

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

LÉGSZENNYEZŐ ANYAGOK ÜLEPEDÉSÉNEK MODELLEZÉSE VÁROSI KÖRNYEZETBEN



DIPLOMAMUNKA

Készítette:

Ludányi Erika Lilla

Meteorológus mesterszakos hallgató

Témavezetők:

Dr. Mészáros Róbert

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék

Leelőssy Ádám

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék

Steiner Márk

Budapesti Corvinus Egyetem, Dísznövénytermesztési és Dendrológiai Tanszék

Budapest, 2015.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	3
1. A troposzférikus ózon és a légszennyezés kapcsolata	4
1.1. A légszennyezés és hatásai	4
1.2. Az ülepedés típusai.....	5
1.3. A troposzférikus ózon keletkezése a légkörben	6
1.4. Az ózon vegetációra gyakorolt hatása.....	8
1.5. Az ózon mérőszámai	9
2. Az ülepedési modell felépítése	10
2.1. A modellfejlesztés előzményei.....	10
2.2. A sugárzási almodul	12
2.3. A vízháztartási almodul.....	14
2.4. Az ellenállási almodul.....	17
2.5. A modellezett területek és a felhasznált bemenő adatok.....	21
2.6. A modellezett felszínre használt állandók értékei	23
3. Eredmények	26
3.1. Hőmérséklet és csapadékmennyiség.....	26
3.1.1. A modellezett terület hőmérsékleti és talajnedvességi viszonyai 2011-ben ..	26
3.1.2. A modellezett terület hőmérsékleti és talajnedvességi viszonyai 2013-ban ..	28
3.2. A levélfelületi index hatása az ülepedési sebesség értékére.....	30
3.3. Az eredmények verifikációja	32
3.4. Az ülepedési sebesség és a fluxus éves menete	33
3.4.1. Éves menet 2011-ben.....	33
3.4.2. Éves menet 2013-ban.....	36
3.5. Évszakos napi menetek	39
3.5.1. Az ülepedési sebesség és a fluxus évszakos napi menete 2011-ben.....	39
3.5.2. Az ülepedési sebesség és a fluxus évszakos napi menete 2013-ban.....	41
3.6. Évszakos ülepedési sebességek átlagos értékei.....	44
Összefoglalás	46
Köszönetnyilvánítás.....	47
Irodalomjegyzék	48

Bevezetés

A légszennyezés és annak hatásai az emberi egészségre, az élő és élettelen környezetre napjaink egyre kutatottabb témája, Földünk egyre súlyosbodó problémái közé tartozik. Az ipari forradalom kezdetével jelentőssé vált a városok környezetmódosító hatása; a XX. században a folyamatos kibocsátásból származó szennyezések eredményeként jelentek meg a városi szmoghelyzetek, melyek komoly egészségügyi hatásokkal jártak. Az emberi tevékenység által, a folyamatos szennyezőanyag-kibocsátás, illetve az üzemi balesetkből származó anyagok egyszeri, nagy mennyiségű kijutása a légkörbe is komoly következményekkel járhat; ezek vizsgálata, mérése és modellezése fontos feladat, s megfelelő óvintézkedéseket tesz lehetővé vészhelyzet esetén.

Diplomamunkámmal az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén folyó levegőkémiai és mikrometeorológiai kutatásokba kapcsolódtam be. Az OTKA 109109 és 109361 kutatási pályázatok keretében a légszennyező anyagok és a különböző városi felszínek kölcsönhatását vizsgáljuk, melyhez egy ülepedési modellt adaptáltam a modellezni kívánt területekre. A modellezés során a szennyezőanyagok adott felszíneken történő kiülepedésének mértékét, illetve a fluxus értékét határoztuk meg a növényi sejteket jelentősen károsító másodlagos légszennyező anyagra, az ózonra vonatkozóan.

Az ózon erős oxidáló hatásának köszönhetően a növényállománnyal kölcsönhatásba lépve egy adott szint felett roncsolja a növények zöld szintestjét, a klorofillt, melynek következtében foltok jelennek meg a növény felszínén. A levélzet károsodása gátolja a szövetek légzési folyamatait, ezáltal csökken a fotoszintetizáló képességük, így a növény kevésbé fejlődik és termés hozama romlik. A vizsgált gáz, az ózon elsősorban a gázcsere nyílásokon, a sztomákon keresztül jut el a növényi sejtekig és ott roncsolja azokat. A mesterséges környezet szempontjából az ózon korrodálja a fémeket, károsítja a műanyagokat és a gumit. Az oxigén háromatomos molekulája a troposzférában a fotokémiai szmog (Los Angeles-típusú) jellemző összetevője, jelentős szerepet játszik a rossz minőségű levegő kialakításában, ezért az emberi egészségre is igen káros hatással van.

A dolgozatban összefoglalom az ózon káros hatásait, a növényekkel való kölcsönhatások mechanizmusait, majd az ülepedési modell részletesebb leírása után a szimulációinkkal kapott, két évre vonatkozó eredményeket mutatom be.

1. A troposzférikus ózon és a légszennyezés kapcsolata

1.1. A légszennyezés és hatásai

A légkörben jelenlévő szennyezőanyagok súlyos egészségügyi és vegetációs károkat okoznak közvetlenül a levegőminőség romlásán, illetve közvetett hatásokon (pl. savaseső) keresztül is. A nyelő folyamatok közül a szennyezőanyagok légkörből való kiülepedése általában kisebb mértékben csökkenti a légszennyezők mennyiségét a levegőben, mint a különböző kémiai reakciók. A felszínre jutó és ott megkötődő szennyezőanyagok ugyanakkor jelentős károsodást okoznak a természetes és mesterséges környezetben is.

A légköri szennyezőanyagok közvetlenül is rontják a levegőminőséget, ezen kívül a kémiai reakciók során további szennyezőanyagok keletkeznek, melyek együttesen idézik elő a rossz minőségű levegő kialakulását, ami speciális időjárási helyzetekben komoly katasztrófákat okozhat. A füstköd (szmog) a légszennyezés egyik szélsőséges formája, rövid ideig tartó fennállása esetén is veszélyes egészségügyi szempontból. A városiasodás és az iparosodás következtében folyamatosan egyre több légszennyező anyag kerül légkörünkbe, ezzel növelve a súlyos szennyezettségi helyzetek kialakulásának valószínűségét. Komolyabb szennyezettségi epizódokat okozó helyzetek már a XX. század első felében megjelentek. Az első, folyamatos kibocsátásból származó katasztrófa Belgiumban történt. A Meuse folyó partja mentén európai szinten is jelentős ipari termelés zajlott, amely folyamatos szennyezettséget okozott a térségben. Az 1930 decemberében kialakuló stabil légrétegződésnek köszönhetően nem történt átkeveredés a légkörben, ezért a felszín közelében több napon keresztül megrekedt a folyamatos kibocsátásból származó, nagy mennyiségű szennyezőanyag. Sokan hasonló tünetekkel fordultak orvoshoz, 3 nap alatt 60 ember hunyt el. Később, vizsgálatokat végezve kimutatták a halálozások száma, és a szennyezett levegő közötti összefüggést. Valójában ez az eset tekinthető az első tudományos bizonyítéknak arra, hogy a rossz minőségű levegő betegségeket, akár halálozást is okozhat (*Nemery et al., 2001*). 1948 októberében Amerikában, Pennsylvaniában, Donora város felett kis méretű aeroszolok, gyárakból származó szennyezőanyagok dúsultak fel a légkörben. A gyenge légmozgás itt is hozzájárult a hőmérsékleti inverzió kialakulásához. A szennyezett levegő a 40 ezer fős lakosság felénél betegséget okozott, huszan életüket veszítették a magas szennyezett levegő miatt (*Helmand et al., 2001*).

A pusztításáról híressé vált, 1952 telén bekövetkező londoni szmoghelyzetben öt nap alatt 4700 fő hunyt el, és a következő évben 8000 fő halála tulajdonítható a szennyezett levegőnek. Ez az eset határkövet jelentett a járványtanban, hiszen lehetőség nyílt kutatásokra, az első, adatokkal alátámasztott analízisek elkészítésére a szennyezőanyagok légköri koncentrációja és a betegségek, valamint a halálozások száma közötti kapcsolatok, összefüggések feltárására (*Bell and Davis, 2001*). A redukzív típusú szmogot főként szilárd halmazállapotú részecskék okozzák. A téli időszakra jellemző, és a széntüzelésből származó megnövekedett korom és SO₂ mennyiségéhez köthető.

Az oxidatív, vagy fotokémiai szmog elsőként Los Angeles városában, 1954-ben jelent meg (*Haagen-Smit and Fox, 1954*). Kialakulásához kis relatív páratartalom és erős besugárzás szükséges. Ezek hatására másodlagos szennyezőként ózon (O₃), illetve aldehidek és ketonok jönnek létre. Az oxidatív szmog nyáron jellemző, hiszen fotokémiai reakciók indítják be a folyamatokat. Létrejöttéhez szükséges még a szénhidrogének és nitrogén-oxidok jelenléte, melyek főként a közlekedésből származnak.

1.2. Az ülepedés típusai

A kémiai anyagok légkörbe való ki- és bekerülését számos folyamat határozza meg. A természetes, illetve az antropogén tevékenységből származó anyagok forrás és nyelő folyamatai jelentősek a légszennyezettség vizsgálata során. Forrásnak nevezzük azokat a folyamatokat, melyek során a nyomanyagok a légkörbe kerülnek, nyelőknek pedig azokat, amelyek során az adott anyagok távoznak a légkörből; ezek kémiai reakciókkal, illetve az ülepedés során valósulnak meg. A nyelők esetében száraz és nedves ülepedést különböztetünk meg; a nyomanyagok közvetlen megkötődése a felszínen a száraz ülepedés, megkötődésük a felhő- és csapadékelemekre és azok kihullása pedig a nedves ülepedés (nedves kimosódás). Ahhoz, hogy az adott anyag nedves ülepedés során kerüljön a felszínre, vízben oldhatónak kell lennie. A vízben nem oldható anyagok csak száraz ülepedéssel kötődhetnek meg a felszínen; a folyamat során közvetlenül a felszíni turbulens áramok szállítják a szennyezőanyagokat a légkörből a felszínre. Az ülepedés sebessége több tényezőtől függ: az adott felszínípustól, a talaj típusától és egyes meteorológiai állapotváltozóktól. Ezen tényezők bővebb kifejtése a 2. fejezetben található.

1.3. A troposzférikus ózon keletkezése a légkörben

Az ózon (O_3) felfedezése Schönbein nevéhez fűződik, kutatásainak célja a villámláskor keletkezett különös szag eredetének megállapítása volt. A troposzférikus ózon mérésére 1850 és 1880 között mérőhálózatot hozott létre. Csaknem egy évszázaddal a felszíni ózon felfedezése után, 1913-ban két francia tudós felfedezte a sztratoszférikus ózonréteget, amely a Naptól érkező ultraibolya sugárzást szűri ki. Korábban azt hitték, hogy a troposzférában található ózon a sztratoszférából származik, hiszen a felszín közelében nincs olyan folyamat, amely közvetlenül ezt a molekulát bocsátja ki. Az ózon fotokémiai reakciók során jön létre elsődleges légszennyező anyagokból, ezért fluxusa egyirányú, csak a légkörből a felszín felé történő árama jelentős. A fotokémiai reakciók a napsugárzás hatására indulnak be, melyek különböző elsődleges szennyezőanyagokkal reakcióba lépve ózonkeletkezést eredményeznek. A fotokémiai szmog egyik fő összetevője is az ózon. Elővegyületei közé a következő elsődleges, azaz közvetlenül kibocsátott szennyezőanyagok tartoznak: a nitrogén-oxidok (NO_x), a metán (CH_4), az illékony szerves vegyületek (VOC-ok), illetve a szén-monoxid (CO). Az ózon körfolyamatokban jön létre elővegyületei átalakulása során. Keletkezése a következő mechanizmussal írható le; ez az egyetlen reakció, mely során az ózon létrejöhethet:

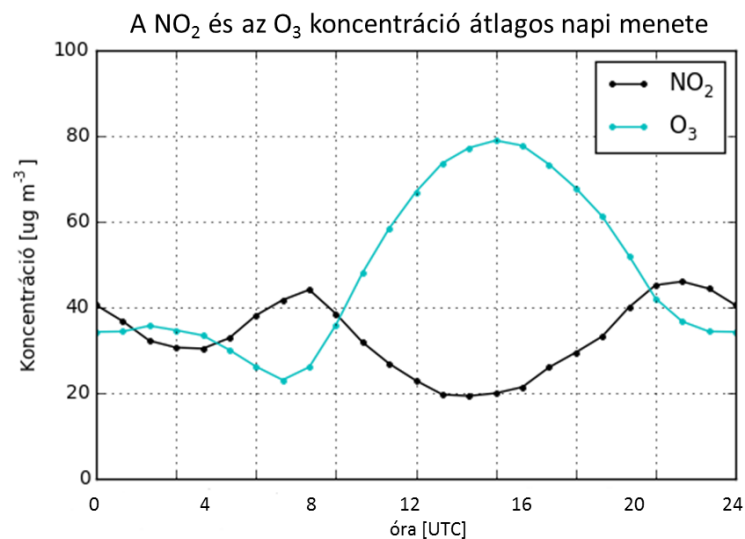


Az egyenletben M egy ütköző testet jelöl, amely az energiaátvitelhez szükséges. Viszont a folyamathoz szükség van az oxigénatomra, és mivel a fotodisszociáció folyamata során az oxigénmolekulából nem tud létrejönni, ezért kialakulását más folyamatok biztosítják a légkörben. A reakciómechanizmus a NO_2 kiindulási molekulán keresztül a következő:



A NO_2 elsőként a beérkező napsugárzás fotonjaival ($h\nu$) lép kölcsönhatásba (kisebb mint 410 nm hullámhosszú fény hatására bomlik), melynek eredményeként oxigénatom jön létre, ami az oxigénmolekulával reakcióba lépve ózonná alakul át.

A levegő szennyezettsége a legkomolyabb problémákat a városokban, illetve az ipari területeken okozza. Az 1. ábrán a Budapest külterületén (Gilice tér) mért O_3 , illetve NO_2 koncentráció-értékeket tüntettem fel. Az adatok az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat (OLM) méréseit ábrázolják [1]. A grafikonon nyomon követhető a szennyezőanyagok tipikus napi menete. A nitrogén-oxidok (NO_2 , NO) a városokban antropogén forrásokból a közlekedés során, a kipufogógázokkal kerülnek a légkörbe. A napi menetekben jól kivehető, hogy a délelőtti órákban jelentősen megnő a koncentrációjuk a közlekedés megindulásával. Ekkor az ózon mennyisége a levegőben még csekély mennyiségű. Viszont napfelkelte után, a fotokémiai reakcióknak köszönhetően a NO_2 bomlásnak indul, melynek hatására az ózon koncentrációja növekvő tendenciát mutat. Az 1. ábrán jól látható ez a jellegzetes időbeli napi menet a szennyezőanyagok esetében.



1. ábra: Budapesten, a Gilice téren mért O_3 és elővegyülete, az NO_2 órás átlagai 2011-ben. Adatok forrása: [1].

1.4. Az ózon vegetációra gyakorolt hatása

A vegetáció szempontjából a légkörben nagy mennyiségben megtalálható szennyezőanyagok közül az ózon a leginkább sejtkárosító. Mivel ez a háromatomos oxigénmolekula csak kis mértékben oldódik vízben, ezért a növényi sejtekben a víz helyett más anyagokkal lép kölcsönhatásba. Fitotoxikus tulajdonsága miatt tehát károsítja a növények sejtjeit (2. ábra). A hosszabb ideig fennálló magas koncentrációértékek, illetve a rövidebb ideig tartó, az ózon menetében kiugró értékek is komoly károkat okozhatnak. A hosszú ideig tartó terhelés a vegetációs időszak elhúzódásához, a fotoszintézis csökkenésén keresztül levélhaláshoz, anyagcserezavarokhoz, így korai levélhulláshoz, termés hozam csökkenéshez vezet (Mészáros *et al.*, 2009).



2. ábra: Az ózon látható károsító hatása cseresznyelevélen. Forrás: [2]

Az üledés során a szennyezőanyagok felvételében a növényi bőrszövet játszik fontos szerepet. A bőrszövet a növény felszínén található, védi a növény belső részeit a kórokozóktól, illetve a szélsőséges időjárási viszonyoktól és felelős a növény és a környezete közötti kölcsönhatásokért. A hajtás bőrszövetének (epidermisz) feladata tehát a párologtatás, a gázcsere és a növény mechanikai védelme; speciális funkciói közé sorolható a felszínére jutó anyagok megkötése, illetve felvétele. Az epidermisz több részből áll: különböző sejtekből, a kutikulából és viaszrétegből. A kutikula felelős a mikroorganizmusok elleni védelemért, csökkenti a vízvesztést. A sztómasejtek (gázcsere nyílások) a gázcserét, illetve a párologtatást végzik, a vízellátottságot szabályozzák. Kis vízellátottság esetén a sztómák bezáródnak, ezzel védve a növényt a további vízvesztéstől. Optimális vízellátottság esetén a növény párologtat. A sztóma nyitottságát a víztartalom kívül befolyásolja még a fény, illetve a szén-dioxid

mennyisége is. Az éjszakai órákban a biológiai oxidációhoz szükséges oxigént veszik fel, nappal pedig a fotoszintézishez nélkülözhetetlen szén-dioxidot. Nyáron a sztomák aktivitása nagy, ekkor a meteorológiai és a biológiai tényezőknek domináns szerepe van.

1.5. Az ózon mérőszámai

Az ózonterhelés meghatározására többféle mérőszámot határoztak meg. Léteznek koncentráció- és fluxusalapú mérőszámok is. Néhány évvel ezelőtt még a koncentráció alapú indexeket használták. Ilyen az *AOT40* és az *AOT60* (*Accumulated exposure Over a Threshold*). Ezek a határértékek a 40 és a 60 ppb feletti órás összegzett koncentrációkat jelentik. Ha a koncentráció értéke ezen küszöbértékek fölé emelkedik, már komoly károkat okoz a vegetációban (*Fuhrer et al., 1997*). Egy másik koncentrációalapú mérőszám a *SUM06*, melynek kiszámításához a vizsgált időszakban a 0,06 ppm-nél nagyobb órás átlagos koncentrációkat összegzik (*Zhang et al., 2006*).

Mára már áttértek a fluxusalapú mérőszámokra, melyek jobbnak bizonyultak, hiszen ezek a szennyezőanyag aktuálisan abszorbeált mennyiségét adják meg, szorosabb összefüggést mutatnak a növény állapotával (*Lamaud et al., 2009*). Ezek a szintek alkalmazhatók, hogy előírják az élelem ellátás és a táplálékbiztonság szempontjából a mezőgazdaságban okozott károkat. A teljes fluxus a felszínekre történő sztomatikus és nem-sztomatikus áramokat, azaz a teljes nyomgázáramot adja meg. A sztómafluxus a gázcsere nyílásokon a növényi sejtekbe bekerülő anyag mennyiségének értékét adja meg (*Musselman et al., 2006*).

Egy ma is elterjedten alkalmazott index a *POD_Y* (*Phytotoxix Ozone Dose over an Y threshold*). Ha a növényzetet az $Y [nmol m^{-2} PLA (projected leaf area) s^{-1}]$ küszöbérték felett éri a szennyezőanyag, az már súlyos kárt okoz benne. Manapság a *POD₆*, ami a legerősebb kapcsolatot adja a sztómafluxus és a termés hozam között (5%-os termés hozam csökkenésre vonatkozóan határozták meg) (*Mills et al., 2011*). További indexek és fogalmak összefoglalása *Musselmann et al. (2006)* munkájában olvasható.

2. Az ülepedési modell felépítése

2.1. A modellfejlesztés előzményei

Az ülepedési modellek a valódi felszín-légkör között lejátszódó ülepedési folyamatokat empirikus megfigyeléseken alapuló parametrizációkkal szimulálják annak érdekében, hogy minél pontosabb becslést kaphassunk a növényeket, környezetünket károsító folyamatokról, és ezáltal lehetőség nyíljon a káros hatások csökkentésére. Ezek a modellek általában a “big-leaf modell” megközelítést alkalmazzák, mely egy egyszerűsítés a vegetáció szempontjából. Eszerint az egész vegetációra úgy tekintünk a modellezés során, mint egy nagy levélfelületre, melyen ugyanazok a folyamatok mennek végbe, mint a növény minden egyes levelén (*Baldocchi et al., 1987*).

Az EMEP (*Co-operative Program for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe*) fotokémiai modelljében egy beágyazott almodul, a DO₃SE (*Deposition of O₃ for Stomatal Exchange*) számítja az ülepedési sebességet. Ebben a modellben a talajnedvességet egy ún. csöbör-modell számítja. A csöbör (tározó) egy adott mélységű talajréteget képvisel, melyből a mélyebb rétegek felé történő vízmozgást és az oldalirányú lefolyást elhanyagolják. Az ülepedés modellezésének fejlődése során sokáig elfogadott volt az a megközelítés, miszerint a talajnedvesség nem befolyásolja az ülepedési folyamatokat; de később felismerték ennek fontosságát a bonyolult növényélettani folyamatok miatt. A DO₃SE almodul a Penman–Monteith-féle energiaegyensúlyi elméletet használja a talaj-növény-légkör rendszer vízkörforgásának meghatározására. Érzékenységi vizsgálatok kimutatták, hogy a modell jelentősen függ a helyi adottságoktól, a lokális paraméterektől (pl. sztómakonduktancia, gyökérszóna, LAI) (*Emberson et al., 2007*).

Az elmúlt évtizedben az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén jelentős kutatási fejlesztések, tudományos előrelépések történtek a légköri szennyezőanyagok terjedésének és ülepedésének modellezésében. A folyamatosan fejlesztett TREX-modellcsaládnak több, különböző megközelítést alkalmazó modellje létezik; ezek a terjedési modellek főbb típusai: az euleri, a lagrange-i, és a Gauss-típusú, illetve az ülepedést becsülő modellek (*Lagzi et al., 2004a; Lagzi et al., 2004b; Mészáros et al., 2009; 2010; Komjáthy, 2008a; 2008b; Leelőssy et al., 2013*). A modellek összekapcsolásával lehetőség nyílik a terjedési és az ülepedési folyamatok együttes tanulmányozására, így egy komplex modellt használhatunk a tényleges ülepedési

folyamatok, a terhelések szimulálására, ami képes egy adott területre valós kibocsátási adatokkal szimulálni az egyes szennyezőanyagok terjedését és azok kiülepedését különböző felszínre.

A kutatási eredmények rámutattak arra, hogy Magyarországon, kontinentális éghajlati viszonyok között a talajnedvesség elhanyagolása az ülepedési modellekben, főként a nyári, rendkívül száraz, aszályos hónapokban nem lehetséges (Mészáros *et al.*, 2009). Ekkor a magas hőmérséklet és az alacsony relatív páratartalom miatt nem csak a talaj, hanem a növények vízellátottsága is csökken, ami befolyásolja a gázcsere nyílások állapotát. A talajnedvesség-hiány erős csökkenése egy csapadékmentes időszakban jelentősen kihat a légszennyező anyagok ülepedésének sebességére, amiért legnagyobb mértékben a sztómavezetés a felelős (Lagzi *et al.*, 2004a; Mészáros *et al.*, 2009). A fenti kutatásokból egyértelművé vált, hogy éghajlatunkon a talajnedvesség az ülepedési folyamatokat jelentősen befolyásoló tényező, ezért becslése fontos a környezeti modellekben. Szinyei és Vincze (2006) egy egyszerű csöbör-modellt (Mintz and Walker, 1993) adaptált, mely a talajnedvesség értékeit napi lépésekben számította. A modellben az oldalirányú, illetve a mélyebb rétegek felé irányuló vízmozgást elhanyagolták, a csöbörből való kifolyás után csak a felszíni lefolyással számoltak tovább. A szimulációk során a gyökérszóna mélysége meghatározó, hiszen ez az a réteg, amin belül számítható a talajnedvesség. A modell előnye, hogy kevés bemenő adatot igényel, ami lehetővé teszi a rutinszerű alkalmazást.

Komjáthy (2008a) munkájában az ülepedési modell vízháztartási almoduljának fejlesztésével foglalkozott. A LUC (Land Use Categories) felszínhasznosítási kategóriáknak megfelelően 11 felszín típusra és 7 talajtextúrára számolta a talajnedvességet a felszíni növényzet figyelembevételével. Térbeli futtatásokat végzett az ALADIN előrejelző modell felszínhasznosítási kategóriáit használva Magyarország területére. Az elvégzett szimulációkat pontbeli eredményekkel verifikálta. Munkájában jelentős eltéréseket a csöbör-modell eredményeitől nem kapott, hiszen fűfelszínre modellezett, ahol a vegetációra vonatkozó állandók csak kis mértékben térnek el a csupasz talajétól.

Czender (2007) diplomamunkájában magyarországi erdőállományokra, Juhász (2006) pedig a csatolt terjedési-ülepedési modellel végzett számításokat az ózonterhelés becslésére.

Diplomamunkám célja a Meteorológiai Tanszéken használt ülepedési modell adaptálása és órás léptékűvé fejlesztése, amellyel pontbeli számításokat végezve

szimulálhatjuk a száraz ülepedési sebességet és a fluxust részletes időbeli felbontásban a modellezni kívánt területekre. A modellezés során fontos szempont volt, hogy minél gyorsabb futási időt érjünk el, ami nélkülözhetetlen a későbbi kalibrációs és verifikációs vizsgálatokhoz. Ennek érdekében a modellt python programnyelvre adaptáltam, ami rendkívül gyors futási időt tesz lehetővé.

2.2. A sugárzási almodul

Az ülepedési modell több almodulra osztható. Ezek a sugárzási- és a vízháztartási komponenseket, illetve az ellenállási paramétereket számító modulok.

Az ülepedési modellekben, csakúgy, mint a terjedési modellekben kulcsparaméterként jelenik meg a Monin–Obukhov-hossz, mely a turbulenciát írja le. Ez a hosszúság dimenziójú szám a dinamikus sebességhez és a dinamikus hőmérséklethez hasonlóan a felszínközeli légréteg dinamikai paramétere. Ezen paraméterek értékeinek kiszámítására a Magyar Szabványban (*MSZ 21457-4, 2002*) leírt parametrizációs lépéseket használtuk. A sugárzásra vonatkozó mérési adatok hiányában modellünkben a sugárzási komponensek számítására is szükség van, ezen értékeket közelítő módszerekkel állítottuk elő.

A felszínközeli turbulens folyamatok (a mechanikai és a termikus turbulencia) leírásához szükséges a légköri hőáramok megadása. A szenzibilis hőáram (H) az örvények által, a látens hőáram (LE) az örvények vízgőztartalma által szállított, a talajhőáram pedig (G) a talajfelszínen áthaladó, egységnyi felszínre vonatkoztatott hőmennyiségek [$W m^{-2}$]. A hőáramok értékeit a sugárzási egyenlegből (R) származtattuk. A sugárzási egyenleget és a globálsugárzást (S) a következő egyenletek megoldásával kapjuk meg:

$$S = (a_1 \cdot \sin \phi + a_2) \cdot (1 + b_1 \cdot N^{b_2}) \quad (3)$$

$$R = \frac{S(1 - A) + c_1 T^6 - \sigma_{SB} T^4 + c_2 N}{1 + c_3} \quad (4)$$

ahol: A – a felszín albedója,
 T – a felszíni hőmérséklet [K] – ezt a 2 m-es szinten vett értékkel helyettesítettük,
 N – a felhőzet mennyisége [0 és 1 közötti érték],
 σ_{SB} – a Stefan–Boltzmann állandó, $5,67 \cdot 10^{-8} [W m^{-2} K^{-4}]$
 c_1 – a hosszuhullámú sugárzási állandó, $5,31 \cdot 10^{-13} [W m^{-2} K^{-6}]$
 c_2 – a felhőzeti állandó, $60 [W m^{-2}]$
 c_3 – a felszíni melegedési állandó (0,12)
 ϕ – napmagasság
 a_1 és a_2 – empirikus állandók
 b_1 és b_2 – felhőzeti állandók.

A dinamikai paraméterek számításához minden rendelkezésre áll, a nappali órákban a szenzibilis hőáram, illetve a szélesebbesség függvényében különböző összefüggésekkel számoljuk ezek értékeit.

A súrlódási sebesség a következő összefüggéssel adható meg:

$$u_* = \frac{\kappa u}{\ln(z_m) - \ln(z_0)} \quad (5)$$

ahol: κ – a Kármán–konstans (0,4)
 z_m – az adott magasságban mért szélesebbesség
 z_0 – az érdességi magasság.

A dinamikus hőmérséklet (T_*) a szenzililis hőáram (H), a levegő sűrűsége (ρ) és az állandó nyomáson vett fajhő (c_p) függvényeként számítható:

$$T_* = -\frac{H}{u_* \cdot c_p \cdot \rho} \quad (6)$$

A Monin–Obukhov-hossz az alábbi kifejezéssel adható meg a modellben:

$$L_* = \frac{T}{g} \cdot \frac{u_*}{T_* \cdot \kappa} \quad (7)$$

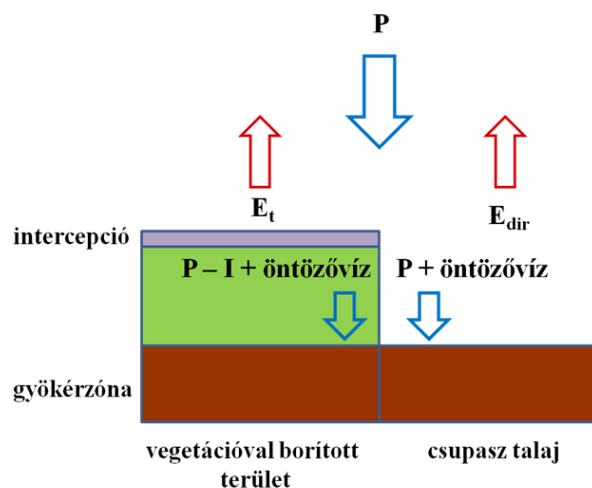
ahol: T : a felszíni hőmérsékletet,
 g : a nehézségi gyorsulást jelöli.

Ha a szenzibilis hőáram értéke pozitív, tehát hő szállítódik a légkörbe, illetve a szél $0,5 \text{ m s}^{-1}$ -nél nagyobb sebességű, a Monin–Obukhov-hosszat iterációs lépésekkel számoljuk ki, azaz fokozatosan közelítünk értékéhez; ezt a közelítést a századik lépésig folytatjuk és az ekkor kapott értéket tekintjük végeredményként. Az iterációs számításhoz szükséges kiindulási értéket a Monin–Obukhov-hosszra -36 méternek határoztuk meg (*MSZ 21457-4, 2002*).

Az éjszakai órákban a számítás eltér a nappali órák esetétől; ekkor a szenzibilis hőáram paraméterezése másképpen történik, illetve a dinamikai sebesség értékére vonatkozóan végezzük el az iterációs számításokat. Ezen számításokat részletesen a Magyar Szabvány tartalmazza (*MSZ 21457-4, 2002*).

2.3. A vízháztartási almodul

Az ülepedési modellben jelentős szerepe van a vizsgált terület talajnedvesség-értékeinek, amit a csapadék mennyisége, a párolgás, a növényzet által felfogott vízmennyiség és az öntözés mennyisége határoz meg. A modellben nem csupán a csupasz talajra vonatkozóan számítjuk a talaj nedvességtartalmát, hanem a felszín vegetációval borítottságát, tehát a növényi párolgást, illetve az intercepció hatását is figyelembe vesszük. A 3. ábra a vegetációval borított és a csupasz talajon végbemenő folyamatokat ábrázolja. Látható, hogy növényzettel borított területen a növényi felszínek tetejére érkező csapadékmennyiség egy része a levelek vízfelfogó tulajdonsága miatt nem jut a talajba, eltérően a csupasz talajtól.



3. ábra: Az ülepedési modell vízháztartási almoduljának sematikus ábrája (Komjáthy, 2008a alapján).

A modellben órás léptékben számítjuk a talajnedvesség értékét; egy adott időlépcsőben a következő időlépcsőbeli talajnedvesség-tartalmat (θ_i) az előző időpont talajnedvesség értéke (θ_{i-1}), illetve a csapadékmennyiség (P), az intercepció (I), az öntözés (T – *trickle irrigation, csepegtető öntözés*) és a teljes evapotranszpiráció (ET) adott időpontra vonatkozó értékei határozzák meg:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + (P_i - I_i) + T_i - ET_i. \quad (8)$$

Intercepció csak a csapadékos napok esetében lép fel, kiszámítása a következő képlettel történik:

$$I = LAI \cdot S_m. \quad (9)$$

A levélfelületi index (LAI) [$m^2 m^{-2}$] az egységnyi felszín felett található levelek mennyiségét, S_m pedig az egységnyi LAI -ra jutó maximális víztárolást adja meg. Ennek értékét Ács (2004) munkája alapján 0,2 mm-nek választottuk.

A csupasz talaj és a vegetációval borított területek párolgása különböző módon számítható. A tényleges párolgást (E_p) a Penman–Monteith módszerrel számítottuk csupasz talaj és növényzettel borított felszín esetében egyaránt:

$$E_p = \frac{\Delta \cdot A_e + \frac{\rho \cdot c_p \cdot vpd}{R_a}}{\Delta + \gamma} \quad (10)$$

ahol: Δ – a vízgőz telítési görbéjének hajlata [$Pa K^{-1}$]
 A_e – a felszíni energiaáram [$W m^{-2}$]
 ρ – a levegő sűrűsége [$kg m^{-3}$]
 c_p – a levegő fajhője állandó nyomáson, 1005 [$J kg^{-1} K^{-1}$]
 vpd – a telítési vízgőzhiány [Pa]
 R_a – az aerodinamikai ellenállás [$s m^{-1}$]
 γ – pszichometrikus állandó, 65 [$Pa K^{-1}$].

A potenciális párolgás kiszámítása után a tényleges párolgás megadása csupasz talaj és vegetáció esetén különbözőképpen történik. Csupasz talaj esetén a következő lépésben kialakuló talajnedvesség csak a kezdeti talajnedvesség értékétől függ adott talajfizikai féleség esetében. Ekkor β_1 a következő függvénnyel egyszerűen kiszámítható:

$$\beta_1 = \begin{cases} 1 & ha \quad \theta > \theta_f \\ \max \left\{ \frac{\theta - \theta_w}{\theta_f - \theta_w}; 0,05 \right\} & ha \quad \theta_w < \theta \leq \theta_f \\ 0,05 & ha \quad \theta \leq \theta_w \end{cases} \quad (11)$$

ahol θ_f a szabadföldi vízkapacitáshoz és θ_w a hervadásponthoz tartozó talajnedvesség tartalom adott talajtextúra esetében. Ennek ismeretében már megadható a tényleges párolgás értéke:

$$E_{dir} = (1 - veg) \cdot \beta_1 \cdot E_p. \quad (12)$$

Növényállomány esetében az evapotranszpiráció a vegetációval (*veg*) borított terület, a β_2 paraméter és a lehetséges párolgás szorzataként adható meg:

$$E_t = veg \cdot \beta_2 \cdot E_p . \quad (13)$$

A teljes párolgás (*ET*) e két érték összegeként kapható meg (*Chen and Dudhia, 2001*):

$$ET = E_{dir} + E_t \quad (14)$$

melyek ismeretében kiszámítható a következő időlépcsőben a talajnedvesség értéke.

2.4. Az ellenállási almodul

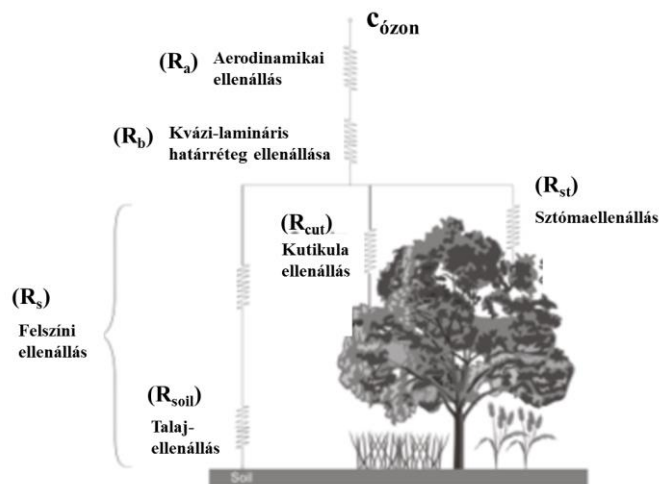
Az ülepedési sebességet (v_d) közvetlenül 3 tényező határozza meg, ezek az aerodinamikai (R_a), a kvázi-lamináris (R_b), illetve a felszíni ellenállások (R_c), melyek összegének reciproka adja meg az ülepedési sebesség értékét (*Zhang et. al., 2006*)

$$v_d = (R_a + R_b + R_c)^{-1} . \quad (15)$$

A vegetációra kiülepedett ózon mennyisége az egységnyi felületen áthaladó anyag mennyiségével, azaz a fluxussal adható meg az ülepedési sebesség és a koncentráció (c) szorzataként:

$$F = -v_d \cdot c . \quad (16)$$

A 4. ábrán az ülepedést gátló ellenállásokat tüntettem fel, mely megmutatja, hogy azok a felszín, illetve a vegetáció mely részein lépnek fel.



4. ábra: A modellben alkalmazott ellenállási almodul sematikus rajza [3] alapján

Az aerodinamikai ellenállás a növényi felszín felett a molekuláris diffúzióra, a turbulenciára jellemző érték, mely a mikrometeorológiai feltételek, a felszíni érdesség, a légkör stabilitásának függvénye és független az anyagi minőségtől. Stabil esetben az aerodinamikai ellenállást a következő képlet adja meg:

$$R_a = \frac{1}{\kappa \cdot u_*} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) + 4,7 \frac{z-d-z_0}{L} . \quad (17)$$

Instabil légrétegződés esetében, azaz amikor a Monin–Obukhov hossz negatív, az alábbi számítással adható meg a turbulenciára vonatkozó ellenállás értéke:

$$R_a = \frac{1}{\kappa \cdot u_*} \ln \left(\frac{1-y}{1-y_0} \cdot \frac{1+y_0}{1+y} \right), \quad (18)$$

ahol y és y_0 értékek kiszámítása a (19) és (20)-as egyenletekkel történik, melyekben z_0 az érdesség magasságát, z a szélmerés magasságát, d a kiszorítási rétegvastagságot és L a Monin–Obukhov hosszat jelöli:

$$y = \left(1 - 16 \frac{z-d}{L} \right)^{-1/2} \quad (19)$$

$$y_0 = \left(1 - 16 \frac{z_0}{L}\right)^{-1/2}. \quad (20)$$

A kvázi-lamináris határréteg ülepedést gátló hatása az aktív felszín feletti vékony réteg ellenállása, amely szennyezőanyag specifikus; a felszínközeli paramétereiktől (dinamikus sebesség, dinamikus hőmérséklet) és a vizsgált kémiai anyagok molekuláris diffúziójától függ, értéke a következő képlettel adható meg:

$$R_b = \frac{2}{\kappa \cdot u_*} \cdot \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^P. \quad (21)$$

Az egyenletben a Schmidt-szám (Sc) az adott gázra jellemző, a Prandtl-szám (Pr) pedig két fizikai tulajdonság, a kinematikai viszkozitás és a hővezetési együttható aránya, P egy empirikus konstans.

Az ülepedési modellekben az ellenállási hálózatban (4. ábra) az egyik kulcsparaméter a felszíni ellenállás, amely mind növényi, mind talajfizikai paramétereiktől függ; a sztóma- és a mezofill réteg ellenállásának, a kutikula- és a talajellenállás összegének reciprokaként jelenik meg. A mezofill réteg ózonnal kapcsolatos értéke 0 (Brook et. al., 1999), ezért ezt jelenlegi számításaink során nem vesszük figyelembe. A felszíni ellenállás a következő egyenlettel számítható:

$$R_c = \frac{1}{(R_{st}^{-1} + R_m^{-1}) + R_{soil}^{-1} + R_{cut}^{-1}} \quad (22)$$

ahol a sztómaellenállás (R_{st}) az alábbi képlettel adható meg:

$$R_{st} = \frac{1}{G_{st}(PAR) \cdot f_t(t) \cdot f_e(e) \cdot f_\theta(\theta) \cdot f_{D,i}}. \quad (23)$$

Az egyenletben $G_{st}(PAR)$ a sztómavezetést jelöli, melynek értéke függ a sugárzás intenzitásától (PAR – *Photosynthetic Active Radiation*), ami a látható sugárzás 400–700 nm között terjedő tartománya); $f_t(t)$, $f_e(e)$ és $f_\theta(\theta)$ jelöli a hőmérséklet, a vízgőznyomás, illetve a talajnedvesség hatását kifejező stresszfüggvényeket. A hőmérsékleti stressz a

növény fiziológiai állapotától függ, fajspecifikus állandók segítségével határozható meg. Az optimális hőmérséklet (t_{opt}) az a hőmérséklet, amelyen a növény a legnagyobb mértékben képes a növekedésre, a minimális hőmérséklet (t_{min}) és a maximális hőmérséklet (t_{max}) pedig azt az intervallumot adja meg, amelyen még képes a produktivitásra. Kiszámítása a következő képlettel történik:

$$f_t = \frac{t - t_{min}}{t_{opt} - t_{min}} \cdot \left(\frac{t_{max} - t}{t_{max} - t_{opt}} \right)^{b_t} \quad (24)$$

A b_t egy, a vegetációra vonatkozó állandó, amely az alábbi módon adható meg:

$$b_t = \frac{t_{max} - t_{opt}}{t_{max} - t_{min}} \quad (25)$$

A vízgőzstressz az adott vízgőznyomás (e) és a telítési vízgőznyomás (e_s) értékétől, illetve egy, a vegetációtól függő állandótól függ (b_e):

$$f_e = 1 - b_e \cdot (e_s - e) \quad (26)$$

A talajnedvességre vonatkozó stresszfüggvény kiszámítása a 2.3. fejezetben leírt β_1 paraméterrel azonos módon történik. A vizsgálataink során alkalmazott állandók értékeit az egyes felszín típusokra a 2.6. fejezetben foglalom össze.

A direkt és a diffúz sugárzás értékét *Weiss and Norman (1985)* alapján parametrizáltuk. A PAR értéke különbözik árnyékolt, illetve napsütötte levelek esetében. Ezt megkapva az árnyékolt, illetve nem árnyékolt levelekre a LAI értéke is parametrizálható külön-külön, majd hasonló megközelítéssel ez a sztómaellenállás esetében is megtehető (*Zhang et. al., 2001, Mészáros et. al., 2009*):

$$G_{st}(PAR) = \frac{LAI_s}{r_{st}(PAR_s)} + \frac{LAI_{sh}}{r_{st}(PAR_{sh})} \quad (27)$$

$$r_{st}(PAR) = r_{st,min} \cdot \left(\frac{1 + b_{st}}{PAR} \right) \quad (28)$$

A fent látható egyenletekben LAI_s a napsütötte, LAI_{sh} az árnyékolt levelekre vonatkozó levélfelületi indexek értékeit jelöli. LAI_s és LAI_{sh} értéke az alábbi képletekkel adható meg:

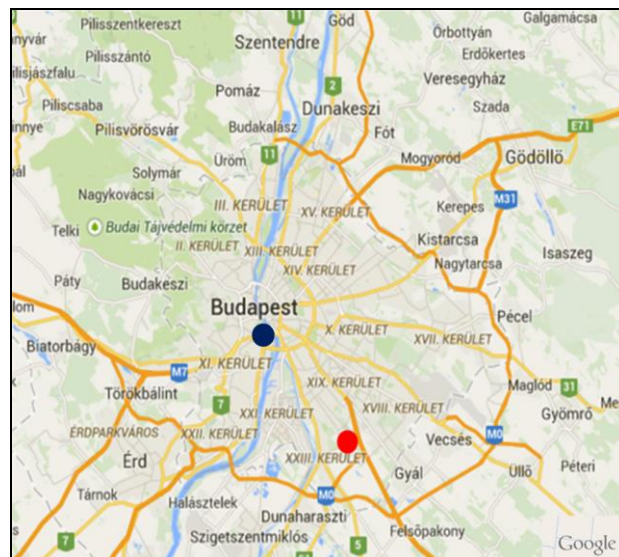
$$LAI_s = 2 \cdot \cos \theta \left[1 - e^{\left(-0,5 \cdot \frac{LAI}{\cos \theta} \right)} \right] \quad (29)$$

$$LAI_{sh} = LAI - LAI_s \quad (30)$$

ahol θ a zenitszöget jelöli.

2.5. A modellezett területek és a felhasznált bemenő adatok

Munkánk során a Budapesti Corvinus Egyetem Kertészettudományi Karának Soroksári Kísérleti üzem- és Tangazdaságának cseresznyeültetvény területére (É. sz. 47°22', K. h. 19°09' – 5. ábra), illetve az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karának épülete előtti parkra (É. sz. 47°28', K. h. 19°03' – 5. ábra) végeztük el az ülepedési modell adaptálását és a részletes modellszimulációinkat órák felbontásban.



5. ábra: A BCE Kertészettudományi Kar Botanikus Kertjének (piros) és a modellezett városi park (kék) elhelyezkedése.

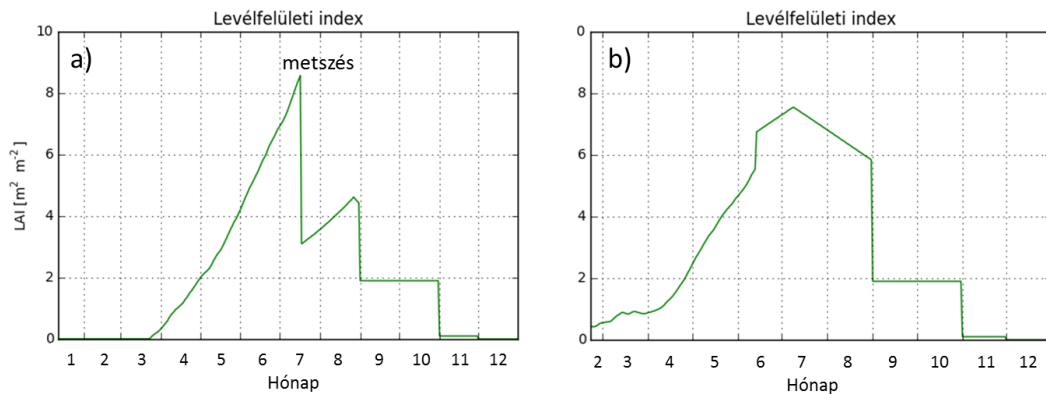
Mindkét területen végeznek meteorológiai méréseket; szimulációink során az ELTE klímaállomásán és a Tangazdaság területén mért adatokat használtuk fel. Az adatsorokból rendelkezésünkre álltak a 2 méteres magasságban mért hőmérséklet- és relatív nedvességtartalom értékei, valamint a csapadékmennyiségre vonatkozó adatok órás felbontásban. További szükséges bemenő adatokra az ültetvény területén nem történt mérés, ezért a felhőzet mennyisége, a tengerszinti légnyomás, illetve a szélsébség értékei a Soroksártól észak-keletre, kb. 4 km-re található Országos Meteorológiai Szolgálat Budapest-Pestszentlőrinci állomásán mért méréseiből és észleléseiből származnak. Ezzel szemben a klímaállomáson kizárólag csak a felhőzeti megfigyelések hiányoztak adatsorainkból, amelyet szintén a pestszentlőrinci adatokkal pótolunk.

Munkánk során a 2011-es és a 2013-as évre vizsgálatainkat mindkét kísérleti helyszínre elvégeztük; az ELTE lágymányosi épületegyüttese melletti park esetében 3 féle felszínborítottsági esetre vonatkozóan (vegyes – lombhullató és örökzöld – fás területre, fűre és beépített területre).

A Corvinus Egyetem Botanikus Kertjében a nyári száraz időszakok miatt fontos a cseresznyefák öntözése. A szimulált évek közül 2011-ben öntözték a területet, ebből az évből rendelkezésünkre állnak az öntözés mennyiségére vonatkozó adatok, viszont 2013-ban a cseresznyefák öntözésére nem került sor. Mivel az öntözés a lombkoronaszint alatti csepegtetőrendszerrel történik, a talaj csapadékon kívüli vízbevétele nőtt az adott napokon. Ez a vízmennyiség teljes mértékben a talajba jut, ezért nem kell számolni a lombzat által felfogott nedvességgel (intercepció, (9) *egyenlet*).

A szimulációink során használt levélfelületi index adatok a vizsgált időszakra korábban modellezett értékek a cseresznyeültetvény területére. *Piblinger (2014)* szakdolgozatában modellezte a cseresznyés LAI értékeit a két évre vonatkozóan Rosset és Lambert modellje alapján, akik napi átlaghőmérséklet alapján becsülték fűfelszínre a LAI értékét. E modell továbbfejlesztett változatával *Piblinger (2014)* a soroksári mért hőmérsékleti adatok alapján 2011-re meghatározta a napi LAI értékeket (6. *ábra*). Az év első két harmadában ezeket a modellezett adatokat vettünk figyelembe a szimulációk során. Márciusban a rügyezés, illetve a tavaszi hónapok esetén a vegetáció megerősödését jól reprezentálja a LAI értékének növekedése. 2011 júliusában a cseresznyefák metszésére került sor, melynek következtében a LAI értéke jelentősen visszacsökkent, majd újra növekedni kezdett. Az őszi hónapokban a vegetáció elhalása,

a levélhullás következtében a modellezett adatok nem adták vissza kellő pontossággal az értékeket, ezért a szeptemberi hónaptól szakirodalmi hivatkozások alapján (Zhang *et al.*, 2001) számoltunk tovább, ezzel magyarázható a függvény lépcsőzetes ugrása szeptembertől az ábrákon.



6. ábra: A modellezés során használt levélfelületi index értékei a 2011-es (a) és a 2013-as (b) évre.

A fluxusszámításhoz szükséges koncentráció-adatokat az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat Budapest Gilice téri és Kosztolányi Dezső téri mérőállomás mérései szolgáltatták [1]. A szimulációkhoz az egyes évek óras felbontású adatait használtuk fel.

2.6. A modellezett felszínre használt állandók értékei

Az ülepedés-modellezés nemzetközi irodalma széleskörűen foglalkozik az ózon és más nyomanyagok ülepedésével. Számos vizsgálat és tanulmány született a különböző parametrizációkról; mérések és számítások által az egyes fajokra állandó értékek meghatározásáról. Juhász (2006) és Komjáthy (2008a) szakirodalmi adatok alapján több felszín típusra megadták ezek értékeit. Juhász (2012) doktori értekezésében az általam is vizsgált soroksári cseresznyeültetvényre végzett nedvaram méréseket, amihez szintén szükségesek voltak a talajra és a növényzetre vonatkozó specifikus értékek.

A modellben az egyes felszín típusokra vonatkozó állandók értékeit szakirodalmi adatok alapján választottuk meg szimulációink során, melyek értékeit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: A mollezés során használt állandók értékei különböző felszínborítottságú területekre (Forrás: Brook et al., 1999; Zhang et al., 2011).

<i>megnevezés</i>	<i>jelölés</i>	<i>mértékegység</i>	<i>gyümölcsös</i>	<i>vegyes fás</i>	<i>fű</i>	<i>beépített terület</i>
<i>optimális hőmérséklet</i>	t_{opt}	$^{\circ}C$	25	27	40	-
<i>maximális hőmérséklet</i>	t_{max}	$^{\circ}C$	45	45	55	-
<i>minimális hőmérséklet</i>	t_{min}	$^{\circ}C$	5	0	10	-
<i>minimális sztómaellenállás</i>	$r_{st,min}$	$s\ m^{-1}$	69	150	50	-
<i>sugárzási korrekciós tag</i>	b_{st}	Wm^{-2}	60	43	20	-
<i>telítési hiány</i>	b_e	hPa^{-1}	0,024	0,036	0,024	-
<i>érdességi magasság</i>	z_0	m	0,5	1,05	0,05	2
<i>kiszorítási rétegvastagság</i>	d	m	5	0,01	0,01	1,5
<i>talajellenállás</i>	R_{soil}	$s\ m^{-1}$	800	300	300	500

A Botanikus Kertben a cseresznyeültetvény területén az uralkodó fizikai talajféleség homok, az ELTE körüli park területén pedig vályog. A két talajféleségre vonatkozó hervadásponthoz, szabadföldi vízkapacitáshoz és a telítéshez tartozó talajnedvesség tartalom értékeit a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A modellezett területekre használt talajnedvességi paraméterek homok és vályog talajtextúra esetében $m^3 m^{-3}$ mértékegységben (Forrás: Ács et. al., 2010).

	jelölés	vályog	homok
telítéshez tartozó talajnedvesség-tartalom	θ_s	0,500	0,507
szabadföldi vízkapacitáshoz tartozó talajnedvesség-tartalom	θ_f	0,300	0,325
hervadásponthoz tartozó talajnedvesség-tartalom	θ_w	0,140	0,029

Fontos kiemelni még a LAI szerepét a modellben. A vegyes fás terület, a fűvel borított, illetve a beépített területek esetében szakirodalmi adatokat használtam fel, a cseresznyeültetvény esetében pedig elvégeztem a modellszimulációkat szakirodalmi és modellezett LAI értékekkel is, ezáltal a LAI ülepedési sebességre gyakorolt hatását is vizsgálni tudtam. A modellezett LAI értékek a 6. ábrán láthatók, a Zhang et al. (2001) munkájából vett parametrizált értékeket pedig a 3. táblázatban foglaltam össze.

3. táblázat: A modellben használt LAI [$m^2 m^{-2}$] értékei ez egyes időszakokban (S1: december, január, február; S2: március, április; S3: május, június, július, augusztus, S4: szeptember, október, S5: november) (Forrás: Zhang et al., 2001).

	gyümölcsös	vegyes fás	fű	beépített terület
S1	0,0	2,3	0,5	0,0
S2	0,8	3,3	1,0	0,2
S3	3,4	4,5	2,0	0,3
S4	1,9	3,5	1,5	0,2
S5	0,1	2,3	1,0	0,1

3. Eredmények

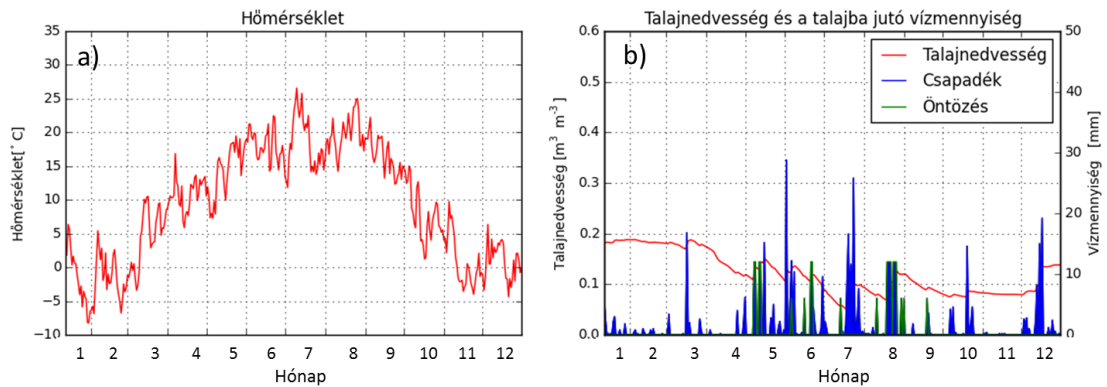
Az ülepedési modellel futtatásainkat a 2011-es és a 2013-as évekre végeztük el órás felbontásban, így részletes képet kaptunk e két év teljes ülepedési viszonyairól. Célunk a vizsgált terület vegetációjára kiülepedett ózommennyiség vizsgálata. A modellezett ülepedési sebesség értékeit megszorozva a mért koncentráció-adatokkal a kiülepedett ózon fluxusát kapjuk meg $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mértékegységben. Ezen eredményeket a következő fejezetekben mutatom be.

3.1. Hőmérséklet és csapadékmennyiség

Az alfejezetben röviden bemutatom az adott év hőmérsékletére és csapadékmennyiségére vonatkozó mért éves adatsorokat, illetve a talajnedvesség értékeire kapott eredményeket mindkét modellezett területre, a Budapesti Corvinus Egyetem Soroksári Botanikus Kertjére és Lágymányos területére a különböző felszíntípusok esetére (füves, lombhullató és örökzöld (vegyes) fás, továbbá beépített terület).

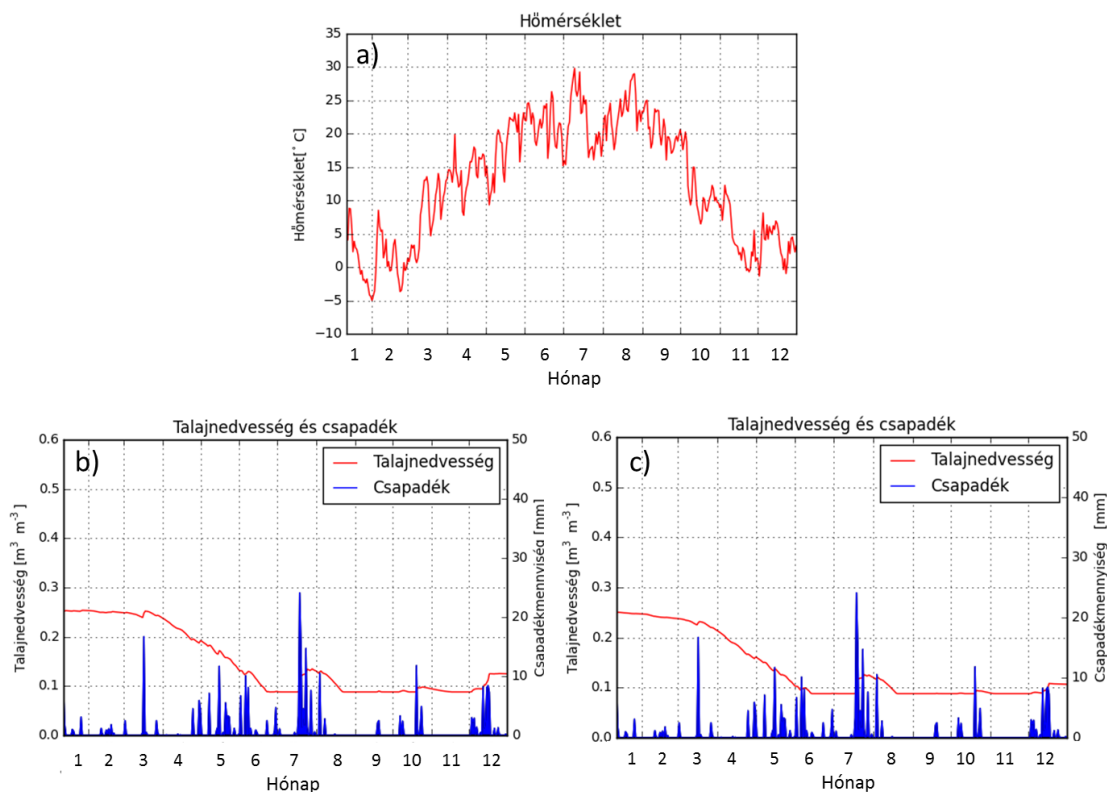
3.1.1. A modellezett terület hőmérsékleti és talajnedvességi viszonyai 2011-ben

A 2011-es év hónapjai hazánkban az átlagosnál melegebbnek bizonyultak, emellett a rekord csapadékos 2010-es évet követően szárazság, súlyos aszály volt jellemző; július és december kivételével az egyes hónapokban az átlagosnál jóval kevesebb mennyiségű csapadék hullott (*Móring, 2012*). Az éves csapadékmennyiség Budapesten 381 mm volt. A 7. és 8. ábrákon a vizsgált területeken mért hőmérsékletek napi átlagos értékeit, a napi csapadékösszeget, illetve a modellezett talajnedvességi értékeket tüntettem fel. 2011-ben a szárazság miatt a cseresznyeültetvény öntözésére is sor került; az öntözésre fordított víz mennyiségét szintén feltüntettem a diagramon, mivel az jelentősen befolyásolja a talajnedvességet. Az év során 198 mm-nek megfelelő vizet használtak fel erre a célra. A csepegtető öntözéssel a talajba jutó vízmennyiség teljes mennyiségben a talajba jut, hiszen a növények párolgásával, illetve a levelek által felfogott vízmennyiséggel nem kell számolnunk. A soroksári ültetvényen mért napi legmagasabb hőmérséklet 27 °C, a legalacsonyabb pedig –8 °C volt.



7. ábra: A Soroksári Botanikus Kertben 2 méteres magasságban mért napi átlagos hőmérsékleti értékek (a), a területen mért napi csapadékösszeg és az öntözővíz mennyisége, illetve a modellezett talajnedvességi értékek (b) 2011-ben.

A 8. ábrán a Lágymányoson mért értékek láthatók. Összehasonlítva az előző ábrával jól kitűnik a városklíma hatása, itt a nyári napi maximumhőmérséklet 30 °C, míg a minimum nem csökken -5 °C alá. Az itt mért éves csapadékmennyiség 302 mm volt. A vizsgált területen a talaj vályogos fizikai talajféleségű, amelyre az ültetvényen használt állandóktól eltérően más értékeket használtunk a talajnedvesség számításához a hervadásponthoz, a telítési talajnedvesség- és a szabadföldi vízkapacitás értékeire vonatkozóan (2.6. fejezet, 2. táblázat). A vályog szárazság esetében hamarabb eléri a hervadásponthoz, mint a homokos talaj. Ezt a tavaszi, illetve az augusztusi szárazabb időszakok is jól mutatják a talajnedvesség értékekben, ekkor a hervadásponthoz csökken annak értéke. A novemberre jellemző szárazságra a talajnedvesség értékei már nem reagáltak olyan mértékben, mint a nyári félévben, hiszen ekkor csökken a párolgás mennyisége, ezért nehezebben szárad ki a talaj.

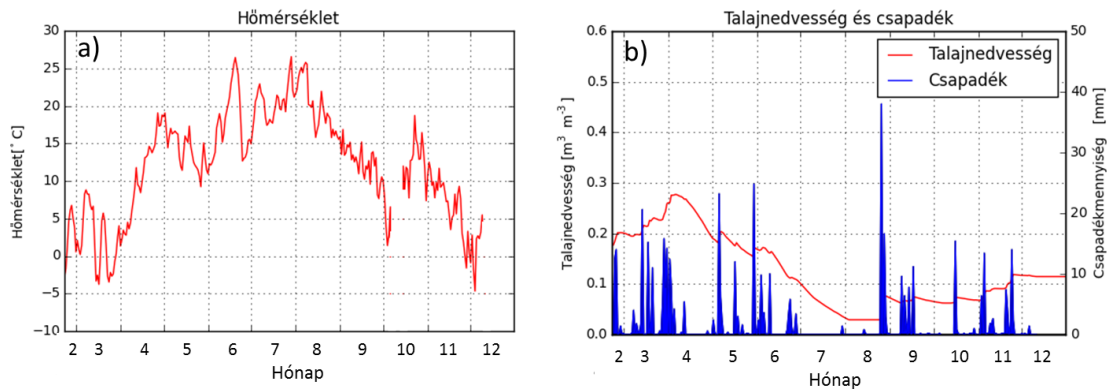


8. ábra: A Lágymányoson 2 méteres magasságban mért napi átlagos hőmérsékleti értékek (a), a területen mért napi csapadékösszeg és a modellezett talajnedvességi értékek vegyes fás (b) és fűves(c) terület esetén 2011-ben.

3.1.2. A modellezett terület hőmérsékleti és talajnedvességi viszonyai 2013-ban

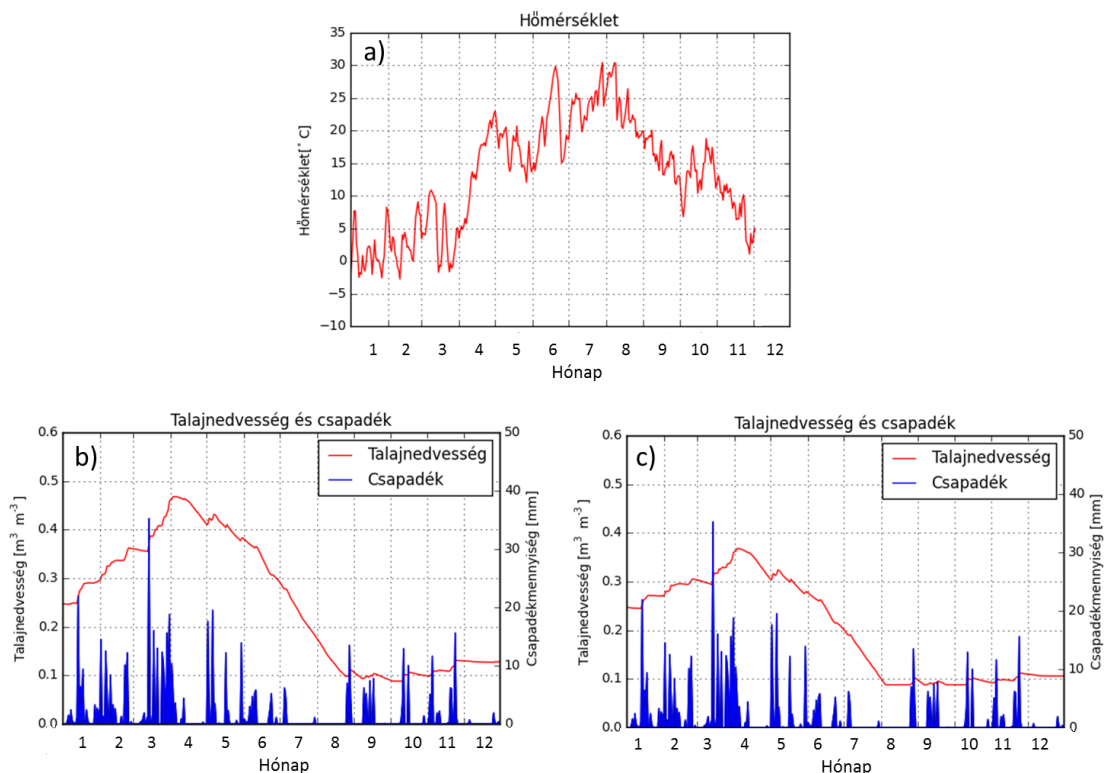
A 2013-as év szintén melegebbnek bizonyult az átlagosnál, csupán 2 hónap esetén nem haladta meg a havi átlag az országos átlagos hőmérsékleti mennyiségeket. Az év jelentős mennyiségű csapadékkal indult, melyet a nyári hónapokban szárazság követett (Vincze, 2014).

Az év első felében, április közepéig az átlagosnál jelentősen több csapadékmennyiség volt jellemző Magyarország területére. Júliusban kevés csapadék hullott, a vizsgált területen ebben a hónapban egyetlen napon regisztráltak csapadékot, melynek mennyisége 1,4 mm volt. Augusztusban néhány nap alatt hirtelen nagyobb mennyiségű eső esett (3 nap alatt 55 mm), amely a kiszáradt talaj nedvességtartalmát csak kis mértékben volt képes megnövelni. Az őszi hónapokban jelentős mennyiségű csapadék hullott, viszont a december ismét száraz hónapnak tekinthető, amely a talajnedvesség értékeiben már nem mutatkozik meg.



9. ábra: A Soroksári Botanikus Kertben 2 méteres magasságban mért napi átlagos hőmérsékleti értékek (a), a területen mért napi csapadékösszeg, illetve a modellezett talajnedvességi értékek (b) 2013-ban.

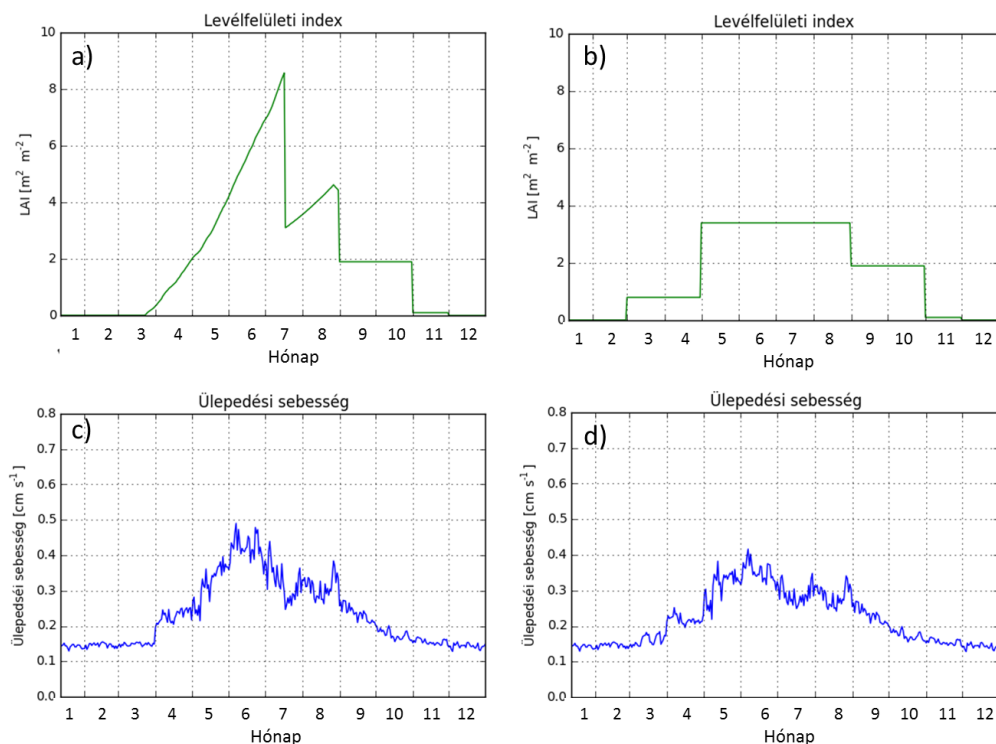
A LAI-értékeket hasonlóan a 2011-es évhez modellezett, illetve szakirodalmi adatok alapján is figyelembe vettük. Az ültetvényben 2013-ban is 27 °C, míg a városi parkban 30 °C fölé emelkedett a napi átlagos hőmérséklet maximuma, a minimum az előbbi területen –4, utóbbin csak –3 °C körül alakult.



10. ábra: A Lágymányoson 2 méteres magasságban mért napi átlagos hőmérsékleti értékek (a), a területen mért napi csapadékösszeg és a modellezett talajnedvességi értékek vegyes fás (b) és füves (c) területen 2013-ban.

3.2. A levélfelületi index hatása az ülepedési sebesség értékére

Munkám során megvizsgáltam a LAI értékek modelleredményekre gyakorolt hatását a két évre a Botanikus Kert területére vonatkozóan. Az alfejezetben összehasonlítom a modellezett és a szakirodalmi adatok alapján figyelembe vett LAI értékek esetében kapott ülepedési sebességek nagyságát. A 11. ábrán láthatók a 2011-re vonatkozó LAI-értékek, illetve a szimulációik során kapott ülepedési sebességek értékei (a 2013-as évre használt modellezett LAI értékek bemutatására a 6. ábrán már sor került).

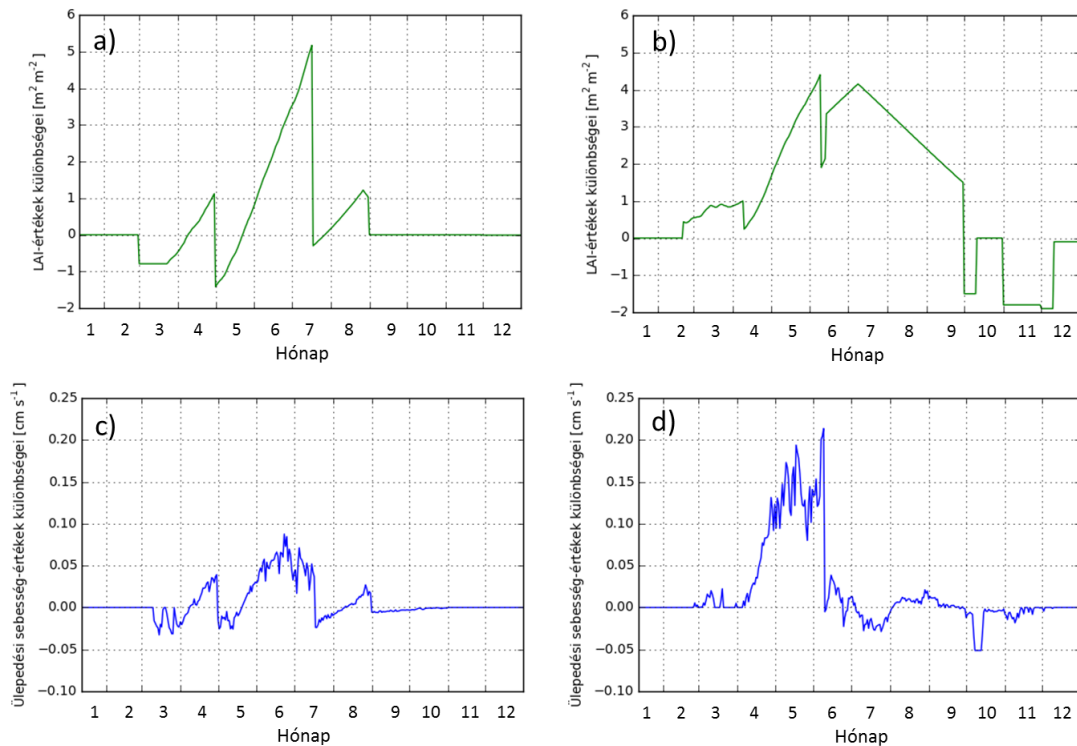


11. ábra: A modellezett (a), illetve a szakirodalmi adatok alapján számításba vett (b) LAI értékek és rendre az ezen adatokkal szimulált ülepedési sebességek értékei (c,d) a 2011-es évre a Soroksári Botanikus Kert cseresznyeültvényére.

Látható, hogy az ülepedési sebesség éves menete hasonló a két esetben, viszont főként a nyári időszakban, jelentősebb különbségek is megjelennek. A 12. ábrán az eltérések pontosítására a modellezett és szakirodalmi LAI értékek különbségeit és az így kapott ülepedési sebességek értékeinek különbségét ábrázoltam 2011-re és 2013-ra.

Megfigyelhető, hogy a mért LAI értékek jelentősen eltérnek a szakirodalmi adatok (Zhang et al., 2001) alapján használt értékektől (2.6. fejezet), ami az ülepedési sebesség értékeit is befolyásolja. Nagyobb LAI esetén az ülepedési sebesség is nagyobb értékeket vesz fel. A szakirodalmi adatok alapján számításba vett értékek esetében is csökken

júniustól az ülepedési sebesség értéke, de ez a szárazsággal, a talajnedvesség csökkenésével magyarázható.

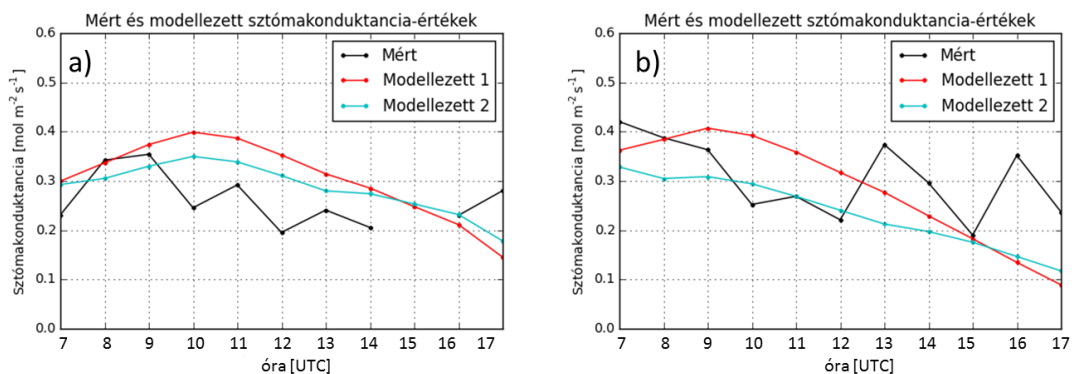


12. ábra: A modellezett és a szakirodalmi LAI értékek különbségei a 2011-es (a), illetve a 2013-as (b) évre és az ülepedési sebességek különbségei 2011-ben (c) és 2013-ban (d).

Mindkét év esetében áprilisban és májusban jelentősen különböznek a levélfelületi index értékei, mégis míg 2011-ben a maximális eltérés $0,1 \text{ cm s}^{-1}$ -nél kisebb mértékű, 2013-ban $0,2 \text{ cm s}^{-1}$ különbség is előfordul az ülepedési sebesség értékeiben. Ez a talajnedvesség változásával magyarázható, hiszen ebben az időszakban 2013-ban a talaj nedvességtartalma nagyobb, mint a 2011-es évben, ennek hatására alakulhatnak ki ott jelentősebb különbségek.

3.3. Az eredmények verifikációja

A növényzet párologtatásának jellemzésére a sztómakonduktancia alkalmas, mely a modellben jelentős szerepet tölt be az ülepedési sebesség meghatározása szempontjából. A sztómakonduktancia az egységnyi felszínen, egységnyi idő alatt áthaladó vízgőzmennyiséget adja meg egy adott levélfelület esetében $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mértékegységben. A 2013-as évben a Botanikus Kert cseresznyeültetvényére vonatkozóan két napra végeztek sztómakonduktancia-méréseket órás felbontásban. A modellezett és a mért adatokat a 13. ábrán tüntettem fel.



13. ábra: A cseresznyeültetvényen mért sztómakonduktancia-értékek (Mért), a modellezett LAI-értékekkel (Modellezett 1) és a szakirodalmi adatokkal szimulált ülepedési sebességek értékei 2013. június 13-án (a) és 2013. június 17-én (b).

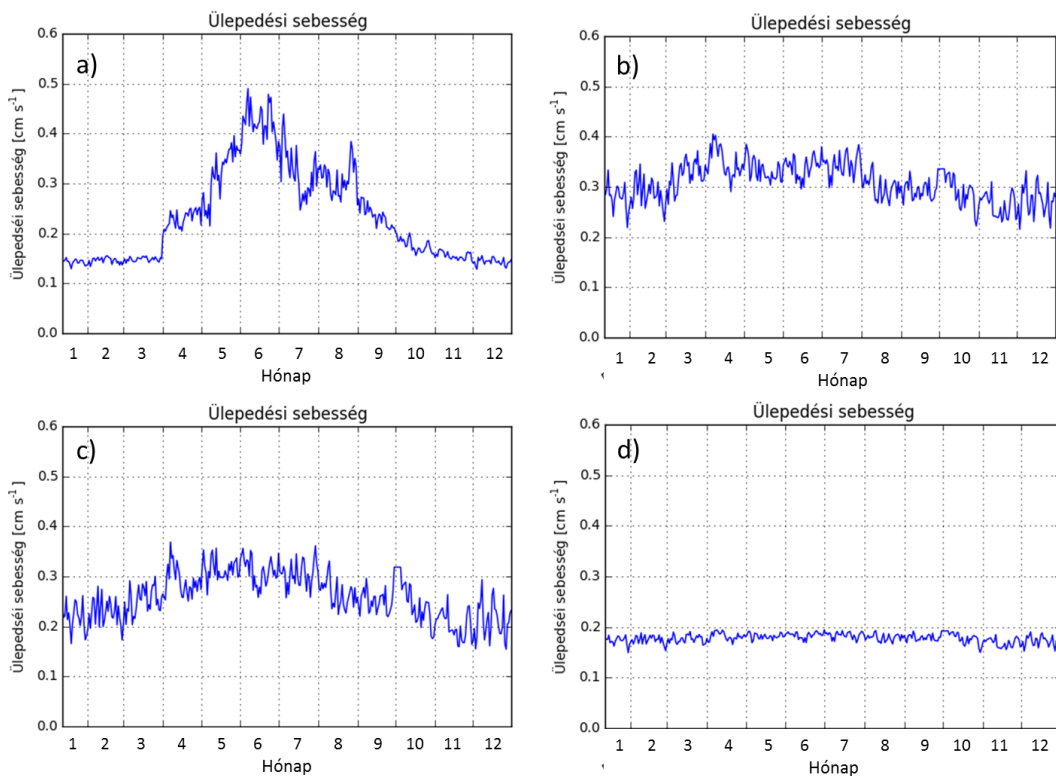
A sztómakonduktancia csak a nappali órákban számottevő, éjszaka a besugárzás hiányában a párologás mértékét nem vesszük figyelembe. Látható, hogy a modellezett értékek jól követik a mérési adatokat és maximum $0,1 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ értékkel térnek el egymástól a különböző forrásokkal figyelembe vett LAI-értékek esetében. A modellezett sztómakonduktancia adatok mérésekkel való összevetése mindazonáltal további szimulációkat és a modellparaméterek finomítását igényli.

3.4. Az ülepedési sebesség és a fluxus éves menete

3.4.1. Éves menet 2011-ben

A 14. ábrán a négy felszín típusra vonatkozó modellezett ülepedési sebesség értékei láthatók cm s^{-1} egységben. Megállapítható, hogy az ülepedés mértéke a cseresznyeültetvény esetében a nyári hónapokban a legjelentősebb, ekkor a $0,5 \text{ cm s}^{-1}$ értéket is majdnem eléri. A cseresznyeültetvényre kapott szimulációk jól tükrözik az ülepedési sebesség jellemző éves menetét, látható, hogy a nyári félévben magas, a téli félévben kisebb értékek adódnak.

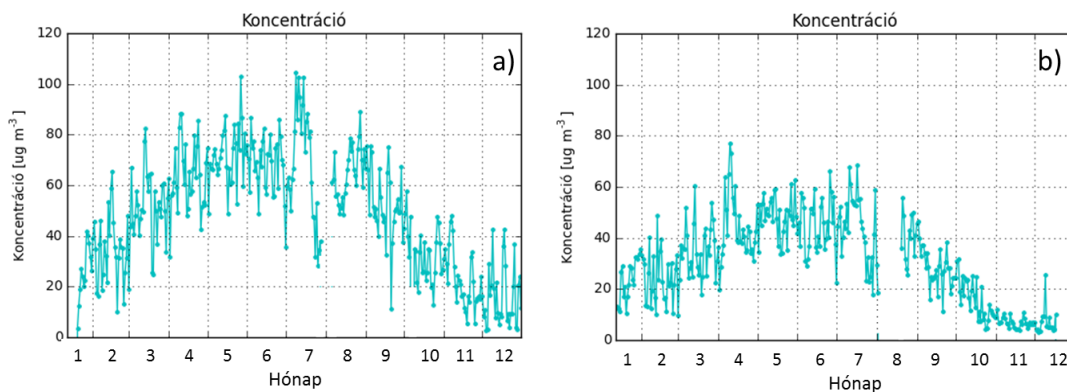
2011-ben a másik modellezett területen, Lágymányoson viszont mindhárom felszín típus esetében egyenletesebb menet figyelhető meg az ülepedési sebességek értékeiben, melyek nyáron kisebbek, télen viszont minden esetben nagyobbak, mint a cseresznyeültetvényre szimulált eredmények.



14. ábra: A cseresznyeültetvényre (a) és Lágymányos területére vonatkozó ülepedési sebesség éves menete vegyes fás (b), füves (c) és beépített terület (d) esetére 2011-ben.

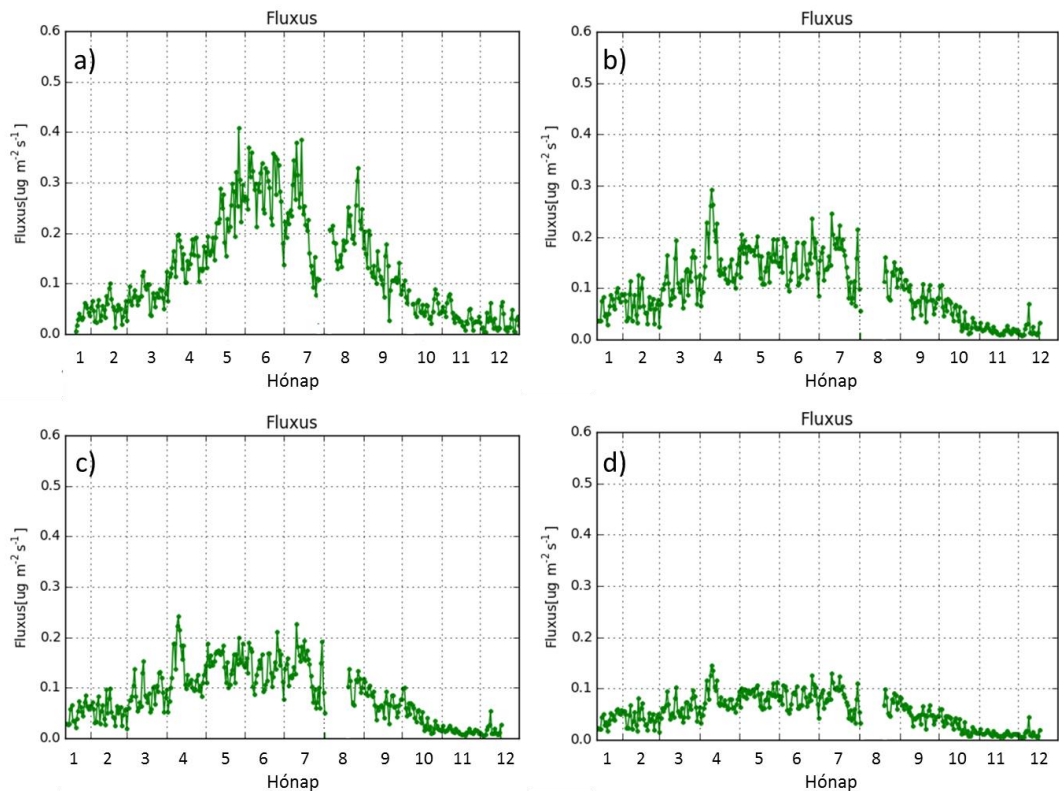
A fluxus számítása során az egységnyi felszínre kiülepedett ózon mennyiségét a koncentráció, illetve az ülepedési sebesség szorzataként kapjuk meg. A 15. ábrán a budapesti Gilice téren és a Kosztolányi Dezső téren mért napi ózonkoncentráció-értékek éves menetét tüntettem fel. A soroksári Botanikus Kert területére fluxusszámításainkhoz a Gilice téri külvárosi háttérszennyezettségi mérőállomás adatait használtuk fel. Ez a terület a modellezett területtől 4 km-re helyezkedik el, a mérőállomás szolgáltatja számunkra a legrepresentatívabb koncentráció-értékeket a külvárosi terület esetében. A lágymányosi területen a területhez közel eső légszennyezettségi mérőállomás, a Kosztolányi Dezső téri mérőállomás adatait használtuk fel.

Látható, hogy a Gilice téri, külvárosi háttérállomáson jelentősen nagyobb koncentráció-értékek alakultak ki, elsősorban annak köszönhetően, hogy a belvárosban (Kosztolányi Dezső tér) a közlekedési eredetű, magas antropogén NO emisszió ózonbontó hatása kompenzálja az ózon keletkezési mechanizmusát.



15. ábra: A Gilice téren (a) és a Kosztolányi Dezső téren (b) mért napi ózonkoncentráció értékei 2011-ben.

Korábban a koncentráció-értékeket tekintették az ózon károsító hatásának mérőszámaként, de vizsgálatok rámutattak, hogy a kiülepedett szennyezőanyag mennyiségét jelentősen befolyásolja az ülepedési sebesség, melyre számos tényező hatással van. Az ülepedés és a vegetációra gyakorolt káros hatások vizsgálata során tehát nem elegendő a koncentráció ismerete, hiszen az csak egy elsődleges becslésre alkalmas, a fluxus értékét ennél jóval több tényező befolyásolja.



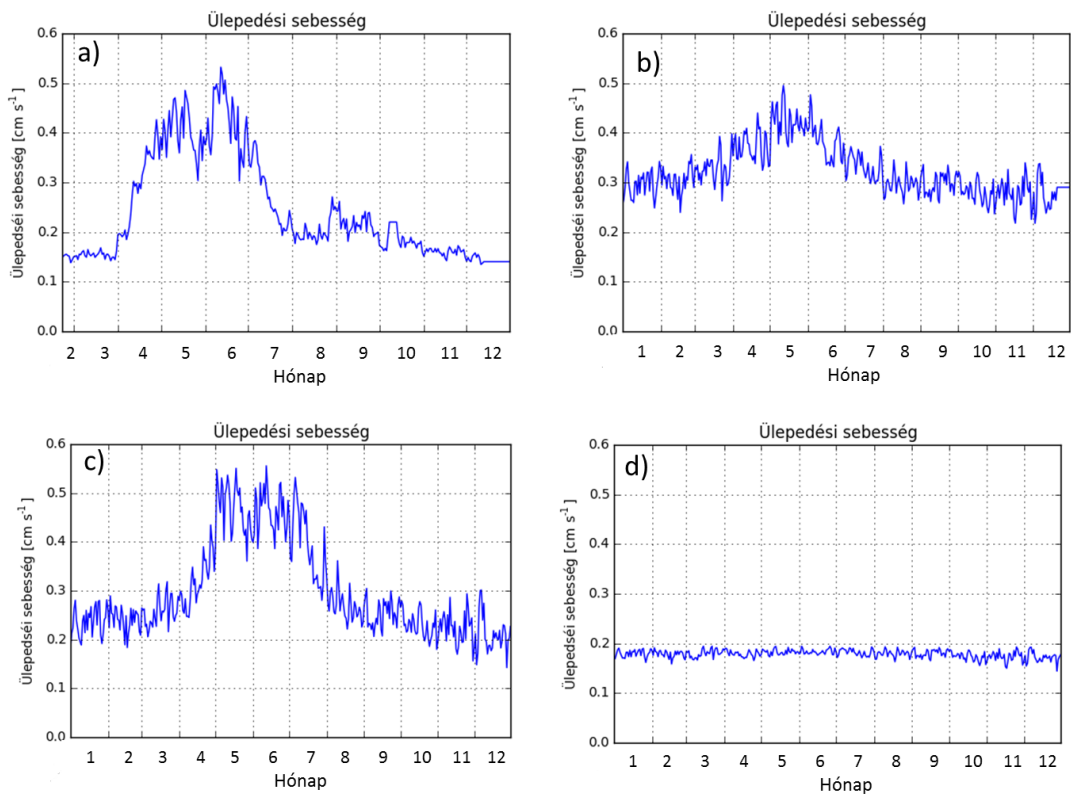
16. ábra: A cseresznyeültetvényre (a) és Lágymányos területére vonatkozó fluxus értékeinek éves menete vegyes fás (b), füves (c) és beépített terület (d) esetére 2011-ben.

Eredményeink is mutatják (16. ábra), hogy a különböző felszíneken jelentős eltérés figyelhető meg a fluxusok értékeiben. A felszínen megkötődő ózommennyiség Lágymányos területén követi a koncentráció menetét, viszont az értékekben megfigyelhető az ülepedési sebességek jelentős hatása is. Ebben az évben a fás és füves terület között jelentős különbség nincs az ülepedési sebesség esetében, ezért a fluxusok is csak kisebb mértékben térnek el egymástól. Viszont kiemelhetők a beépített területre kapott eredmények, amelyen látható, hogy az alacsonyabb ülepedési sebességek alacsonyabb fluxusértékeket is eredményeznek.

3.4.2. Éves menet 2013-ban

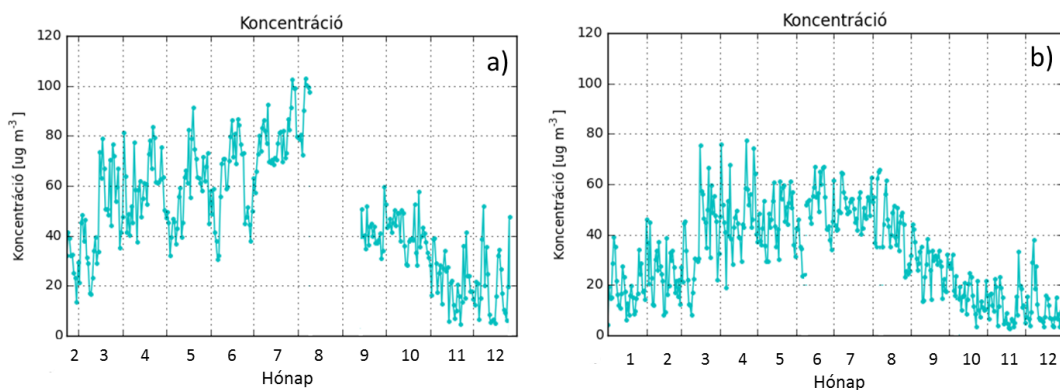
A következő ábrán a négy felszín típusra vonatkozó modellezett ülepedési sebesség értékei láthatók $cm\ s^{-1}$ egységben. Megállapítható, hogy az ülepedés mértéke a cseresznyeültetvény esetében a nyári hónapokban a legjelentősebb, ekkor a $0,5\ cm\ s^{-1}$ értéket is csaknem eléri. Az ültetvényre kapott szimulációk jól tükrözik az ülepedési sebesség jellemző éves menetét; látható, hogy a nyári félévben magas, a téli félévben kisebb értékek adódnak.

2011-ben a másik modellezett területen, Lágymányoson viszont mindhárom felszín típus esetében egyenletesebb menet figyelhető meg az ülepedési sebességek értékeiben, melyek nyáron kisebbek, télen viszont minden esetben nagyobbak, mint az ültetvényre szimulált eredmények. 2013-ban a beépített terület kivételével a további három felszín típusnál jelentős eltérések figyelhetők meg a 2011-es évhez képest. A 17. ábrán a 2013-ra modellezett ülepedési sebesség értékeit tüntettem fel. Cseresznyeültetvény esetében hasonlóság a két évben, hogy az értékek április elejétől kezdenek napról-napra jelentősebben növekedni, viszont 2011-ben június elejéig figyelhető meg ez a növekvő tendencia, 2013-ban pedig ebben az időszakban május közepétől június elejéig kisebb ülepedési sebességek alakulnak ki. A hőmérséklet napi átlagait tekintve látható, hogy ebben az időszakban kb. $5\ ^\circ C$ -os különbség figyelhető meg. 2013-ban a csökkenés után ismét növekedni kezd az ülepedési sebesség értéke, és június első felében éri el a maximális értéket. Vegyes fás terület esetében a két év során már jelentősebb különbségeket figyelhetünk meg. Első szembetűnő különbség az, hogy 2011-ben sokkal egyenletesebb értékeket kaptunk, 2013-ban a nyári időszakban jelentősebb mértékben megnőtt az ülepedési sebesség, míg 2011-ben áprilisban ($0,4\ cm\ s^{-1}$), 2013-ban májusban éri el maximumát ($0,5\ cm\ s^{-1}$). Fűvel borított terület esetében még szembetűnőbb a különbség, hiszen májusban és júniusban 2013-ban jelentősen megnő az ülepedési sebesség értéke, maximuma $0,55\ cm\ s^{-1}$, míg 2011-ben $0,35\ cm\ s^{-1}$ körül mozog.

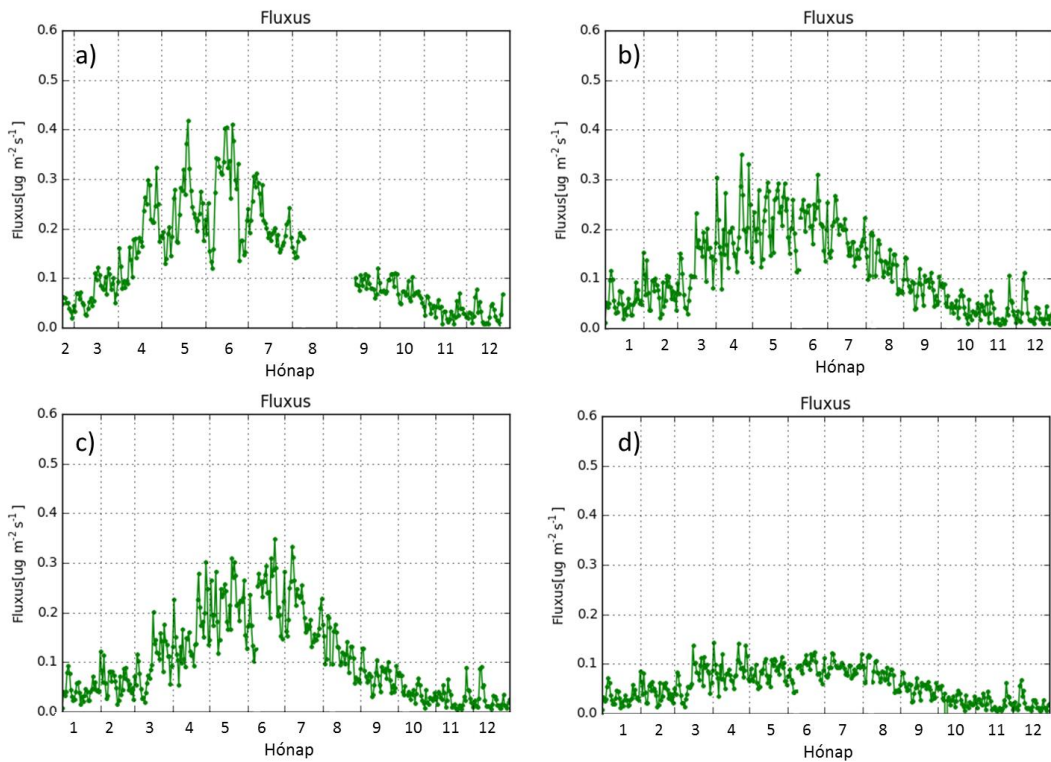


17. ábra: A cseresznyeültetvényre (a) és Lágymányos területére vonatkozó ülepedési sebesség értékeinek éves menete vegyes fás (b), fűves (c) és beépített terület (d) esetére 2013-ban.

A 18. ábrán a 2013-as év Gillice téri és Kosztolányi Dezső téri koncentráció-értékek napi átlagait tüntettem fel.



18. ábra: A Gillice téren (a) és a Kosztolányi Dezső téren (b) mért napi ózonkoncentráció értékei 2013-ban.



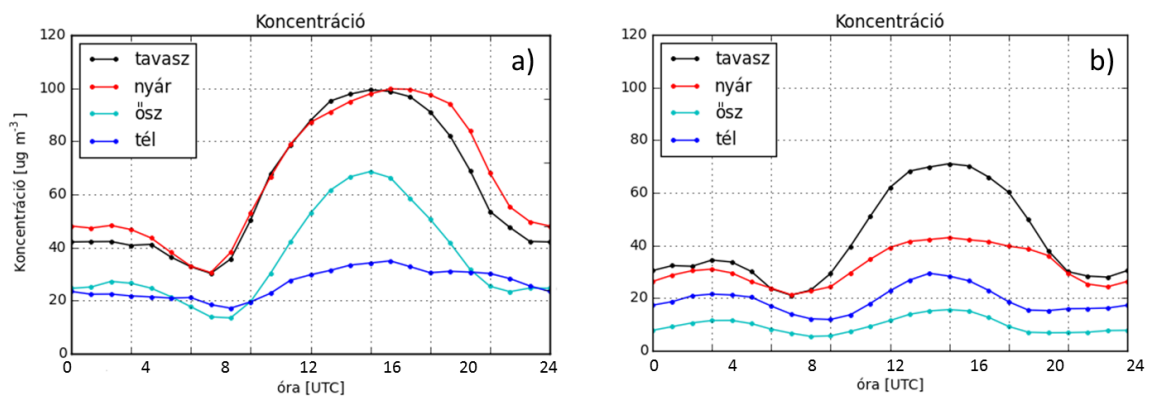
19. ábra: A cseresznyeültetvényre (a) és Lágymányos területére vonatkozó fluxus értékeinek éves menete vegyes fás (b), füves (c) és beépített terület (d) esetére 2013-ban.

Ebben az évben 2011-hez képest az ülepedési sebességhez hasonlóan a fluxus értékében is megjelennek a különbségek, illetve a növények ózonerhelésére vonatkozóan a ülepedési sebesség jelentősége.

3.5. Évszakos napi menetek

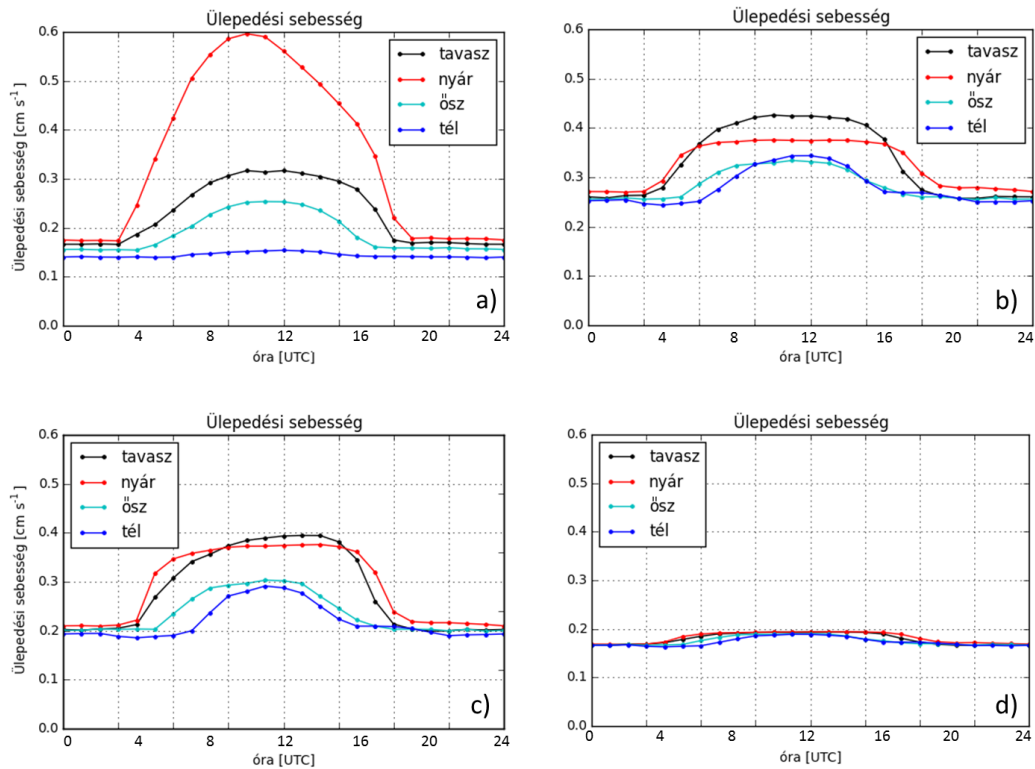
3.5.1. Az ülepedési sebesség és a fluxus évszakos napi menete 2011-ben

Az ózon ülepedési sebességének és fluxusának napi menetét is megvizsgáltuk mindkét évre, a vizsgált felszintípusokra megadva az órás átlagokat. A 20. ábrán a két mérőállomáson mért ózonkoncentrációk átlagos évszakos napi menetei láthatók. A koncentráció-értékek minden évszakban a délutáni órákban érik el a maximumot (1.3. fejezet).



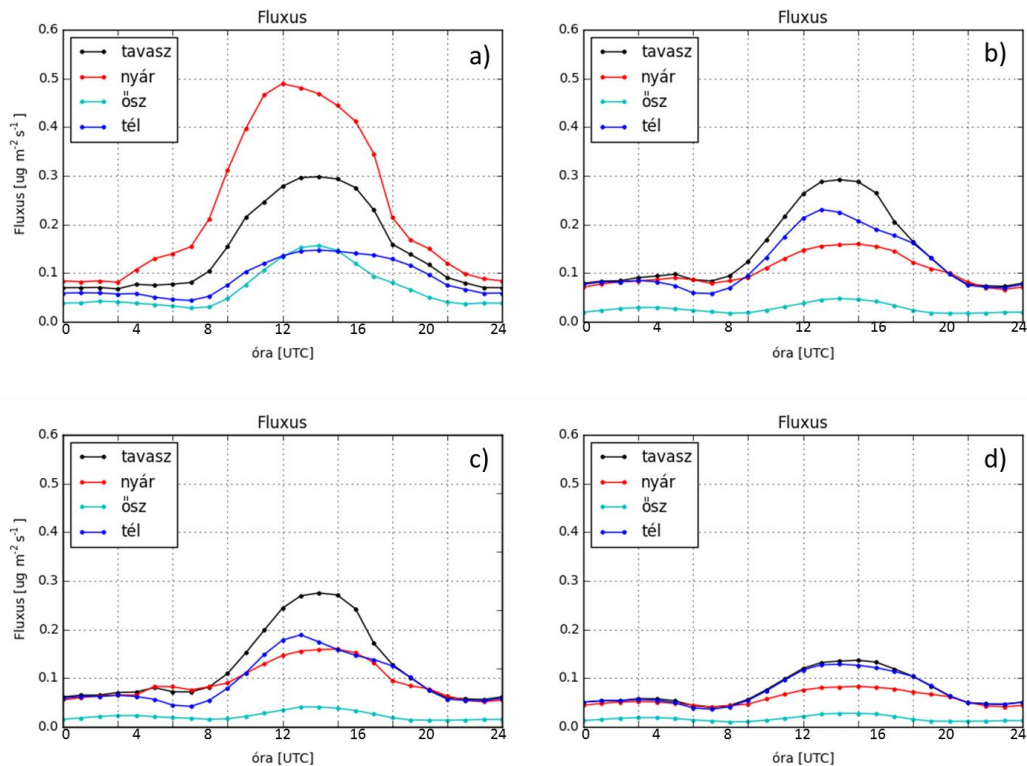
20. ábra: A Gilice téren (a) és a Kosztolányi Dezső téren (b) mért ózonkoncentrációk napi évszakos átlagai 2011-ben.

A 21. ábrán a modellezett ülepedési sebességek évszakos napi menetét tüntettem fel. Szembetűnő, hogy az ülepedési sebesség a cseresznyeültetvény esetében éri el a legmagasabb értéket a nyári hónapokban. A maximumát ($0,6 \text{ cm s}^{-1}$) 10 UTC-kor éri el. Látható, hogy tavasszal jelentősen lecsökken ez az érték, télen pedig csaknem állandó, és értéke igen alacsony. Az éves menetben is megfigyelhető, egyenletesebb eloszlás a napi menetben is jól látható a fás, a fűvel borított, illetve a beépített területek esetében is. Beépített területen a növényi tulajdonságok nem hatnak az ülepedési sebességre, ezért az év során jelentős különbség nem figyelhető meg.



21. ábra: Modellezett ülepedési sebesség-értékek a Botanikus Kert (a), a vegyes fás (b), a füves (c) és a beépített terület (d) esetére 2011-ben.

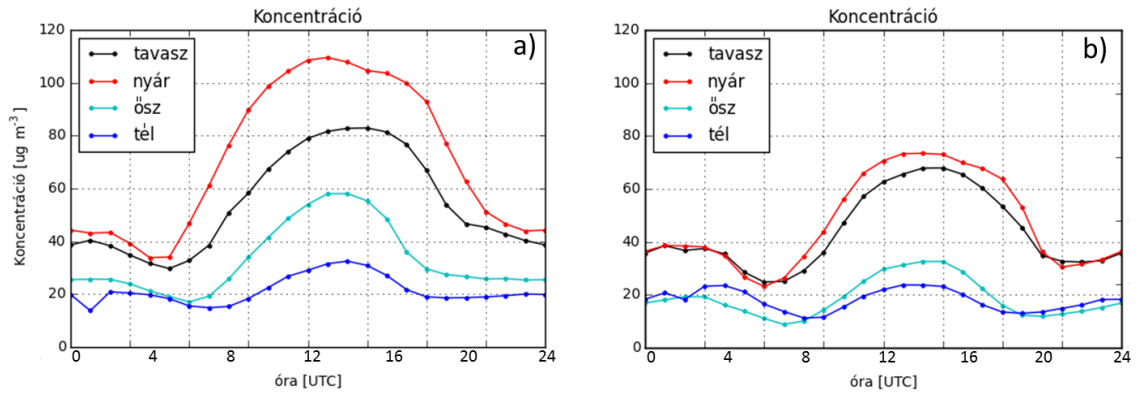
A fluxus értékeiben (22. ábra) is a legnagyobb értékek a cseresznyeültetvény esetében figyelhetők meg. A területen a magas ülepedési sebességeknek és a magasabb ózonkoncentrációjú levegőnek köszönhetően az ültetvény fáit nagy mennyiségű szennyezőanyag éri, leginkább a nyári évszak folyamán, amely a mezőgazdaság szempontjából jelentős károkat eredményezhet. Az ELTE lágymányosi területén ennél jóval alacsonyabb fluxusértékek adódtak szimulációink során, amely egyrészt a koncentráció-értékeknek, másrészt pedig az ülepedési sebességek alacsonyabb nyári értékeinek köszönhető.



22. ábra: Modellezett fluxus-értékek a Botanikus Kert (a), a vegyes fás (b), a füves (c) és a beépített terület (d) esetére 2011-ben.

3.5.2. Az ülepedési sebesség és a fluxus évszakos napi menete 2013-ban

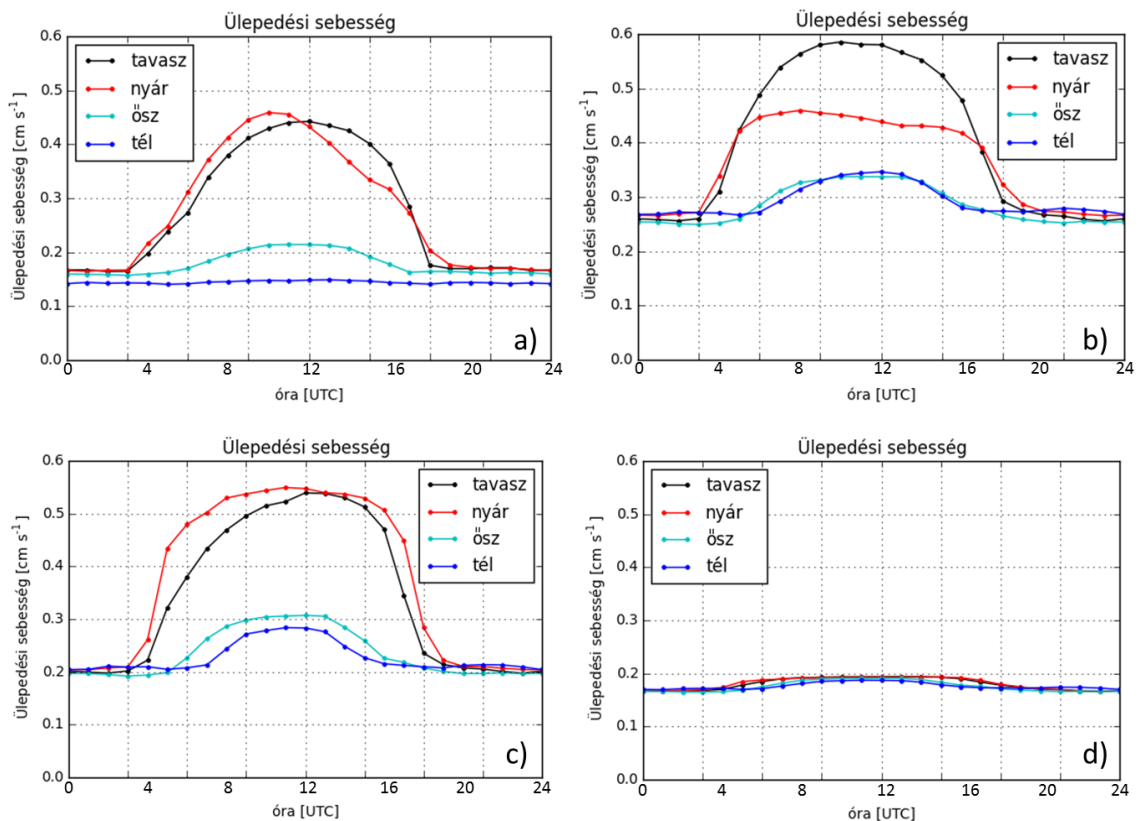
A 2011-es évhez képest az ózonkoncentráció értékeiben jelentős eltérést tapasztalhatunk. A napi átlagos maximum-értékek a nyári hónapokban $100 \mu\text{g m}^{-3}$ felett alakultak a Gilice téri mérőállomás adatai alapján. Ebben az évben is megfigyelhetők a Kosztolányi Dezső téren a kisebb koncentráció-értékek, illetve jelentős lehet, hogy a mérőállomáson a nyári átlagos napi értékek csak kismértékben haladják meg a tavaszi értékeket.



23. ábra: A Gilice téren (a) és a Kosztolányi Dezső téren (b) mért ózonkoncentrációk évszakos napi átlagai 2013-ban.

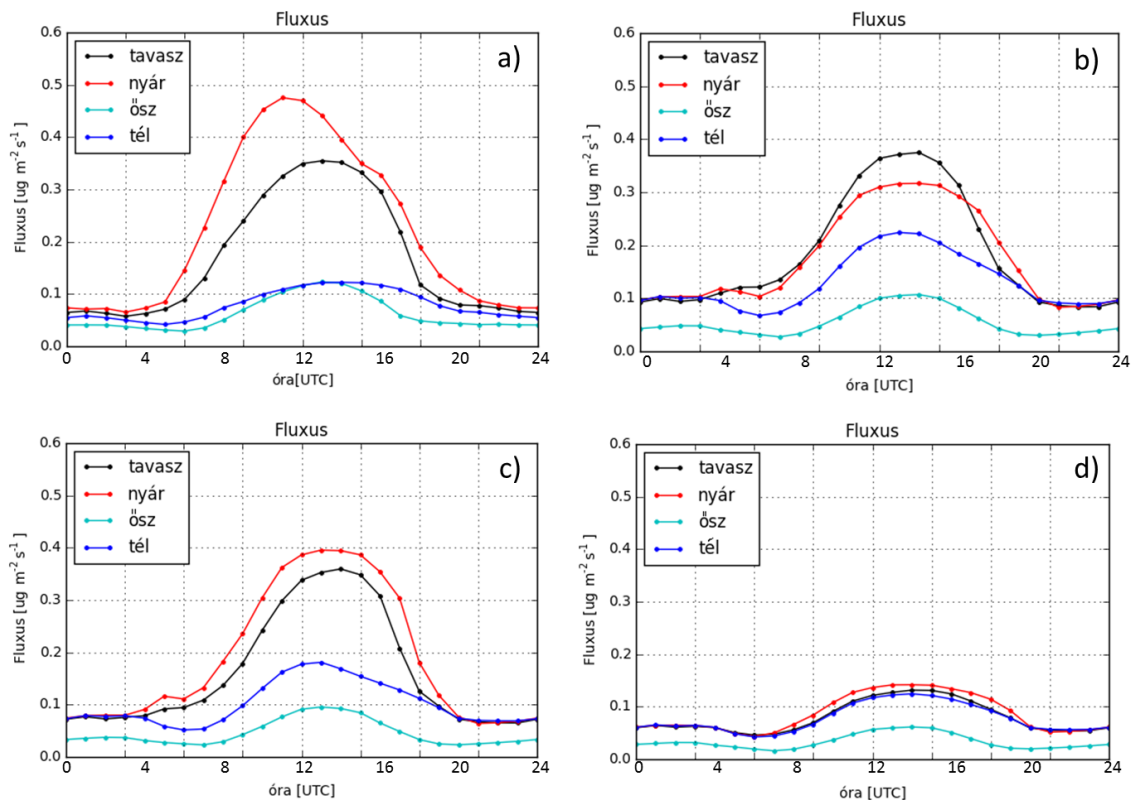
2011-hez képest 2013-ban a nyári maximális napi átlagos ülepedési sebesség érték $0,15 \text{ cm s}^{-1}$ -mal kevesebb, tavasszal pedig hozzávetőlegesen ennyivel magasabb. Ez azzal magyarázható, hogy 2013-ban nyáron alacsonyabb, tavasszal viszont nagyobb volt a talaj nedvességtartalma.

Beépített terület esetén pedig az egész évre jellemzően egy csaknem konstans érték jellemző.



24. ábra: Modellezett ülepedési sebesség-értékek a Botanikus Kert (a), a vegyes fás (b), a füves (c) és a beépített terület (d) esetére 2013-ban.

A fluxus vizsgálatok esetében megfigyelhető a koncentrációk évszakonkénti napi menete. A 25. ábrán látható, hogy mindkét év esetén a cseresznyeültetvényre, a füves és beépített területre vonatkozó fluxusértékek napi átlagai nyáron maximálisak, télen és ősszel nincs jelentős különbség köztük. Viszont a lombhullató és örökzöld fákkal borított területen a fluxus mennyisége a tavaszi hónapokban éri el a maximumot, amely leginkább az örökzöldekre vonatkozó magasabb LAI értékeknek köszönhető.



25. ábra: Modellezett fluxus-értékek a Botanikus Kert (a), a vegyes fás (b), a füves (c) és a beépített terület (d) esetére 2013-ban.

3.6. Évszakos ülepedési sebességek átlagos értékei

A vizsgált két évre vonatkozóan az átlagos nappali és éjszakai ülepedési sebességeket a 4. és 5. táblázatban foglaltam össze az egyes évszakokra. Ezen értékeken is megfigyelhető, hogy a gyümölcsös területre, a nyári időszakra jellemzőek a legnagyobb ülepedési sebesség értékek. A vegyes fás területen 2013 tavaszára kaptuk a legnagyobb ülepedési sebességeket. Két terület esetében (füves és vegyes fás) 2011-ben fordult elő, hogy a tavaszi átlagos értékek meghaladták a nyári értékeket.

4. táblázat: A modelletett felszíntípusok esetében kapott átlagos évszakos ülepedési sebességek és szórásuk a 2011-es évre cm s^{-1} mértékegységben. A vastagon szedett értékek a nappali ülepedési sebességeket jelölik.

		2011			
		tavaszi	nyári	ősz	tél
Gyümölcsös		0,20±0,08	0,27±0,15	0,17±0,04	0,14±0,01
		0,31±0,15	0,54±0,14	0,24±0,08	0,15±0,01
Vegyes lombhullató		0,30±0,07	0,31±0,06	0,27±0,05	0,26±0,05
		0,42±0,04	0,37±0,03	0,32±0,03	0,33±0,05
Fű		0,24±0,08	0,26±0,08	0,21±0,06	0,20±0,05
		0,39±0,05	0,37±0,03	0,29±0,06	0,27±0,06
Beépített terület		0,17±0,02	0,18±0,02	0,17±0,02	0,17±0,02
		0,19±0,01	0,19±0,01	0,19±0,01	0,19±0,01

Megfigyelhető az is, hogy beépített területen az egész évre egyetlen ülepedési sebesség vonatkozik ($0,19 \text{ cm s}^{-1}$), illetve az éjszakai órák folyamán sem csökken jelentősen ennek értéke.

5. táblázat: A modelletett felszintípusok esetében kapott átlagos évszakos ülepedési sebességek és szórásuk a 2013-as évre cm s^{-1} mértékegységben. A vastagon szedett értékek a nappali ülepedési sebességeket jelölik.

	2013			
	tavaszi	nyár	ősz	tél
Gyümölcsös	0,22±0,13	0,24±0,14	0,17±0,03	0,14±0,01
	0,43±0,24	0,45±0,23	0,23±0,07	0,15±0,01
Vegyes lombhullató	0,28±0,06	0,37±0,16	0,30±0,07	0,26±0,05
	0,39±0,08	0,60±0,11	0,36±0,05	0,31±0,04
Fű	0,28±0,15	0,31±0,17	0,21±0,06	0,21±0,05
	0,52±0,20	0,54±0,17	0,29±0,05	0,27±0,06
Beépített terület	0,18±0,02	0,18±0,02	0,17±0,02	0,17±0,01
	0,19±0,01	0,19±0,01	0,19±0,01	0,18±0,01

Összefoglalás

Diplomamunkámban az ózon ülepedésének modellezésével foglalkoztam, mely fontos a mezőgazdaságban, a károk felmérésében, illetve városok tervezése során. Néhány évvel ezelőtt megjelentek olyan fluxus-alapú mérőszámok, melyek már képesek az ózon egyes növényekre gyakorolt közvetlen hatását is megadni. Ehhez azonban szükség van a légköri viszonyoktól, a növényzet fiziológiai állapotától, a talaj szerkezetétől és állapotától, valamint a felszíntől egyaránt függő ülepedési sebesség meghatározása.

Munkánk során egy olyan kifinomult ülepedési modellt adaptáltam különböző felszín típusokra, amely részletes bemeneti adatokat felhasználva becsli az ózon ülepedési sebességét és ülepedési fluxusát. A modellt korszerű python programnyelven programoztam, ami alkalmassá teszi a hatékony, gyors működésre, ami elengedhetetlen feltétele a későbbi érzékenységi és verifikációs vizsgálatoknak.

A modellel a Budapesti Corvinus Egyetem Soroksári Botanikus Kertjének cseresznyeültetvényére, illetve az ELTE lágymányosi épületegyüttesének területére végeztem részletes szimulációkat. E területekről rendelkezésre álltak a modell számára szükséges bemenő adatok a 2011-es és 2013-as évre, órás felbontásban.

Diplomamunkámban négy különböző felszín típus ülepedési sebességeinek viszonyait vizsgáltam, külön vizsgálatokat végezve a levélfelületi index modelleredményekre gyakorolt hatásait is figyelembe véve. Ezen kívül elvégeztem a modell elsődleges verifikációs vizsgálatát mért sztómakonduktancia adatok alapján. Eredményeink biztatóak a modell megbízhatósága szempontjából.

A modell elkészítése és adaptálása alapot jelent a tervezett további kutatások számára. További terveink között szerepel a növényzet- és talajfüggő bemeneti paraméterek pontosítása, valamint további szimulációk elvégzése városi környezetekben található növényállományokra, ezáltal az ózonülepedés mértékében a városon belül tapasztalható különbségek feltárása.

Köszönetnyilvánítás

Tisztelettel megköszönöm Dr. Mészáros Róbertnek munkám során nyújtott folyamatos szakmai segítségét, építő ötleteit és tanácsait.

Köszönetemet fejezem ki Leelőssy Ádámnak modellezési tapasztalatainak, ismereteinek átadásáért és támogatásáért.

Megköszönöm Steiner Márknak, hogy munkám során lehetőséget kaptam a Budapesti Corvinus Egyetemen való együttműködésre.

A kutatást az OTKA 109109 és 109361 kutatási pályázatok támogatták.

Irodalomjegyzék

- Ács, F. 2004: A talaj-növény-légkör rendszer modellezése a meteorológiában: A növényi párolgás és a talaj kapcsolata. *Monográfia*, 117 oldal, Eötvös Kiadó, Budapest
- Ács, F., Horváth, Á., Breuer, H., Rubel, F. 2010: Effect of soil hydraulic parameters on the local convective precipitation. *Meteorologische Zeitschrift* 19 (2), pp. 143–153.
- Baldocchi, D., D., Hicks, B., B., Camara, P. 1987: A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. *Atmospheric Environment* 21, 91–110.
- Bell M. L. and Davis D.L. 2001: Reassessment of the Lethal London Fog of 1952: Novel Indicators of Acute and Chronic Consequences of Acute Exposure to Air Pollution. *Environmental Health Perspectives*. Vo. 109. 389–394.
- Brook, J. R., Zhang, L., Di-Giovanni, F., Padro, J. 1999: Description and evaluation of a model of deposition velocities for routine estimates of air pollutant dry deposition over North America. Part I: model development. *Atmospheric Environment* 33, 5037–5051.
- Chen, F. and Dudhia, J. 2001: Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity', *Monthly. Weather Review*. 129, 569–585.
- Czender, Cs. 2007: A magyarországi erdőállományokat érő ózonerhelés becslése. Diplomamunka. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest
- Emberson, L., Bücker, P., Ashmore, M., R., 2007: Assessing the risk caused by ground level ozone to European forest trees: A case study in pine, beech and oak across different climate regions. *Environmental Pollution* 147, 454–466.
- Fuhrer, J., Skärby, L., Ashmore, M. R. 1997: Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environmental Pollution* 97, 91–106.
- Haagen-Smit A. J. and Fox M.M. 1954: Photochemical ozone formation with hydrocarbons and automobile exhaust. *Air Repair*. Vo. 4. 105–109.
- Helfand W.H., Lazarus J., and Theerman P., 2001: Donora, Pennsylvania: An environmental disaster of the 20th century. *American Journal of Public Health*. Vo. 91. No. 4. 553.
- Juhász, Á. 2006: Az ózonerjedés becslése csatolt terjedési-ülepedési modellel. Diplomamunka. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest

- Juhász, Á., 2012: Intenív cseresznyeültetvény vízfelvétel dinamikájának meghatározása nedvaram mérések alapján. Doktori értekezés Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest
- Komjáthy, E., 2008a: A TREX terjedési-ülepedési modell fejlesztése és alkalmazása egy új vízháztartási almodul beépítésével. Tudományos Diákköri Dolgozat. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest
- Komjáthy, E., 2008b: Ülepedési modell fejlesztése és alkalmazása az ózonerhelés becslésére. Diplomamunka. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest
- Lagzi, I., Kármán, D., Turányi, T., A. S. Tomlin, Haszpra, L. 2004a: Simulation of the dispersion of nuclear contamination using an adaptive Eulerian grid model. *Journal of Environmental Radioactivity* 75. pp. 59–82.
- Lagzi, I., Mészáros, R., Horváth, L., Tomlin, A., Weidinger, T., Turányi, T., Ács, F. and Haszpra, L. 2004b: Modelling ozone fluxes over Hungary. *Atmospheric Environment*, Vol. 38, pp.6211–6222.
- Lamaud, E., Loubet, B., Irvine, M., Stella, P., Personne, E., Cellier, P. 2009: Partitioning of ozone deposition over a developed maize crop between stomatal and non-stomatal uptakes, using eddy-covariance flux measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 149, pp. 1385–1396.
- Leelőssy, Á., Ludányi, E.L., Kohlmann, M., Lagzi, I., Mészáros, R. 2013: Comparison of two Lagrangian dispersion models: a case study for the chemical accident in Rouen, January 21-22, 2013. *Időjárás*, (4)pp. 435–450.
- Mészáros, R., Szinyei, D., Vincze, Cs., Lagzi, I., Turányi, T., Haszpra, L., Tomlin A.S., 2009: Effect of the soil wetness state on the stomatal ozone fluxes over Hungary. *Int. J. Environment and Pollution* 36, 180–194.
- Mészáros, R., Vincze, Cs., Lagzi, I. 2010: Simulation of accidental release using a coupled transport (TREX) and numerical weather prediction (ALADIN) model. *Időjárás*, 114(1-2) pp. 101–120.
- Mills, G., Pleijel, H., Braun, S., Büker, P., Bermejo, V., Calvo, E., Danielsson, H., Emberson, L., González, F., I., Grünhage, L., Harmens, H., Hayes, F., Karlsson, P-E., Simpson, D., 2011: New stomatal flux-based critical levels for ozone effects on vegetation. *Atmospheric Environment* 45, 5064–5068.
- Mintz, Y. and Walker, G., K. 1993: Global fields of soil moisture and land surface evapotranspiration derived from observed precipitation and surface air temperature, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, pp.1305–1334.
- Móring, A., 2012: A 2011. év időjárása. *Léggör, LVII. évfolyam*, 1. 38–42.
- MSZ 21457-4, 2002: A felszínközeli légréteg dinamikai jellemzőinek kiszámítása mértékadó meteorológiai adatokból.

- 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.
- Nemery B., Hoet P.H.M., and Nemmar A.. 2001. The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *Lancet. Vo. 357. No. 9257. 704–708.*
- Piblinger, B., 2014: Levélfelületi index mérése és modellezése cseresznyésben. Szakdolgozat. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest
- Szinyei, D. és Vincze, Cs. 2006: Talajnedvesség-becslő modell tesztelése és alkalmazása magyarországi adatsorokon. *Légkör, 51. évf., 3. szám, 10–12.*
- Vincze, E., 2014: A 2013. év időjárása. *Légkör, LIX. évfolyam, 1. 37–40.*
- Weiss, A. and Norman, J.M., 1985: Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near infra-red components. *Agricultural Forest Meteorology, 34:205–213.*
- Zhang, L., Moran, M. D., Brook, J. R., 2001: A comparison of models to estimate in-canopy photosynthetically active radiation and their influence on canopy stomatal resistance. *Atmospheric Environment* 35, 4463–4470.
- Zhang, L., Vet, R., Brook, J., and Legge, A. 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.

Internetes források:

[1] – <http://www.levegominoseg.hu>

[2] – www.greenindustry.uwex.edu/problemdetails.cfm?problemid=1785

[3] – <http://www.sei-international.org/do3se>