolerance in Plants: Biochemical and Molecular Basis. *Department of Plant and Environmental Sciences*
- [37.] *Lin C. and Hsu S.* (2015): Deposition velocities and impact of physical properties on ozone removal for buildings materials. *Atmospheric Environment* 101, 194-199.
- [38.] *Liu S., Liu Y., Jia Y., Wei J., Wang S., Liu XX., Zhou Y., Zhu Y., Gu W and Ma H.* (2017): Gm1-MMP is involved in growth and development of leaf and seed, and enhances tolerance to high temperature and humidity stress in transgenic *Arabidopsis*. *Plant Science* 259, 48-61.
- [39.] *Lizaso J.I., Ruiz-Ramos M., Rodríguez L., Gabaldon-Leal C., Oliveira J.A., Lorite I.J., Sanchez D., García E. and Rodríguez A.* (2018): Impact of high temperatures in maize: Phenology and yield components. *Field Crops Research* 216, 129-140.
- [40.] *Ludányi E.* (2015): Légszennyező anyagok ülepedésének modellezése városi környezetben. *Diplomamunka, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest*
- [41.] *Ludányi E. L.* (2008): Légszennyező anyagok ülepedésének modellezése városi környezetben. *Diplomamunka, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest*

- [42.] Mészáros R. (2002): A felszínközeli ózon száraz ülepedésének meghatározása különböző felszín típusok felett. *Doktori értekezés, Eötvös Lóránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék, Budapest*
- [43.] Mészáros R., Leelőssy Á. és Lagzi I.: Levegőkémiai modellezés az ELTE Meteorológiai Tanszékén in Pongrácz R., Mészáros R. és Kis A. (2015a): Aktuális kutatások az ELTE Meteorológiai Tanszékén. *Egyetemi meteorológiai füzetek*, No. 26.
- [44.] Mészáros R., Ludányi E., Leelőssy Á.: A felszínközeli ózon száraz ülepedésének modellezése városi környezetben in Pongrácz R., Mészáros R. és Kis A. (2015b): Aktuális kutatások az ELTE Meteorológiai Tanszékén. *Egyetemi meteorológiai füzetek*, No. 26.
- [45.] Moura B.B., Hoshika Y., Ribeiro R.V. and Paoletti E. (2018): Exposure- and flux-based assessment of ozone risk to sugarcane plants. *Atmospheric Environment* 176, 252-260.
- [46.] Musselman R. C., Lefohn A. S., Massman W. J. and Heath R. L. (2006): A critical review and analysis of the use of exposure and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects. *Atmospheric Environment* 40, 1869-1888.
- [47.] Op de Beek M., De Bock M., Vandermeiren K., de Temmerman L. and Ceulemans R. (2010): A comparison of two stomatal conductance models for ozone flux modelling using data from two Brassica species. *Environmental Pollution* 158, 3251-3260.
- [48.] Ördög V. és Molnár Z. (2011): Növényélettan. *Debreceni Egyetem, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Pannon Egyetem*
- [49.] Pastor-Guzman J., Dash J. and Atkinson P.M. (2018): Remote sensing of mangrove forest phenology and its environmental drivers. *Remote Sensing of Environment* 205, 71-84.
- [50.] Pleijel H., Danielsson H., Emberdon L., Ashmore M.R. and 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.
- [51.] Sant'Anna S., Esposito M., Domingos M. and Souza S. (2008): Suitability of *Nicotiana tabacum* 'Bel W3' for biomonitoring ozone in Sao Paulo, Brazil. *Environmental Pollution* 151, 389-394.

- [52.] *Sharma S., Sharma P. and Khare M. (2017): Photo-chemical transport modelling of tropospheric ozone: A review. Atmospheric Environment 159, 34-54.*
- [53.] *Shen J. and Gao Z. (2018): Ozone removal on building material surface: A literature review. Building and Environment 134, 205-217.*
- [54.] *Shi P., Tang L., Lin C., Liu C., Liu L., Wang H., Cao W. and Zhu Y. (2015): Modelling the effects of post-anthesis heat stress on rice phenology. Field Crops Research 177, 26-36.*
- [55.] *Sicard P., De Marco A., Dalstein-Richier L., Tagliaferro F., Renou C. and Paoletti E. (2016): An epidemiological assessment of stomatal ozone flux-based critical levels for visible ozone injury in Southern European forests. Science of the Total Environment 541, 729-741.*
- [56.] *Singh B., Reddy K. R., Redona E. D. and Walker T. (2017): Screening of Rice Cultivars for Morpho-Physiological Responses to Early-Season Soil Moisture Stress. Rice Science 24 (6): 322-335.*
- [57.] *Song F., Shin J. Y., Jusino-Atresino R. and Gao Y. (2011): Relationship among the springtime ground-level NO_x, O₃ and NO₃ in the vicinity of highways in the US East Coast. Atmospheric Pollution Research 2, 374-383.*
- [58.] *Sunil V.R., Patel-Vayas K., Shen J., Laskin J.D. and Laskin D.L. (2012): Classical and alternative macrophage activation in the lung following ozone-induced oxidative stress. Toxicology and Applied Pharmacology 263, 195-202.*
- [59.] *Thomson E.M., Pilon S., Guénette J., Williams A. and Holloway A.C. (2018): Ozone modifies the metabolic and endocrine response to glucose: Reproduction of effects with the stress hormone corticosterone. Toxicology and Applied Pharmacology 342, 31-38.*
- [60.] *Vergé X., Chapuis A. and Delpoux M. (2002): Bioindicator reliability: the example of Bel W3 tobacco (*Nicotiana tabacum L.*). Environmental Pollution 118, 337-349.*
- [61.] *Xu Y., Shang B., Yuan X., Feng Z. and Calatayud V. (2018): Relationships of CO₂ assimilation rates with exposure- and flux-based O₃ metrics in three urban tree species. Science of the Total Environment 613-614, 233-239.*
- [62.] *Zhang L., Vet R., Brook J. R. and Legge A. H. (2006): Factors affecting stomatal uptake of ozone by different canopies and a comparison between dose and exposure. Science of the Total Environment 370, 117-132.*

- [63.] *Zhang W., Geng Z., Wang X., Liu X. and Hu E. (2017): Quantification of ozone exposure- and stomatal uptake-yield response relationships for soybean in Northeast China. Science of the Total Environment 599-600, 710-720.*

Internetes hivatkozások

- [1.] *European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) (2016): Air pollution trend sin the EMEP region between 1990 and 2012. Elérhető: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2016/AIR/Publications/Air_pollution_trends_in_the_EMEP_region.pdf*
- [2.] *Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) Ismerettár, Elérhető: http://www.met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_alapismeretek/*
- [3.] *Levegőkémia jegyzet, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Elérhető: http://nimbus.elte.hu/oktatas/oktatasi_anyagok/levegokemia/08_Troposzferikus_ozon.pdf*

NYILATKOZAT

Név: Lázár Krisztina

ELTE Természettudományi Kar, szak: Földtudományi BSc, Meteorológus szakirány

NEPTUN azonosító: HJRFXP

Szakdolgozat címe: Az ózon által okozott környezeti terhelés meghatározása

A **szakdolgozat** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2018.

a hallgató aláírása