

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Meteorológiai Tanszék

## A magyarországi erdőállományokat érő ózonterhelés becslése



*Készítette:*

**CZENDER CSILLA**

*Témavezető:*

**dr. Mészáros Róbert**  
(*ELTE Meteorológiai Tanszék*)

*Konzulens:*

**dr. Lagzi István László**  
(*ELTE Kémiai Intézet*)

Budapest, 2007.

## TARTALOMJEGYZÉK

<b>1. Bevezetés</b> .....	3
<b>2. A felszínközeli ózon</b> .....	5
2.1 Az ózon mérőszámai.....	6
2.2 Az ózonterhelés vegetációra gyakorolt hatásai.....	7
2.3 Az ózonterhelés erdőkre gyakorolt hatása .....	9
2.4 Az ózonterhelés vizsgálata Magyarország területére .....	11
2.4.1 EMEP ózonterhelési térképek.....	11
2.4.2 Korábbi modellfuttatások.....	15
2.4.3 Hazai mérések .....	16
<b>3. Modellszámítások</b> .....	17
<b>4. Eredmények</b> .....	25
4.1 Az ülepedési sebesség térbeli eloszlása erdőállományokra.....	25
4.2 Az ülepedési sebesség menete a nyári félévben .....	30
4.3 Koncentráció és fluxus alapú ózonterhelési térképek.....	33
4.4 Érzékenységi vizsgálat.....	36
<b>5. Az eredmények értékelése</b> .....	42
<b>6. Összefoglalás</b> .....	44
<b>Irodalomjegyzék</b> .....	46
<b>Köszönetnyilvánítás</b> .....	51

## 1. Bevezetés

A felszínközeli ózon káros hatása a különböző élő szervezetekre régóta ismert. A növények esetében ez a levelek elhalását, korai öregedését okozhatja, kedvezőtlenül befolyásolja a fotoszintézist, valamint a szén-dioxid termelését és szállítását. Hosszútávon az ózon csökkentheti a növények tervezett hasznosítási értékét is. Az ózonterhelés mértékének becslésére az elmúlt évtizedben koncentráció alapú mérőszámokat alkalmaztak, melyek az ózonkoncentráció egy adott küszöbérték fölötti összegzett mennyiségét adják meg (*Fuhrer et al.*, 1997). Az elmúlt évek kutatásai azonban rámutattak, hogy az ózon tényleges károsító hatása sokkal pontosabban leírható a fluxus alapú mérőszámokkal. Ezen belül is a fluxusnak azon részével, mely a légkörből a levelek sztómáin keresztül jut el a növényi sejtekig (*Musselman et al.*, 2006). A teljes ózonfluxus meghatározása történhet közvetett és közvetlen mérések, valamint modellek segítségével. A sztómákon keresztüljutó ózonfluxus elsősorban modellszámítások által adható meg (*Bassin et al.*, 2004; *Cieslik*, 2004; *Gerosa et al.*, 2004; *Vitale et al.*, 2005; *Keller et al.*, 2007). A sztómavezetés mérése ugyan lehetséges, de bonyolult és költséges eljárás (*Büker et al.*, 2007).

A fluxus mérések térben és időben rendkívül korlátozottak, ugyanakkor elengedhetetlenek a modellszámítások kalibrációjához és verifikációjához. A modellek a számos bizonytalan, bemenő adatként szolgáló, felszín-, növényzet- és talajparaméter miatt pontatlanabbak a méréseknél, ugyanakkor jól alkalmazhatók a térbeli különbségek és időbeli változások nyomon követésére.

Diplomamunkám keretében az Eötvös Loránd Tudományegyetemen folyó, az ózon ülepedésének meghatározására irányuló kutatásokba (*Lagzi et al.*, 2004; 2006; *Mészáros et al.*, 2006) kapcsolódtam be.

Munkám célja egy ülepedési modell fejlesztése és alkalmazása volt. A modellfejlesztés során az eddigieknél részletesebb térbeli felbontású számításokhoz elkészítettük a bemenő adatbázisokat, elvégeztük a részletes bemenő mezők modellbe illesztését. A modellt C nyelven programoztuk. A számítások során meghatároztuk az ózon ülepedési sebességének, valamint teljes és sztómákon keresztüli fluxusának térbeli eloszlását a magyarországi erdőállományokra. Finom térbeli felbontásban ( $2,5 \times 2,5$  km) vizsgáltuk a lombhullató, a tűlevelű és az elegyes erdőállományokat érő ülepedés eloszlását 1998 vegetációs időszakára (áprilistól szeptemberig), részletes érzékenységi vizsgálatokkal kiegészítve. Ennek keretében elemeztük a különböző meteorológiai

paraméterek, úgymint a hőmérséklet, a relatív nedvesség és a globálsugárzás valamint a levélfelületi index és a minimális sztóma ellenállás hatását az ózon ülepedésére. Tanulmányoztuk a koncentráció és a fluxus alapú ózonterhelési térképek közötti eltéréseket. Eredményeinket szakirodalomból nyert mérési adatokkal hasonlítottuk össze.

A modellszámítások alapján meghatározható a magyarországi erdőállományokat érő ózonterhelés időbeli és térbeli változása, mely alkalmas lehet környezeti károk elemzésére, az erdőgondozás és erdőtelepítések során pedig gazdasági célokat is szolgálhat.

A dolgozat második fejezete a felszínközeli ózon főbb tulajdonságait, lényegesebb mérőszámait, a vegetációkra, elsősorban az erdőkre gyakorolt káros hatásait, emellett a magyarországi területekre elvégzett ózonterhelési vizsgálatokat mutatja be.

A harmadik fejezet az alkalmazott csatolt terjedési–ülepedési modell illetve a modellszámítások áttekintő képét adja.

Az eredményeket a negyedik rész tartalmazza. Itt elemezzük az 1998 vegetációs időszakára nyert ülepedési sebességeket és az ezekre vonatkozó érzékenységi vizsgálatokat. Az 1998 júliusára kiszámolt teljes fluxus és kumulatív sztómafluxus értékeit koncentráció alapú ózonterhelési térképekkel vetettük össze.

Az ötödik fejezetben a modell eredmények szakirodalmi mérésekkel történő összehasonlítását mutatjuk be.

Az utolsó fejezetben összefoglaljuk munkánk célkitűzéseit, a megvalósított eredményeket, valamint a további fejlesztési lehetőségeket.

## 2. A felszínközeli ózon

Az 1950-es évekig úgy gondolták, hogy a troposzférában található ózon teljes egészében a sztratoszférából származik, onnan turbulens diffúzióval jut le az alsóbb légrétegekbe. Az újabb számítások szerint (*Guicherit and Roemer, 2000*) az ily módon a felszín közelébe kerülő ózon mennyisége átlagosan mindössze 605 Tg évente. Ez lényegesen kevesebb annál a 4520 Tg átlagos évenkénti mennyiségnél, mely a troposzférában keletkezik. Az ózonnak nincs közvetlen forrása, másodlagos szennyezőanyagként, különböző prekursor anyagokból (nitrogén-oxidok, szén-monoxid, különféle szerves anyagok) fotokémiai reakciók során jön létre. Prekursor vegyületeinek természetes forrása lehet a villámlás, a növények terpén (pl: izoprén) termelése, valamint a szerves anyagok bomlásából származó metán. Az antropogén eredetű előanyagok főként a járműforgalom illetve a fosszilis tüzelőanyagok égetése révén kerülnek a légkörbe. Keletkezése különösen hatékony lehet nagy népsűrűségű területek szennyezett levegőjében, ahol a gépkocsik nitrogén-monoxid és szerves anyag kibocsátása jelentős. A keletkezett ózon jelentős része kémiai reakciók során elbomlik, míg globálisan, évente körülbelül 995 Tg a felszín közelében kialakuló turbulens áramlások hatására, száraz ülepedéssel kerül ki a légkörből. A kiülepedő ózon az élő és élettelen környezeten károsító hatást fejthet ki. Az ózon nedves ülepedése elhanyagolható, mivel vízben nem, vagy csak nagyon csekély mértékben oldódik.

Az elmúlt évtizedek mérési eredményei alapján (*Mészáros, 1997; Debreczeni, 2006*) az ózon koncentrációja a prekursor anyagainak növekvő kibocsátása miatt nagymértékben megnövekedett, száz év alatt mintegy a kétszeresére. Az utóbbi években a növekedés mértéke ugyan lelassult, sőt a nyári félévben Európa nagy részén enyhe csökkenés mutatkozik (*Jonson et al., 2006*), de a koncentráció értékek még mindig magasak, amely súlyos környezeti károkat vonhat maga után. Az ózon rendkívül erős oxidáló tulajdonsága révén izgatja az emberek szemét és nyálkahártyáját, közvetlenül megtámadja a növények leveleit. Mindezek mellett a fotokémiai szmog egyik alkotóeleme, megváltoztatja a levegő oxidációs képességét, illetve a savas esők hatását is felerősítheti. A magyarországi háttérlevegőben a nyomgázok közül a felszíni ózon esetében a leggyakoribb az emberi egészségre és a növényzetre vonatkozó levegőminőségi határérték meghaladása (*Bozó et al., 2006*). A 8 órás koncentráció átlagokra vonatkozó egészségügyi határérték  $110 \mu\text{g m}^{-3}$ . A Duna-Tisza közén található k-pusztai háttérszennyezettség-mérő állomás

adatai alapján elmondható, hogy ezen határérték túllépések száma az elmúlt években ugyan csökkent, de még mindig jelentősnek mondható (Bozó *et al.*, 2006).

## 2.1 Az ózon mérőszámai

Az ózonterhelés mértékének és károsító hatásának becslésére többféle mérőszám alkalmazható. Kezdetben olyan matematikai közelítéseket próbáltak felállítani, melyek összefüggésbe hozzák az ózonterhelést és annak vegetációra gyakorolt hatásait. Ezek az ún. kitettségi indexek a koncentráción alapulnak, vagyis a koncentráció nagyságából lehet következtetni a terhelés mértékére.

*Koncentráció alapú mérőszámok:*

- *AOT<sub>xx</sub> index:* A legelterjedtebben használt koncentráció alapú mérőszám az AOT<sub>xx</sub>-index (Fuhrer *et al.*, 1997), amely egy adott küszöbérték fölötti órás koncentráció összeg adott időszakra:

$$AOT_{xx} = \int \max(C - xx, 0) dt \quad \text{ha } C > xx \text{ ppb,}$$

ahol  $C$  a tényleges átlagkoncentráció,  $xx$  pedig egy megadott küszöbérték. A leggyakrabban használt küszöbérték 40, vagy 60 ppb. A vizsgált időszak általában a vegetációs periódus azon óráit jelenti, amikor a globálsugárzás értéke nagyobb, mint  $50 \text{ W m}^{-2}$ , de bármilyen hosszú időtartam lehet. Az index mértékegysége ppb óra.

- *SUM06 index:* Egy másik koncentráción alapuló mérőszám a SUM06, melyet a 0,06 ppm-es értékre mesterséges küszöbként alkalmaznak, kiszámításához a vizsgált időszakban a 0,06 ppm-nél (60 ppb) nagyobb órás átlag koncentrációkat kell összegezni:

$$SUM06 = \sum C * \Delta t \quad \text{ha } C > 60 \text{ ppb} \quad (\text{Zhang } et al., 2006),$$

- *SOMO35 index:* Ez egy új, a WHO (Egészségügyi Világszervezet) által javasolt index, mely az egészségügyi hatások indikátora. Ezt az értéket, a napi 8 órás átlagok maximumának egész évre való összegzésével kapjuk, ha azok nagyobbak, mint 35 ppb, vagyis:

$$\text{SOMO35} = \sum \max (A - 35 \text{ ppb}, 0) \quad (\text{EMEP}, 2004),$$

ahol  $A$  az adott nap 8 órás átlagait jelenti. Mértékegysége ppb nap.

- *Kitettség:* A vegetáció közelében mért koncentrációnak és annak az időtartamnak a szorzata, amíg a növényzet védtelen a szennyeződéssel szemben. (*Musselman et al.*, 2006)

*Fluxus alapú mérőszámok:*

A tényleges ózonerhelés, vagyis a légkörből a felszínre jutó és ott károsító hatását kifejtő ózon mennyisége pontosabban meghatározható a különböző fluxus alapú mérőszámokkal.

- *Teljes fluxus:* Teljes fluxus alatt értjük a légkörből a felszínre irányuló nyomgázáramot mindenfajta felszínre, beleértve a sztomatikus és a nem sztomatikus felszíneket is (kutikulák ill. növényzet nélküli felszínek).
- *Sztómafluxus:* A sztómafluxus a levélbe a légcserenyílásokon keresztül bekerülő ózon mértékét adja meg. Egy adott küszöbérték feletti akkumulált sztómafluxus a következőképpen definiálható (*EMEP*, 2004):

$$AF_{st}Y_{gen} = \int \max (F_{st} - Y, 0) dt ,$$

ahol  $F_{st}$  a sztómafluxus,  $Y$  a küszöbérték, a maximum függvény értéke  $F_{st} - Y$ , ha  $F_{st} > Y$ , illetve 0, ha  $F_{st} \leq Y$ . Az integrál a teljes vegetációs időszakra vonatkozik. A kifejezés lehetővé teszi az eltérő mezőgazdasági termények és fajok megkülönböztetését. Mértékegysége  $\text{nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

- *Effektív fluxus:* A sztómafluxus és a levél belsejében történő méregtelenítés közötti egyensúlyt fejezi ki, vagyis a sztómafluxusnak azon részét, ami ténylegesen károsítja a növényi sejteket. Mértékegysége  $\text{nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .
- *Dózis:* A sztómákon keresztüli fluxus összesítése adott időtartamra. A dózis mértékegysége  $\text{nmol m}^{-2}$ .

## 2.2 Az ózonerhelés vegetációra gyakorolt hatásai

Az ózon több károsodást és nagyobb veszteséget okoz a növények termőképességében, mint bármelyik másik légszennyező anyag. Hatásának következtében többféle növényi deformáció jöhet létre, melyeket két nagyobb csoportba sorolhatunk:

ezek a károsodás és a veszteség. A károsodás lehet látható, mint például az oxidált vagy klorotikus foltok, a barnulás, vagy bármi egyéb látható tünet a levélen, illetve lehet az idő előtti öregedés, vagy a növekedés csökkenése is. Szemmel nem észlelhető károsodások a fotoszintézisben, a szén-dioxid-termelésben és szállításban bekövetkező kedvezőtlen változások.

A legtöbb károsodás a növények belsejében történik, miután a szennyezőanyag nagyrészt a gázcserenyílásokon (sztómákon), kisebb mértékben a kutikulákon keresztül belép a levelekbe, és eljut a sejtekig. A növények ózonterheléssel szembeni tűrőképessége a következőktől függ: a sztómák nyitottságától, a növények azon képességétől, hogy mennyire tudják megakadályozni az ózon eljutását az érzékenyebb szövetekig és attól, hogy mennyire képesek méregteleníteni a szöveteket, illetve helyreállítani a károsodottakat.

A legérzékenyebb növényi szövetek a fotoszintetikusán aktív sejtek a klorofilt tartalmazó levelekben. Ezért a sejtek membránjai az elsők, melyeket az ózon megtámad a növényben. A külső sejtek a legérzékenyebbek, míg a legkevesebb károsodás általában a mezofil sejteket éri. Az ózon és a növényi sejtek közötti rövid érintkezés oxidációs folyamatot indít el a sejtekben, mely a sejtek károsodásához vezet, ha a biokémiai méregtelenítés nem tud lépést tartani az oxidációval.

Az ózon hatására a következő tünetek jelentkezhetnek a növények levelein:

- Pigmentált sérülés: többnyire a levél felső oldalán alakul ki, kis pontokból áll, melyek károsodott vagy elhalt külső sejtek (erős vöröses-barna vagy bronz elszíneződés).
- Fehéredés: többnyire a levél felső oldalán alakul ki, ha a növény hosszabb távon emelt ózon koncentrációnak van kitéve, színváltozással jár (például fehér foltok a kőrisfa levelein).
- Klorózis: szinte kizárólag a levelek felső oldalán jelenik meg, hosszú idő alatt alakul ki, és valószínűleg az egyetlen tünete a krónikus ózonkárosodásnak, idő előtti levélhullást okoz, könnyen észlelhető a sárga foltok vagy elhalt részek alapján.
- Nekrózis (a levél mindkét oldalán): akkor alakul ki, ha az alsó és felső epidermisz közötti mezofil szövetek elpusztultak, főként rövid időtartamú, magas ózon koncentráció esetén észlelhető.

Az ózon károsító hatása miatt a növényzet tervezett hasznosítási értékében csökkenés következhet be, beleértve a gazdasági, az ökológiai és az esztétikai értékeket is. A terméshozam vesztesége a betakarítható növényzet mennyiségi vagy minőségi csökkenését jelenti, a termésveszteség pedig gazdasági vagy pénzügyi károkat.



### 2.3 Az ózonterhelés erdőkre gyakorolt hatása

Mivel az erdők sokféle, a társadalom számára is fontos funkciót látnak el, nélkülözhetetlen az egészségi állapotuk és az eredeti életközösségeik stabilitásának megtartása (Bán *et al.*, 2003). A légszennyeződés okozta, úgynevezett új típusú erdőkárookra a nyolcvanas évek elején figyeltek fel, az elmúlt évtizedekben gyakori, több tízezer hektárt letaroló viharok okozta pusztulás és a rovarkárok mellett. Mindezen jelenségek az erdők egészségügyi állapotának fokozottabb megfigyelésére hívták fel a figyelmet.

A tűlevelűeket érő ózonterhelés vizsgálta során (Musselman *et al.*, 2006) kimutatták, hogy az ózon közvetlenül a tűlevelűek szöveteit károsítja, mely korai tűelhullást, csökkent fotoszintézist és a törzsgyarapodás visszaesését okozza, ezen kívül csökken a fák ellenálló képessége más kórokozókkal szemben (rovar, gomba, vírus).

Bükkfa csemetéken végzett németországi kutatások során azt tapasztalták, hogy a magas ózonkoncentrációnak kitett levelek 2 héttel korábban kezdtek sárgulni, mint a kontroll fák esetén, a kísérlet második évében pedig már májusban láthatóvá vált a károsodás, és augusztusra az állomány 85%-a lehullatta a lombját (Borhidi, 1991).

A látható károsodás és az ózonterhelés közötti összefüggések egzakt megadását, valamint az ózonkárookra vonatkozó kritikus szintek definiálását (Matyssek *et al.*, 2007) nehezíti, hogy még az azonos erdőállományok (pl. lombhullató, tűlevelű) is eltérő mértékben reagálnak az ózonterhelésre. Ez az eltérő időjárási helyzetnek, a különböző mikroklimatikus viszonyoknak, illetve az erdőállományon belüli fajta összetételnek köszönhető. Karlsson *et al.* (2004) tanulmányukban kísérletet tettek a fákra vonatkozó kritikus szintek meghatározására, mely az ózon okozta károsodások mennyiségi becslését teszi lehetővé. A mezőgazdasági növényállományokra vonatkozó kritikus szint megadásának alapja az 5%-os évi termésveszteség. Erdők esetén az eljárás nem ilyen egyszerű, mivel kereskedelmi vetésforgójuk meghaladhatja a 100 évet is. Az említett tanulmányban az AOT40 és a CUO (adott küszöbérték feletti kumulatív ózon felvétel, a küszöbérték ebben az esetben  $1,6 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , vagyis  $\text{CUO} > 1,6$ ) kritikus szintjét úgy adták meg, hogy 99%-ig bizonyos legyen, hogy a biomasszában szignifikáns csökkenés következik be. Az 1. táblázat a Karlsson *et al.* (2004) által meghatározott nappali AOT40 és  $\text{CUO} > 1,6$  indexekre vonatkozó kritikus szinteket foglalja össze különböző fatípusokra, egy teljes vegetációs időszakra összegezve.

1. táblázat: Kritikus szintek és a hozzájuk tartozó biomassza csökkenés

fafajok	Kritikus szintek		Biomassza csökkenése a megadott kritikus szintek esetén [%]	
	AOT40 [ppm h]	CUO > 1,6 [mmol m <sup>-2</sup> ]	AOT40 alapján	CUO > 1,6 alapján
nyír, bükk ( <i>érzékeny</i> )	2,4	3,4	3,0	5,6
tölgy ( <i>kevésbé érzékeny</i> )	18,0	12,0	4,5	5,7
lucfenyő, erdei fenyő ( <i>érzékeny</i> )	4,7	1,8	0,8	0,9

(Forrás: *Karlsson et al.*, 2004)

A bemutatott adatok alapján elmondható, hogy az érzékenyebb fajok védelmét is nagy valószínűséggel biztosító kumulatív kritikus szintek AOT40 esetén 5 ppm h (5000 ppb h), míg CUO > 1,6 esetén 4 mmol m<sup>-2</sup> (4000 nmol m<sup>-2</sup>).

Az elmúlt évek kutatásai alapján elmondható, hogy az előbb említett két mérőszám közül az ózon okozta károsodás mértékét pontosabban adja meg a fluxus. *Karlsson et al.* (2007) ózon-érzékeny (lucfenyő, erdei fenyő, nyírfa, tölgy) és kevésbé érzékeny (aleppói fenyő, tölgy) fajokra végzett kutatásaik során azonban rámutattak, hogy az ózonra kevésbé érzékeny fajok esetén az AOT40 hasonlóan pontos képet ad, mint az akkumulált sztómafluxus.

Az ózon erdőkre gyakorolt káros hatásának elemzésére Magyarországon az Erdészeti Tudományos Intézet végez megfigyeléseket. Az ország 6 pontján, kijelölt területeken figyelik a levélkárokat a vegetációs időszak elején és végén. Tapasztalataik szerint az ózon okozta károsodás a levelek színén jelentkezik. Jól elkülöníthetően az erek között jelennek meg az elszíneződések, míg az erek épen maradnak. Az ózonkárok felismerhetőségének fontos indikátora az árnyékhatás, ugyanis az árnyékolt leveleken nem tapasztalhatók a tünetek. Ezen kívül megállapították, hogy az ózon által károsított levelek kevésbé ellenállóak egyéb környezeti tényezőkkel szemben (*Sitkei J., Manninger M.*, személyes megbeszélés).

Az 1. ábrán egy bálványfa levelei láthatók. Könnyen megfigyelhetők rajta az eltérő károsodási szintek. Először csak különálló foltokban, majd a levél egészén jelennek meg a tünetek.

Az ózonterhelésre különösen érzékeny fás szárú növények közül Magyarországon is fellelhetők például a következők: bükk, juhar, jegenye, bálványfa, éger, nyír, nyár, fűz, hárs, gyertyán, kőris, dió, különféle fenyő fajták és a szelídgesztenye.



*1. ábra: Bálványfa ózonkárosodott levelei  
(a fotót készítette: Sitkey Judit, Erdészeti Tudományos Intézet, 2004, Gödöllő)*

## **2.4 Az ózonterhelés vizsgálata Magyarország területére**

### **2.4.1 EMEP ózonterhelési térképek**

Az EMEP (*European Monitoring and Evaluation Program: Európai Megfigyelési és Értékelési Program*) célja a levegőszennyező anyagok nagy távolságra történő terjedésének megfigyelése és kiértékelése, valamint az egyes országok kormányainak tájékoztatása a határokon áttérjedő légszennyeződés minőségére és mennyiségére vonatkozó információk megadásával. A program másik alapvető feladata a csapadékvíz mennyiségének és kémiai összetételének vizsgálata. Az elmúlt évek során már olyan beszámolók is megjelentek (*EMEP, 2004; 2005; 2006*), melyek tartalmaznak az egyes országokra vonatkozó speciális információkat a főbb szennyezőanyagok (kénvegyületek, oxidált és redukált nitrogénvegyületek, szerves vegyületek, higany, felszínközeli ózon és aeroszol részecskék) mennyiségéről. Így az EMEP Egységes Modell (*EMEP Unified Model*) segítségével készült Magyarországra vonatkozó jelentések (*EMEP, 2004; 2005; 2006*) tájékoztatást adnak a hazánkat érő ózonterhelés mértékéről is.

A felszínközeli ózon káros hatásainak jellemzésére a jelentésekben a SOMO35-ös index, az AOT40-es index és a sztómafluxus szerepel. A korábban már említett AOT40-es indexen belül megkülönböztetnek egy, az erdőkre vonatkozó indexet az áprilistól szeptemberig terjedő időszakra, valamint egy, a mezőgazdasági területek esetén májustól júliusig használatos AOT40-es indexet. Ezek természetesen különböznek abban is, hogy melyik szintre adnak becslést az ózon mennyiségéről. Erdők esetében ez az állomány teteje, míg a mezőgazdasági területeknél az alapértelmezett termény magasság 1 m. A jelentésekben szerepel egy, a 3 m-es magassági szintre vonatkozó AOT40-es index is.

A 2. táblázat összefoglalja hazánk területére, az 1980-tól 2004-ig tartó időszakra vonatkozóan a levegő minőségét jellemző ózon alapú karakterisztikák éves átlagos értékeit. Ezek a napi átlagos és a napi maximális ózonkoncentráció [ppb], az erdőkre vonatkozó AOT40-es index [ppb h], a SOMO35-ös index [ppb nap], valamint a károsodás mértékét legjobban reprezentáló fluxus értékei [ $\text{mmol m}^{-2}$ ] a lombhullató erdőkre vonatkozóan. Definíció alapján  $AF_{st1,6_{gen-DF}}$  az  $1,6 \text{ mmol m}^{-2}$  küszöbérték feletti akkumulált sztómafluxus lombhullató erdők (*gen-DF*) esetén.

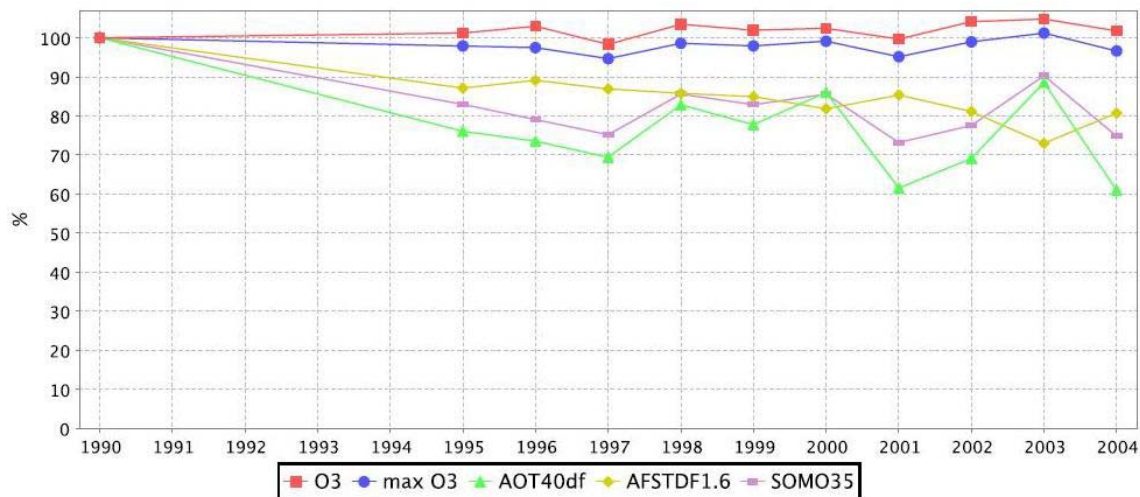
2. táblázat: Becsült évi átlagos értékek

	1980	1985	1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
átlagos $O_3$	29	30	30	31	31	30	31	31	31	30	31	32	31
maximális $O_3$	42	43	43	42	42	41	43	42	43	41	43	44	42
AOT40	22351	24900	25088	19082	18446	17417	20781	19507	21580	15439	17338	22217	15297
SOMO35	3457	3771	3862	3204	3054	2904	3306	3201	3305	2826	2996	3488	2889
$AF_{st1,6_{gen-DF}}$			21	19	19	19	18	18	17	18	17	16	17

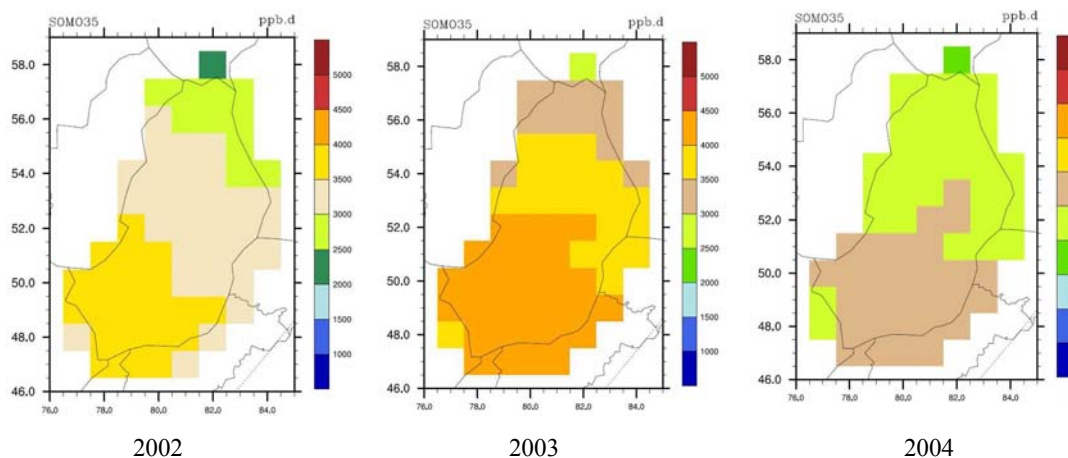
(Forrás: EMEP, 2006)

Ezekkel az adatokkal összhangban a 2. ábra az 1990-es évhez képest bekövetkezett relatív változásokat mutatja az ózon különböző mérőszámaiban. Országos átlagban az ózonkoncentráció napi átlagos és maximum értékeiben az egyes évek közti eltérések elhanyagolhatók, a változások  $\pm 5\%$ -on belül mozognak. Ugyanakkor szembevetendő csökkenő tendencia mutatkozik a kumulatív értékekben. Az 1990-es évhez képest előfordult rendre  $-40$  illetve  $-25\%$ -os eltérés az AOT40 és SOMO35 értékeiben, 2001-ben illetve 2004-ben. Ez azzal magyarázható, hogy a vegetációs időszakban – amire a kumulatív értékek vonatkoznak – bekövetkező koncentrációváltozást a téli félévben a növekvő koncentráció kompenzálta. A csökkenő tendencia a vegetációs időszakra

vonatkozó kumulatív fluxus értékében is megmutatkozik, legnagyobb mértékben, –27 %-ban, 2003-ban. Csökkenő trendjének nyilvánvaló oka az alacsonyabb koncentráció az adott időszakban. Emellett jól látszik az is, hogy a fluxust számos más tényező (időjárási helyzet, talajállapot, növényfiziológiai állapot) is befolyásolja, hiszen az egyes évek közti változásokban nagy eltérések mutatkoznak. Például 2003-ban magasabb AOT40 és SOMO35 mellett jelenik meg az időszak legalacsonyabb fluxus értéke.



2. ábra: Az ózon napi átlagos, maximális mennyiségének, az erdőkre vonatkozó AOT40-es és SOMO35-ös indexeknek, valamint a lombhullató erdőkre vonatkozó fluxus értékének változásai. (Forrás: EMEP, 2006)

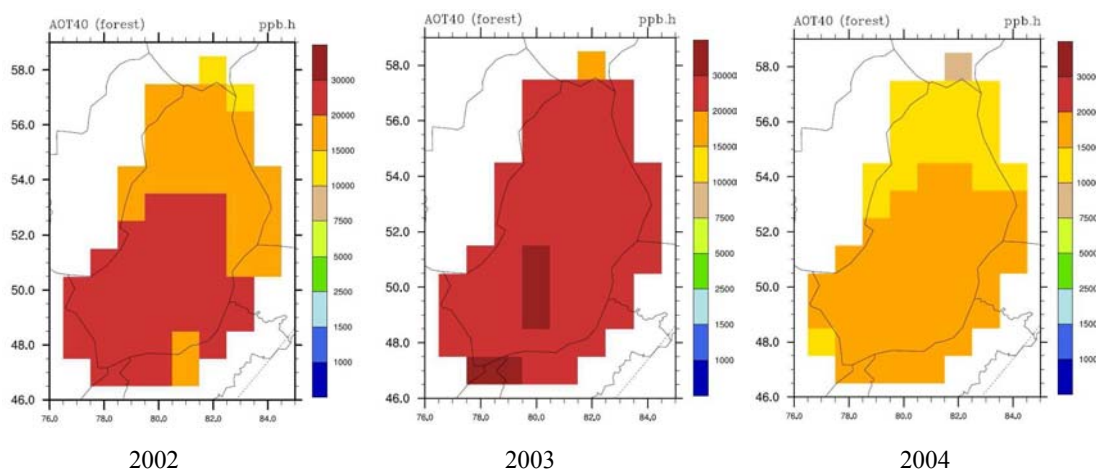


3. ábra: A SOMO35-ös index értékei (Forrás: EMEP, 2004, 2005, 2006)

A 3. ábrán a koncentráció alapú SOMO35-ös index értékei láthatók Magyarország területére, 2002-re, 2003-ra és 2004-re. A színskála mindhárom esetben azonos, így a

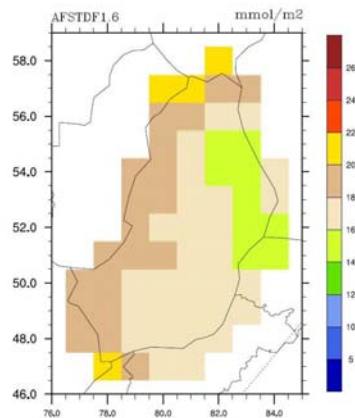
térképek könnyen összehasonlíthatók. Jól láthatók a nyugati országrészen előforduló magasabb értékek, illetve szembevetődnek a 2003-as év kiugróan nagy értékei, melyek a későbbiekben az AOT40-es index esetén is megfigyelhetők lesznek.

A 4. ábrán az erdőkre használatos AOT40-es index segítségével ábrázolt ózonterhelési térképek láthatók a 2002, 2003 és 2004-es évek vegetációs időszakára vonatkozóan. A térképek alapján elmondható, hogy a nyugati határszáron található erdők mindhárom évben fokozottabb terhelésnek voltak kitéve. A 2002-es magas értékek után, 2003-ban már az ország egész területén magasabb volt az AOT40, mint 20000 ppb h, de 2004-ben már sehol sem érte el azt az értéket. Fontos azonban megjegyezni, hogy az erdőkárokra vonatkozó kumulatív kritikus szint 5000 ppb h, mely határértéket mind a három év során, az ország egész területén jóval meghaladták a becslött értékek.



4. ábra: Erdőkre vonatkozó AOT40-es értékek  
(Forrás: EMEP, 2004, 2005, 2006)

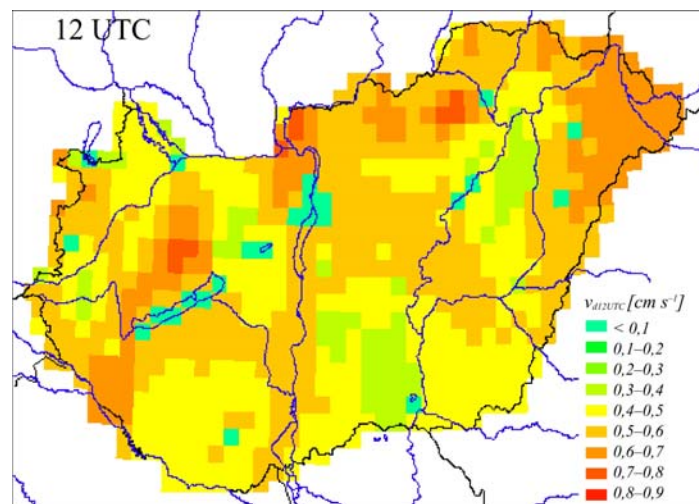
A legújabb tanulmányban (EMEP, 2006) a 2004-es évre elkészült egy, a lombhullató erdőkre vonatkozó fluxus alapú ózonterhelési térkép is, a károsító hatás pontosabb jellemzésére (5. ábra). A legkisebb értékek az ország délkeleti területein adódtak, míg magasabbak az északkeleti és északnyugati szegletekben. Összehasonlítva a koncentráció alapú mérőszámok segítségével készült térképekkel, melyek egymással jó egyezést mutatnak, a fluxus térbeli eloszlása jelentősen módosulhat az előbbiekhöz képest (3., 4. ábrák).



5. ábra: Lombhullató erdőkre vonatkozó ózonfluxus

## 2.4.2 Korábbi modellfuttatások

A folyamatosan fejlesztés alatt álló csatolt-terjedési ülepedési modellel már történtek az ózonerhelés meghatározására vonatkozó becslések (Lagzi *et al.*, 2004; Mészáros *et al.*, 2006; Juhász, 2006).



6. ábra. Az ózon átlagos ülepedési sebességének eloszlása Magyarországon területére, 1998. július, 12 UTC  
(Forrás: Juhász, 2006)

Az általunk elvégzett pontosítások előtti futtatások eredménye látható a 6. ábrán 1998 júliusára vonatkozóan. A számításokat  $10 \times 10$  km-es rácshálózaton végezték el, 7 felszínhasznosítási kategóriát, illetve 5 fizikai talajfélést különböztetve meg. Az egyes cellákon azonban csak az ott található domináns felszín típus paramétereinek segítségével történtek a futtatások. A legmagasabb ülepedési sebességek a középhegységekben (0,8–0,9

cm s<sup>-1</sup>), míg alacsonyabb értékek (0,3–0,4 cm s<sup>-1</sup>) a Hortobágyra, Sárrétre, és a Kiskunság területére adódtak.

### 2.4.3 Hazai mérések

A hazánkban, az Országos Meteorológiai Szolgálat által működtetett háttérszennyezettség-mérő hálózat célja a határokon keresztül történő légszennyeződés becslése, a légköri ülepedés megfigyelése, illetve a nyomanyagok hosszú távú változásainak nyomon követése. A hálózat négy állomásból áll: Farkasfa, Nyírjes, K-pusztá és Hortobágy, melyek mindegyikén történnek a talajközeli ózon koncentrációjának meghatározására vonatkozó mérések. A k-pusztai mérőhely tagja a Meteorológiai Világszervezet és az EMEP hálózatának is. Ez az állomás rendelkezik hazánkban a leghosszabb, a nemzetközi előírásoknak is megfelelő, ózon adatsorral (1990–2005). Az adatsor részletes vizsgálatának eredménye, az ózon előanyagainak kibocsátására vonatkozó nemzetközi megszorító intézkedések ellenére, nem mutatott ki szignifikáns változásokat az ózonkoncentráció trendjében (*Debreczeni, 2006*).

Magyarországon a felszínközeli ózon ülepedésének meghatározására irányuló mérések expedíciós jelleggel történtek (*Mészáros, 2002*). A Hortobágyon alacsony vegetációval borított felszín felett, míg a Mátra-hegységben, Nyírjesen egy lucfenyves állomány felett folytattak méréseket. A különböző évszakokban végzett méréseket a következő célokból végezték: az ózon száraz ülepedésének meghatározása a két eltérő vegetáció felett, az ülepedés időbeli változékonyságának vizsgálata, az ózon fluxusát befolyásoló és az ülepedési modellekben bemenő adatként szereplő ellenállás-tagok meghatározása évszakos bontásban, valamint a kétféle növényállomány ózon terhelésének összehasonlítása. Jelenleg Bugacon folynak ózonfluxus mérések fűfelszín fölött.



### 3. Modellszámítások

Kutatásunk céljának megvalósításához, vagyis az ózon koncentrációjának, ülepedési sebességének, teljes és sztómákon keresztüli fluxusának kiszámításához az Eötvös Loránd Tudományegyetemen kifejlesztett csatolt terjedési-ülepedési (TRansport-EXchange: TREX) modellt használtuk. A modell  $0,025 \times 0,0375$  fokos ( $\sim 2,5 \times 2,5$  km-es) rácshálózaton, 10 másodperces időlépcsőt alkalmazva számítja az ózon koncentrációját és az ülepedés eloszlását. A korábbi futtatások során  $\sim 10 \times 10$  km-es rácshálózatot használtak, így az új eredmények jóval részletesebb vizsgálatokat tesznek lehetővé. A folyamatos terhelés becslése mellett a modell alkalmas baleseti kibocsátások modellezésére is (Vincze, 2006).

A koncentráció időbeli változását, vagyis az egyes anyagfajták légköri terjedését és átalakulásait, a légköri transzportegyenlet alapján határozzuk meg:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial(uc)}{\partial x} - \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + R_s(c_1, c_2, \dots, c_n) + E_s - k_s c, \quad (1)$$

ahol  $c$  a nyomgáz koncentrációja,  $u$  és  $v$  a horizontális szélkomponensek,  $K_x$  és  $K_y$  a diffúziós együtthatók,  $R_s$  a kémiai komponensek közti reakciót,  $E_s$  pedig az emissziót leíró tag, míg  $k_s$  a száraz ülepedési együttható.

A teljes ózonfluxust az ózon koncentrációjának és ülepedési sebességének szorzataként számítottuk ki az általunk használt rácshálózaton:

$$F = -v_d c, \quad (2)$$

melyben  $F$  az ózon fluxusa,  $v_d$  az ülepedési sebessége,  $c$  pedig a koncentrációja. A negatív előjel a légkörből a felszín felé történő ülepedésre utal.

Az ülepedési sebesség meghatározására a következő képletet alkalmaztuk:

$$v_d = (R_a + R_b + R_c)^{-1}, \quad (3)$$

ahol  $R_a$  az aerodinamikai ellenállás,  $R_b$  a kvázi-lamináris határréteg ellenállása,  $R_c$  pedig a felszín ellenállása. Ezeknek az ülepedést akadályozó ellenállásoknak a sorba kapcsolásával kapjuk meg azt az eredő ellenállást, melynek reciproka az ülepedési sebesség. Az

aerodinamikai ellenállás a turbulencia és a molekuláris diffúzió által végzett szállítást gátolja az állomány feletti légtérben. A kvázi-lamináris határréteg, vagyis a felszín feletti vékony réteg ellenállása, a momentum és a szennyezőanyag transzportjának különbségét fejezi ki.  $R_a$  és  $R_b$  számítását *Lagzi et al.* (2006) alapján végeztük el. A felszín ellenállásának számítása a felszínborítottság függvényében különböző lehet, a növényzettel borított területeken a növényi szövetek és a talaj ellenállásának eredőjeként adható meg:

$$R_c = \frac{I}{(R_{st} + R_{mes})^{-1} + (R_s)^{-1} + (R_{cut})^{-1}}, \quad (4)$$

ahol  $R_c$  a felszín ellenállása,  $R_{st}$  a sztóma ellenállás,  $R_s$  a talaj ellenállása,  $R_{cut}$  a kutikula, vagy bőrszövet ellenállása,  $R_{mes}$  a mezofill réteg, vagy sejtfal ellenállása. Ez utóbbinak az értéke ózónra nulla (*Brook et al.*, 1999). Mivel a sztómák nyitottsága függ a sugárzás intenzitásától, a sztóma ellenállást a következő képlettel parametrizáltuk (*Jarvis*, 1976):

$$R_{st} = \frac{I}{G_{st}(PAR) f_t(t) f_e(e) f_\theta(\theta) f_{D,i}}, \quad (5)$$

ahol  $G_{st}(PAR)$  a maximális sztómavezetés PAR, vagyis a fotoszintetikusan aktív sugárzás (a látható tartomány 400–700 nm-ig terjedő tartománya) függvényben. Az egyenletben szereplő  $f_t(t)$  a hőmérsékleti stressz,  $f_e(e)$  a légnedvességi stressz,  $f_\theta(\theta)$  a talajnedvességi stressz hatását leíró függvények,  $f_{D,i}$  az ózónra vonatkozó molekuláris diffuzivitás aránya (azt fejezi ki, hogy az ózón sztómákon keresztül történő szállítása, milyen mértékben tér el a vízgőz szállításától), értéke ózónra,  $f_{D,i} = 0,625$  (*Wesely*, 1989). A parametrizációban megkülönböztetjük a modellezett „nagy levél” („big-leaf”) napsütötte, és árnyékolt részét:

$$G_{st}(PAR) = \frac{LAI_s}{r_{st}(PAR_s)} + \frac{LAI_{sh}}{r_{st}(PAR_{sh})}, \quad (6)$$

$$r_{st}(PAR) = r_{st,min} (1 + b_{st} / PAR), \quad (7)$$

ahol  $LAI_s$  és  $LAI_{sh}$  rendre a napsütötte és árnyékolt levélfelületi index,  $PAR_s$  és  $PAR_{sh}$  pedig rendre a PAR napsütötte és árnyékolt levelekre eső része.  $LAI_s$ ,  $LAI_{sh}$ ,  $PAR_s$  és  $PAR_{sh}$

értékeit *Zhang et al.* (2001) alapján parametrizáltuk. A (7) egyenletben szereplő  $r_{st,min}$  a minimális sztóma ellenállás,  $b_{st}$  pedig egy vegetációfüggő állandó (3. táblázat).

A sztóma ellenállás megadásához szükséges hőmérsékleti korrekciót az állományra jellemző hőmérsékleti értékekkel adtuk meg:

$$f_t = \frac{t - t_{min}}{t_{opt} - t_{min}} \cdot \left( \frac{t_{max} - t}{t_{max} - t_{opt}} \right)^{b_t} \quad (8)$$

ahol

$$b_t = \frac{t_{max} - t_{opt}}{t_{max} - t_{min}}, \quad (9)$$

a képletekben szereplő  $t_{min}$ ,  $t_{opt}$  és  $t_{max}$  a vegetációtól függő minimum, maximum és optimális hőmérsékletek °C-ban (3. táblázat). Optimális hőmérsékletnek azt tekintjük, melynél a sztómák teljesen nyitottak, a minimális és maximális hőmérsékletek a sztómán keresztüli ülepedés megszűnik. A légnedvességi korrekciós tag a telítési hiány alapján parametrizálható:

$$f_e = 1 - b_e \cdot (e_s - e), \quad (10)$$

ahol  $b_e$  a vegetáció típusától függő konstans,  $e$  és  $e_s$  a tényleges vízgőznyomás és a telítési vízgőznyomás a  $t$  hőmérsékleten. A talajnedvességi függvény értékeit a csöbör modell segítségével (*Szinyei és Vincze, 2005; Mészáros et al., 2006b*) számított talajnedvesség ( $\theta$ ) alapján adtuk meg napi bontásban:

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

ahol  $\theta_w$  és  $\theta_f$  a fizikai talajféleségtől függő hervadásponthoz és szabadföldi vízkapacitáshoz tartozó talajnedvesség tartalom értékek (*Komjáthy, 2006*).

A növényi károsodást pontosabban reprezentáló sztómafluxust az állomány tetejére vonatkozó, a koncentráció és az ülepedési sebesség szorzataként kapott, teljes fluxus egy részeként határoztuk meg:

$$F_{st} = F R_c R_{st}^{-1}. \quad (12)$$

A képletben szereplő  $F_{st}$  a sztómafluxus,  $F$  a teljes fluxus,  $R_c$  az állomány ellenállása, míg  $R_{st}$  a sztómaellenállás.

A számításokhoz használt időben állandó illetve változó felszínfüggő paraméterek értékeit a 3. és 4. táblázat tartalmazza. A feltüntetett paramétereket szakirodalmi hivatkozások alapján adtuk meg.

3. táblázat: A modellben használt konstans paraméterek értékei

felszín típusok	$t_{opt}$ [°C]	$t_{min}$ [°C]	$t_{max}$ [°C]	$r_{st,min}$ [sm <sup>-1</sup> ]	$b_{st}$ [Wm <sup>-2</sup> ]	$b_e$ [hPa <sup>-1</sup> ]
lombhullató erdő	27	0	45	150	43	0,036
tűlevelű erdő	15	-5	40	247	44	0,030
elegyes erdő	21	-3	42	199	44	0,034

(Forrás: Brook et al., 1999)

4. táblázat: A modellben használt változó paraméterek értékei

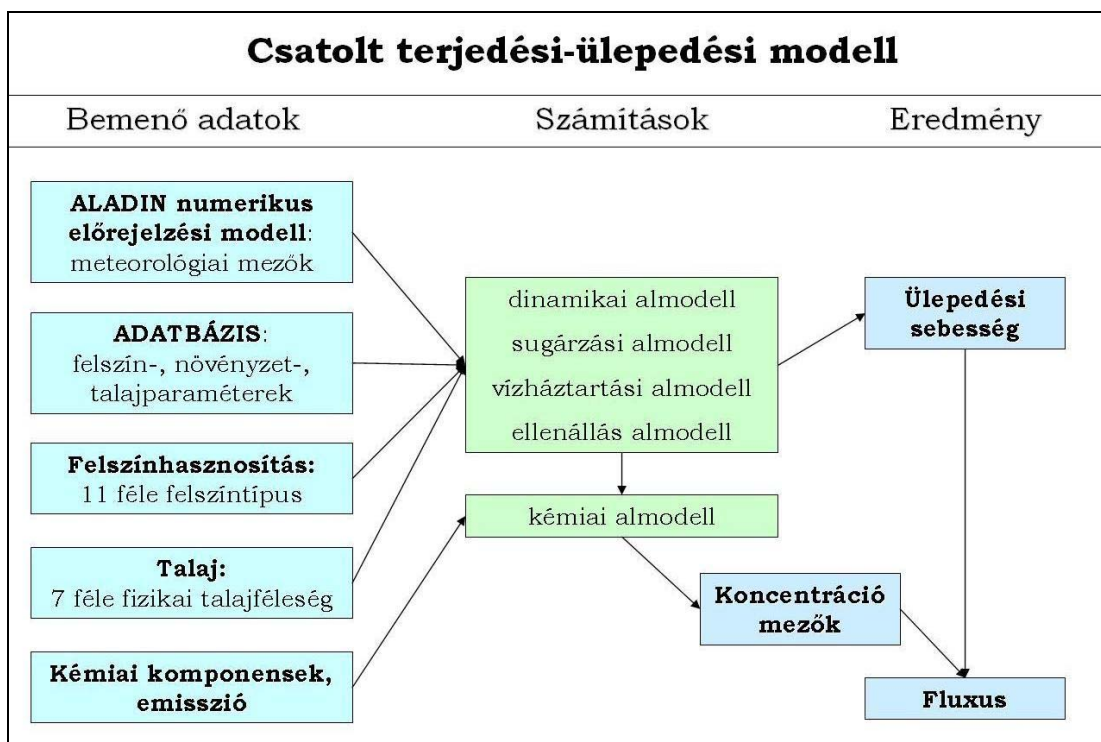
felszín típusok	időszak	$R_{cut}$ [sm <sup>-1</sup> ]	$R_s$ [sm <sup>-1</sup> ]	$LAI$ [m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> ]
lombhullató erdő	április-május	4000	300	1,0
	június-július	2000	300	3,4
	augusztus-szeptember	9000	300	2,0
tűlevelű erdő	április-május	2000	300	5,2
	június-július	2000	300	5,2
	augusztus-szeptember	4000	300	5,2
elegyes erdő	április-május	3000	300	3,3
	június-július	2000	300	4,5
	augusztus-szeptember	8000	300	3,5

(Forrás: Brook et al., 1999, Mészáros, 2002)

A 7. ábrán a csatolt terjedési-ülepedési modell működésének sematikus folyamatábrája látható.

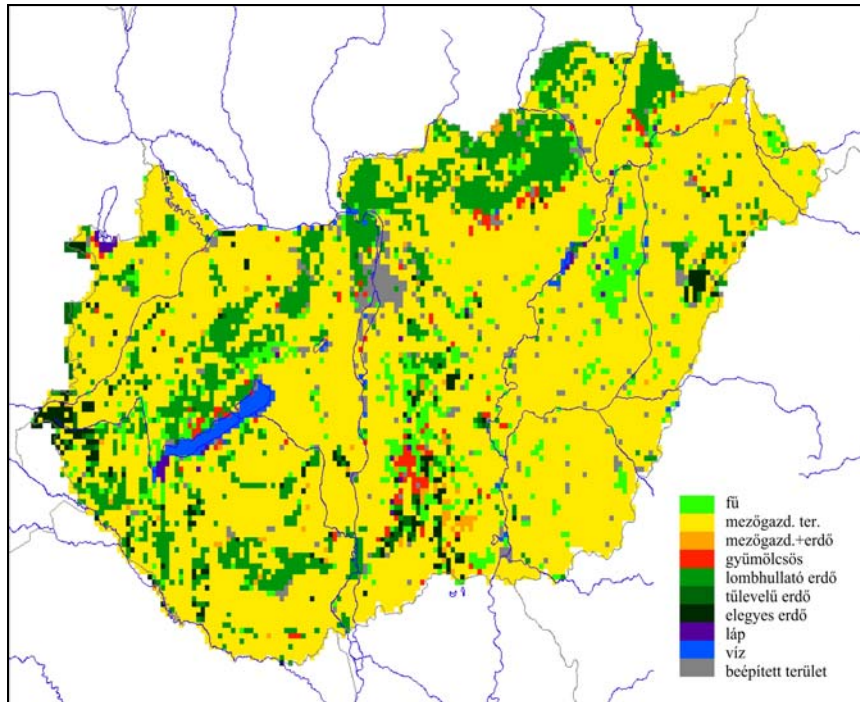
A modell sugárzás- és energiaháztartási almodellje számítja a sugárzási komponenseket és a sugárzási egyenleg (szenzibilis-, látens-, talajhőáram) tagjait, valamint a sugárzás növényállományon belüli eloszlását. A vízháztartási almodellben történik a

talajnedvesség becslése a csapadék, a párolgás és az elfolyás alapján (Mészáros et al., 2006). A stabilitási viszonyok, a felszín közeli dinamikai paraméterek, a turbulens diffúzió, és a keveredési rétegvastagság meghatározására a dinamikus almodell szolgál. A különféle ellenállás tagokat (aerodinamikai ellenállás, határréteg ellenállás valamint az állomány ellenállása, utóbbi a növényi szövetek és a különböző felszínek ellenállásából tevődik össze) az ellenállási almodell számítja. A kémiai almodell az ózon és más nyomgázok közti kémiai reakciómechanizmust írja le (Antal, 2006).

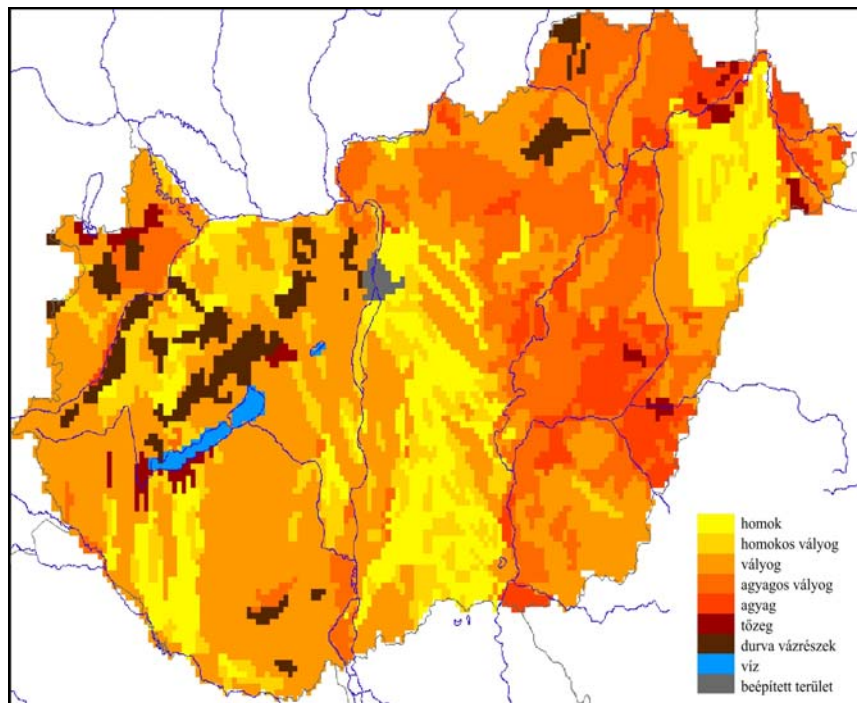


7. ábra: A csatolt terjedési-ülepedési modell folyamatábrája

A modell bemenő adatait részben az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott ALADIN numerikus előrejelzési modell szolgáltatja. Ezek a felszíni meteorológiai állapothatározók (hőmérséklet, csapadék, borultság, szélsébség, szélirány, relatív nedvesség), a magaslégköri adatok (hőmérséklet, szélsébség, szélirány, relatív nedvesség), valamint a felszínborítottságra vonatkozó információk. A felszínre, a növényzetre, a talajra és a nyomgázokra vonatkozó paramétereket, valamint a kémiai komponensekre vonatkozó kezdeti feltételeket szakirodalmi hivatkozásokból és hazai parametrizációkból nyertük (Komjáthy, 2006).



8. ábra: A modellben használt felszínhasznosítási kategóriák  
(Forrás: Komjáthy, 2006)



9. ábra: A modellben használt fizikai talajfélésegek  
(Forrás: Komjáthy, 2006)

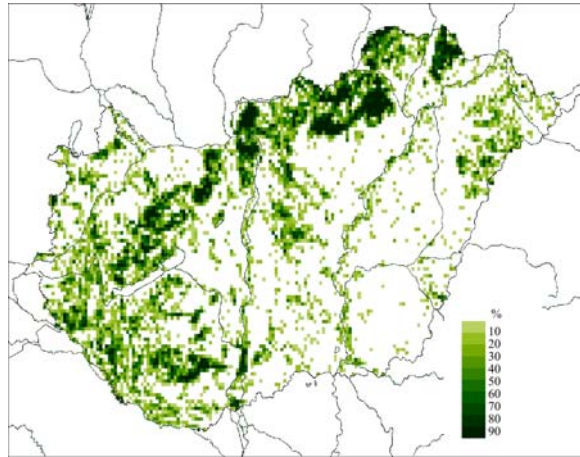
A korábban használt 7 felszínhasznosítási csoport helyett most 10-et vesz figyelembe a modell (fű, mezőgazdasági terület, mezőgazdasági terület + erdő, gyümölcsös, lombhullató erdő, tűlevelű erdő, elegyes erdő, láp, víz, beépített terület), minden egyes rácsnégyzetre százalékos eloszlásban. Az ehhez szükséges adatbázisokat az ALADIN numerikus előrejelzési modell felszínborítottsági kategóriáinak csoportosításával készítettük el. Az egyes rácsokon lévő domináns felszínhasznosítási kategóriát mutatja a 8. ábra. A modellben használt fizikai talajféleségek csoportja a térbeli felbontás finomításán túl két új kategóriával bővült, így összesen 7 fizikai talajféleséget számoltunk (homok, homokos vályog, vályog, agyagos vályog, agyag, tőzeg, durva vázrészek). A talajféleségek eloszlása a 9. ábrán látható.

A koncentráció mezők meghatározásához bemenő adatként hazai és nemzetközi emisszió katasztereket használtunk (Lagzi, 2003).

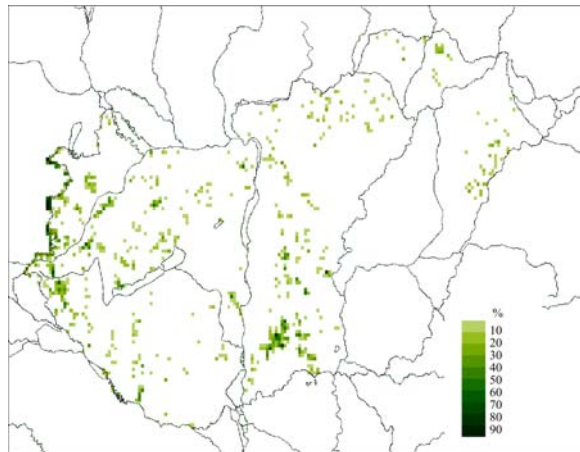
A rácshálózat finomításával, a felszín- és talaj-parametrizáció pontosításával, részletezésével a modell korábbi verzióival összehasonlítva egy sokkal részletesebb felbontást kaptunk.

Vizsgálataink célja az eltérő erdőállományok feletti ózonüledés meghatározása volt, ezért a 10 felszínhasznosítási kategóriából hármat vettünk figyelembe, a lombhullató, a tűlevelű és az elegyes erdőkkel borított területeket. A későbbiekben az üledési sebesség becslését csak azokra a térségekre végeztük el melyeken a három erdőtípus valamelyike valamekkora hányadban megtalálható. Így eredményeink alapján megadható a Magyarország különböző erdőállományait érő ózonerhelés mértéke.

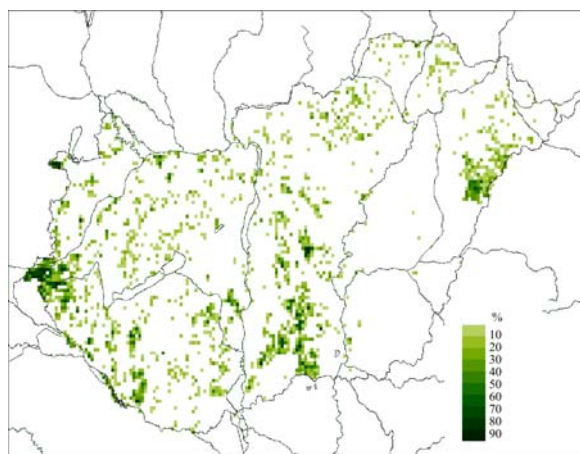
A 10., 11. és 12. ábrán a három féle erdőtípus eloszlása látható, az általunk használt  $\sim 2,5 \times 2,5$  km-es rácshálózaton. A sötétebb zöld színek jelölik azokat a területeket, melyeken nagyobb százalékos arányban fordulnak elő az adott erdőféleségek, míg a világosabb árnyalatok a kisebb részarányt szimbolizálják. Ahogy az ábrákon látható, lombhullató erdő valamilyen arányban az ország mintegy negyedén előfordul, tűlevelű csak körülbelül az ország területének 3 %-án, míg az elegyes erdők részaránya megközelítőleg 10 %.



10. ábra: A lombhullató erdő részaránya a modell rácson



11. ábra: A tűlevelű erdő részaránya a modell rácson



12. ábra: Az elegyes erdő részaránya a modell rácson



## 4. Eredmények

Munkánk során az ózon ülepedésének becslését végeztük el 1998 vegetációs időszakára (áprilistól szeptemberig) Magyarország lombhullató, tűlevelű és elegyes erdőtípusai felett. A rendelkezésre álló meteorológiai adatok és a felszín típusoknak megfelelő parametrizációk alapján kiszámoltuk a 12 UTC-s ülepedési sebességet minden napra, mindhárom erdőállomány esetén külön-külön. Meghatároztuk az egyes erdőtípusokra vonatkozó 12 UTC-s minimum, maximum és átlagos ülepedési sebességeket valamint a havi átlagos értékeket is, a teljes nyári félévre. Ezáltal a nappali időszakra jellemző ülepedés mértékét becsültük. Az éjszakai értékeket külön nem számítottuk, korábbi modellszámítások (*Lagzi et al., 2004*) alapján azok nagyjából egy nagyságrenddel kisebbeknek tekinthetők a nappaliaknál.

Részletes érzékenységi vizsgálat keretében elemeztük, hogyan változik a becsült ülepedési sebesség értéke három légköri állapotváltozó (hőmérséklet, relatív nedvesség és globálsugárzás), valamint a levélfelületi index és a minimális sztóma ellenállás kezdeti értékeinek megváltoztatásának hatására.

1998 júliusára elkészítettük a károsító hatásról pontosabb képet adó fluxus alapú ózonterhelési térképeket is, melyet koncentráció alapú térképekkel hasonlítottunk össze.

### 4.1 Az ülepedési sebesség térbeli eloszlása erdőállományokra

Az 13., 14. és 15. ábrákon a három különböző erdőállomány feletti átlagos havi ózon ülepedési sebességek láthatók 1998 áprilisára, májusára, júniusára, júliusára, augusztusára és szeptemberére. Az ülepedési sebesség becslését csak azokon a területeken végeztük el, ahol az egyes erdőtípusok megtalálhatóak valamelyik részarányban. A kapott értékek körülbelül 0,3 és 0,8  $\text{cm s}^{-1}$ -os intervallumban mozognak (a zöldes színek az alacsonyabb, a pirosasak a magasabb értékeket jelölik az ábrákon).

Lombhullató erdők esetén (13. ábra) az áprilisi és a májusi alacsonyabb értékek után, az ülepedési sebesség júniusban növekedni kezdett, majd júliusban érte el maximumát. Értéke ekkor egyes területeken meghaladta az 0,8  $\text{cm s}^{-1}$ -ot is. Ennek oka, hogy a lombhullató erdőállományok sztómái magasabb hőmérsékleten nyitottabbak, így az ózon sztómákon keresztüli ülepedése kevésbé akadályozott. Ezen kívül lényeges az is, hogy a lombhullatók levélfelületi indexe szintén ebben az időszakban tekinthető maximálisnak. A nagyobb levélfelületi index esetén pedig nagyobb mértékű az ülepedés.

Augusztusban csökkenés, majd szeptemberben ismét egy kisebb mértékű növekedés figyelhető meg az értékekben, mely a két hónap közötti eltérő csapadékmennyiséggel magyarázható. Az augusztusi csapadékhiány alacsony talajnedvességet eredményezett, ami gátolta az ülepedést. Szeptemberben több csapadék hullott, ezáltal a nagyobb talajnedvesség a sztómák nagyobb mértékű nyitottságát okozta, ami nagyobb ülepedési sebességet tett lehetővé. Így, bár az ózon nedves ülepedéséről nem beszélhetünk, mivel nem oldódik vízben, a csapadék közvetett módon mégis befolyásolja az ülepedés mértékét.

A térbeli eloszlást tekintve a magasabb értékeket általában a hegyvidéki területeken kaptuk. Ezeken a részekén a talajnedvesség általi stressz kisebb, ami kevésbé csökkenti az ülepedés mértékét. Az ülepedés mértékét a talaj víztartó képessége (a talaj típusától függően) és ezen keresztül a talajnedvesség is döntő mértékben befolyásolja.

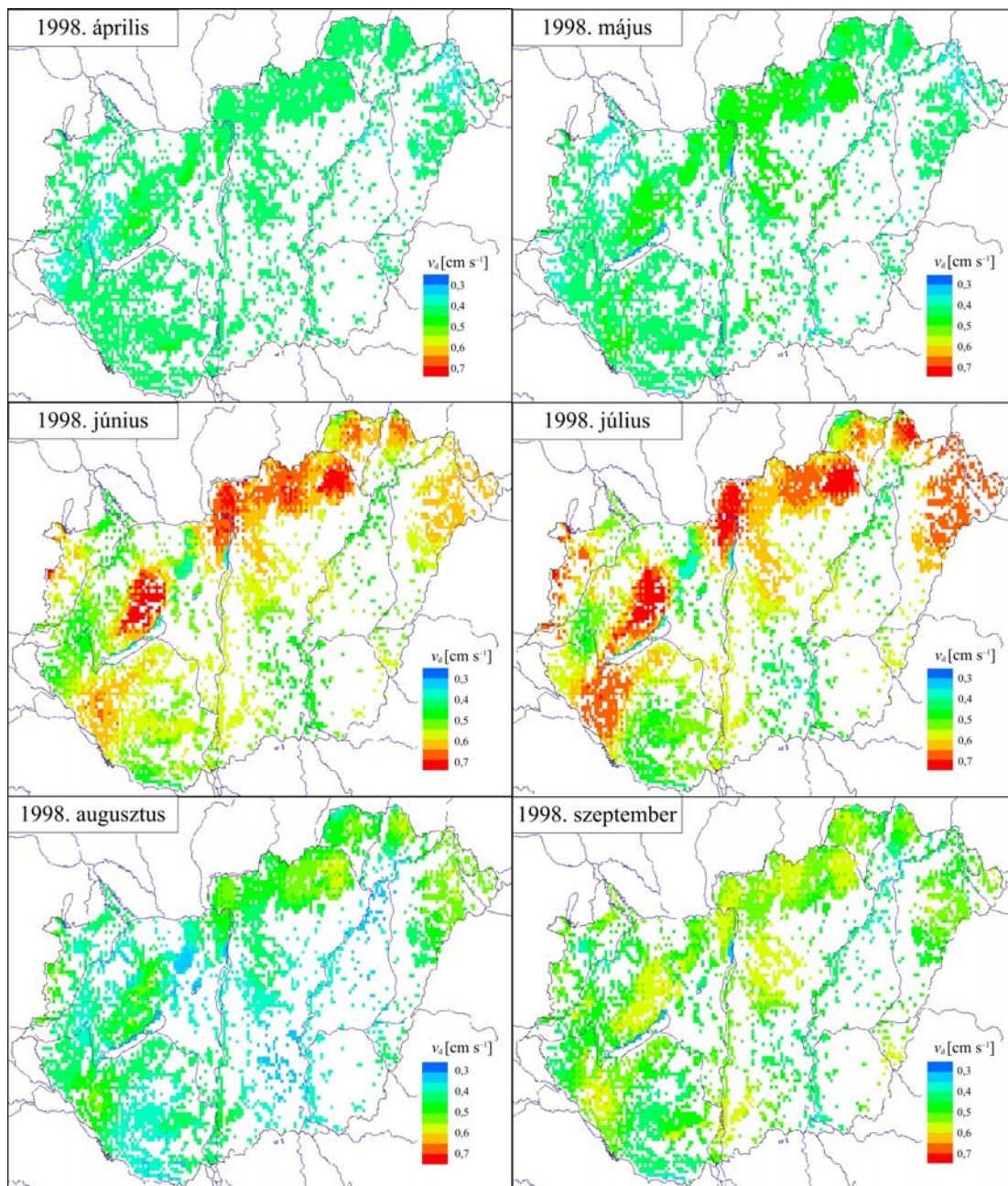
A tűlevelű erdőállományok felett (*14. ábra*) az ülepedési sebesség legnagyobb értékei tavasszal jelentkeznek, és a vegetációs időszak végére, szeptemberre is magasabb értékeket kaptunk. Ez a lombhullató erdőknél tapasztaltakkal szembeni eltérő jelenség azzal magyarázható, hogy a tűlevelűek sztómáinak nyitottsága az alacsonyabb hőmérsékleteken ideálisabb, ezért a sztómákon keresztüli nyomgáz ülepedés a vegetációs időszak elején és végén nagyobb mértékű lehet. A modellben az egyes erdőtípusokra jellemző optimális hőmérséklet értéke szakirodalmi adatok alapján (*Brook et al., 1999*) a tűlevelű, lombhullató és elegyes erdőkre rendre 15°C, 27°C és 21°C. A tűlevelűek levélfelületi indexét a teljes vegetációs időszakra vonatkozóan állandónak tekintettük, így ez nem befolyásolhatta az ülepedés havi változékonyságát.

Az elegyes erdők vizsgálata során (*15. ábra*) fellelhetők a másik két erdőállomány sajátosságai. A számított átlagos ülepedési sebességek az egyes hónapok között kiegyenlítettebbek. A legmagasabb értékeket júniusra és júliusra becsülte a modell. A legalacsonyabb értékeket az elegyes erdők esetében is augusztusra kaptuk, ami az alacsony talajnedvesség ülepedést gátló hatásával magyarázható.

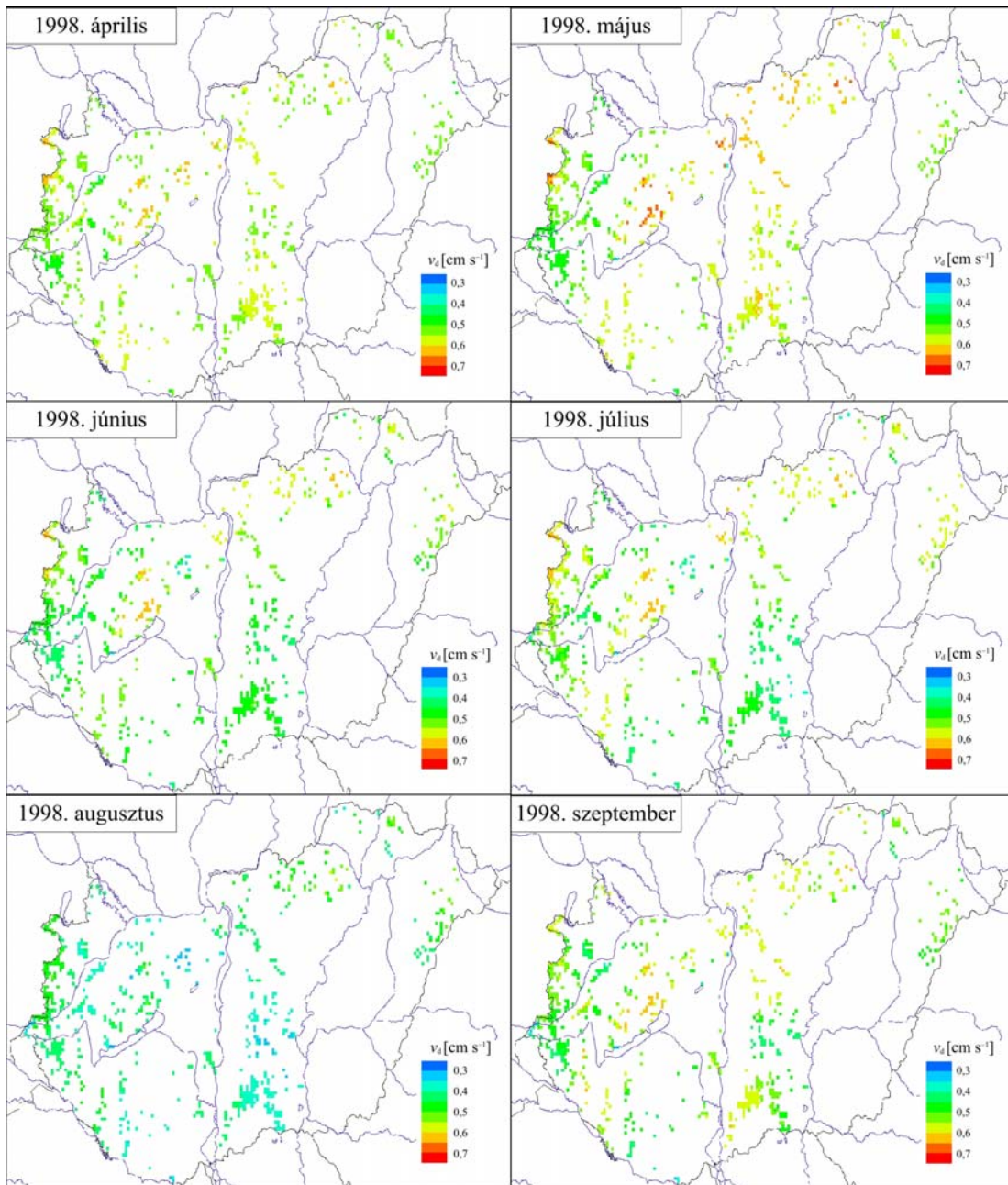
Az elegyes erdők esetén a vegetációs időszakban a lombhullatókra és tűlevelűekre jellemző maximumoknál kisebb mértékű, de hosszabb ideig fennálló magas ülepedési sebesség jellemző. A hosszabb ideig fennálló emelt szintű terhelés károkat okozhat az állományban. Az ózonkoncentráció évi menetének ismeretében (*Debreczeni, 2006*) a legmagasabb értékek általában a nyár derekán fordulnak elő. Emiatt hazánkban a lombhullató erdőket is nagy ózonterhelés éri, hiszen ebben az időszakban a legmagasabb

az ülepedési sebesség az állomány felett, vagyis a magas légköri koncentráció ilyenkor nagymértékben ki is tud ülepedni a növényzetre.

Hasonló okokból, a nyári hónapokban a túlevelű erdőkre jellemző alacsonyabb ülepedési sebesség értékek miatt a túlevelű állományt éri a legkisebb terhelés ugyanakkora légköri ózonkoncentráció mellett.

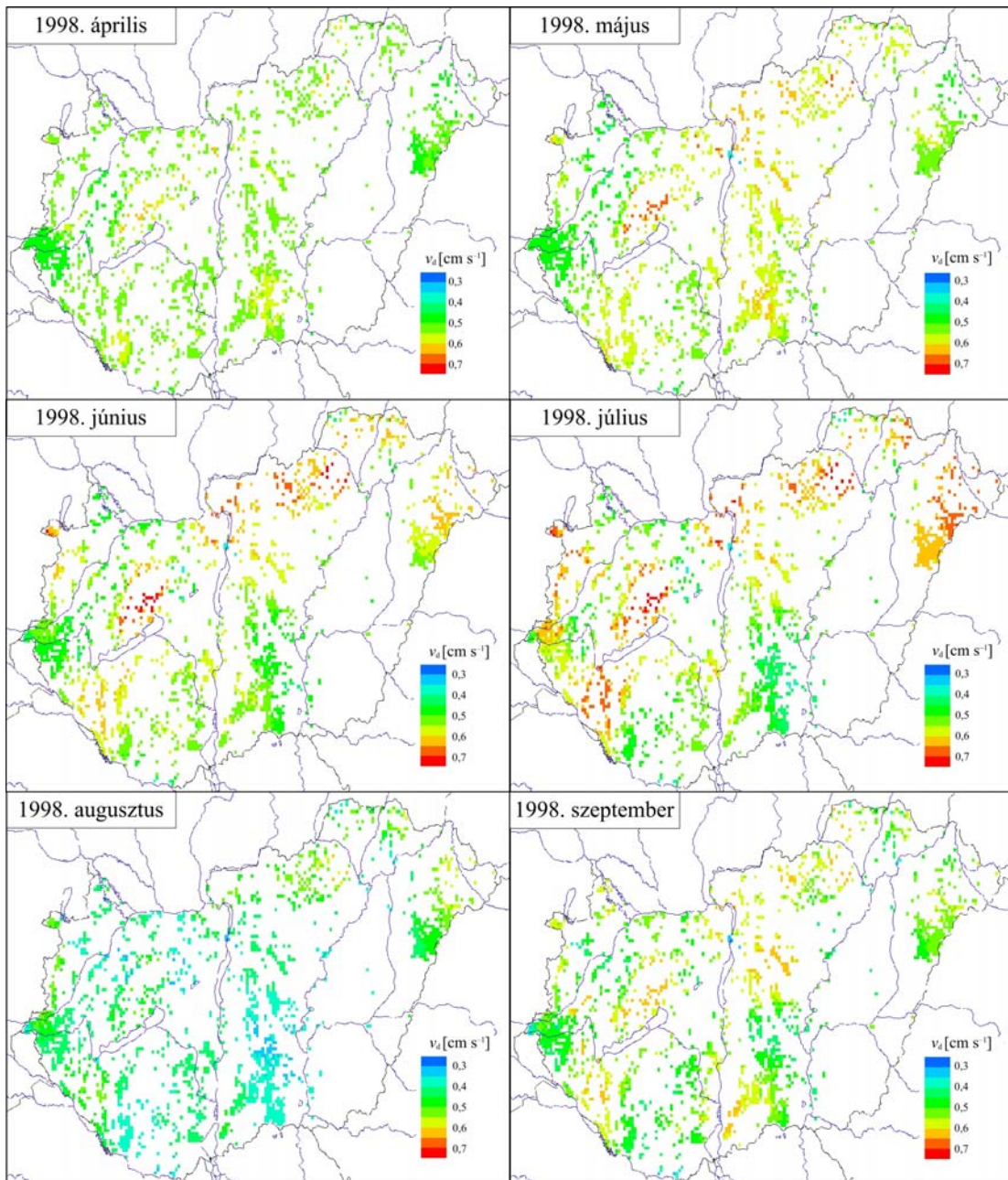


13. ábra: Az ózon átlagos ülepedési sebessége lombhullató erdőre 1998. április, május, június, július, augusztus, szeptember, 12 UTC-s átlag.



14. ábra: Az ózon átlagos ülepedési sebessége túlevelű erdőre  
 1998. április, május, június, július, augusztus, szeptember, 12 UTC-s átlag.





15. ábra: Az ózon átlagos ülepedési sebessége elegyes erdőre  
 1998. április, május, június, július, augusztus, szeptember, 12 UTC-s átlag.

Számításaink csak egy évre, 1998-ra vonatkoznak és az időjárási helyzet függvényében az egyes évek közti változékonyság nagy lehet, az eredmények alapján ennek ellenére általánosan is tehattünk néhány megállapítást.

## 4.2 Az ülepedési sebesség menete a nyári félévben

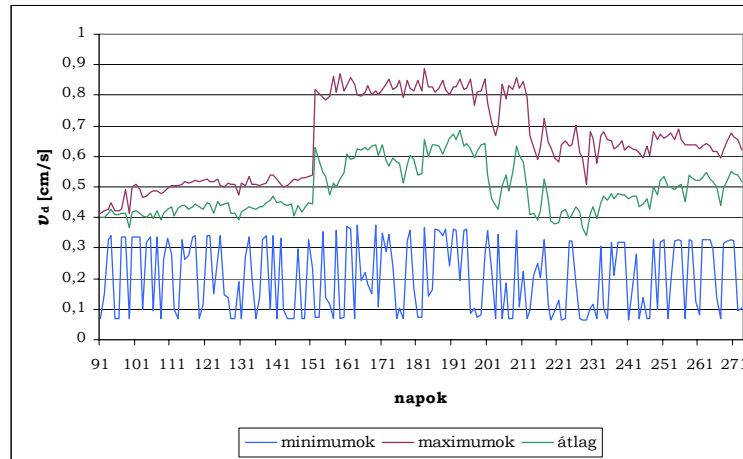
A 16., 17. és 18. ábrán az egyes erdőállományokra vonatkozó ülepedési sebességek országos átlagának napi minimumát, maximumát és átlagát reprezentáló görbék láthatók a teljes nyári félévre. A minimumok a lombhullató, a tűlevelű és az elegyes erdők esetén is  $0,07$  és  $0,37 \text{ cm s}^{-1}$  között mozognak, a görbék menete hasonló. Ez azzal magyarázható, hogy ha az időjárási helyzetnek köszönhetően a hőmérséklet-, a légnedvesség-, vagy a talajnedvesség okozta stressz a maximálishoz közeli, akkor az ülepedési sebesség kicsi. A vizsgált időszakban az ország területén minden állományra előfordultak olyan napok, amikor az ülepedést nagymértékben gátolta az időjárási helyzet.

Az abszolút maximumok a lombhullató és az elegyes állományok esetén meghaladták, tűlevelű erdőknél megközelítették a  $0,8 \text{ cm s}^{-1}$ -ot. Kis különbséggel, de a legnagyobb maximum értékeket a lombhullatóknál, a legkisebbeket a tűlevelűeknél kaptuk. A napi átlagos értékeket leíró görbék a maximumok menetét követik.

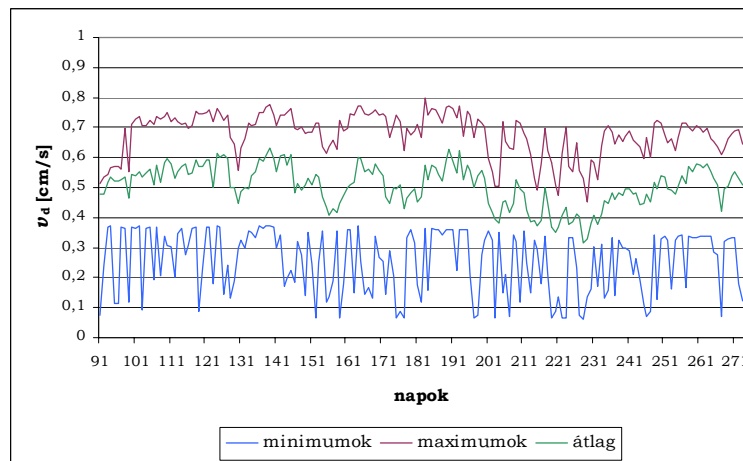
A lombhullató erdőket érő ózonerhelés a júniusi és júliusi hónapokban maximális, míg tűlevelű erdők esetén a vegetációs periódus első felében. Az elegyes erdők feletti ózonülepedés jóval kiegyenlítettebb, mint a másik két állomány felett, ahogy ez az átlagos ülepedési sebességeket ábrázoló térképeken is látható volt (15. ábra). Mindezek a már említett eltérő optimális hőmérsékletekkel magyarázhatók.

Eredményeink alapján tehát elmondható, hogy a lombhullató erdők esetén az ülepedési sebesség értéke a június és július hónapokban a legmagasabb. Mivel az ózon koncentrációja az intenzívebb fotokémiai reakciók hatására szintén ilyenkor maximális, ezért a legnagyobb terhelés ebben az időszakban éri az erdőállományt. Ezzel szemben tűlevelű erdőkre az ülepedési sebesség értéke júniusban és júliusban alacsonyabb, ami kompenzálhatja a magas koncentrációt. Így a tényleges terhelés, a száraz ülepedési fluxus a nyári félévben jóval kiegyenlítettebb. Elegyes erdőkre az ózonerhelés mértéke a lombhullató és tűlevelű erdőket érő terhelés között változik.

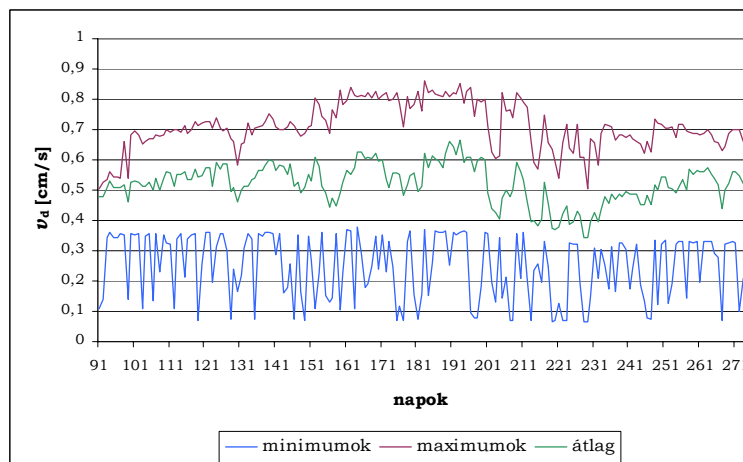
Az 5. táblázat összefoglalja az 1998 vegetációs időszakára vonatkozó havi minimum, maximum és átlagos ülepedési sebességeket. A már elmondottakkal összehangban megállapítható, hogy a nyári félév elején a tűlevelűekre, júliusban a lombhullatókra, kora ősszel pedig az elegyesekre adódnak a legmagasabb értékek. A minimumok a három erdőállomány azonos intervallumban mozognak,  $0,06$  és  $0,08 \text{ m s}^{-1}$  között.



16. ábra: Az ülepedési sebesség minimumának, maximumának és átlagos értékének menete a nyári félévben (1998 áprilistól szeptemberig a 12 UTC-re vonatkozó értékek) a lombhullató erdők esetén.



17. ábra: Az ülepedési sebesség minimumának, maximumának és átlagos értékének menete a nyári félévben (1998 áprilistól szeptemberig a 12 UTC-re vonatkozó értékek) a tűlevelű erdők esetén.



18. ábra: Az ülepedési sebesség minimumának, maximumának és átlagos értékének menete a nyári félévben (1998 áprilistól szeptemberig a 12 UTC-re vonatkozó értékek) az elegyes erdők esetén.

5. táblázat: Az egyes erdőállományokra vonatkozó havi minimum, maximum és átlagos ülepedési sebességek [ $\text{cm s}^{-1}$ ] 1998, 12 UTC-s értékek alapján

		lombhullató	tűlevelű	elegyes
április	minimum	0,07	0,08	0,07
	maximum	0,52	0,75	0,72
	átlag	0,42	0,54	0,52
május	minimum	0,07	0,07	0,07
	maximum	0,54	0,77	0,75
	átlag	0,43	0,55	0,54
június	minimum	0,07	0,06	0,07
	maximum	0,87	0,77	0,84
	átlag	0,58	0,51	0,56
július	minimum	0,07	0,06	0,07
	maximum	0,89	0,79	0,86
	átlag	0,59	0,51	0,56
augusztus	minimum	0,07	0,06	0,07
	maximum	0,72	0,70	0,75
	átlag	0,43	0,42	0,43
szeptember	minimum	0,07	0,07	0,07
	maximum	0,69	0,72	0,73
	átlag	0,50	0,52	0,52



### 4.3 Koncentráció és fluxus alapú ózonterhelési térképek

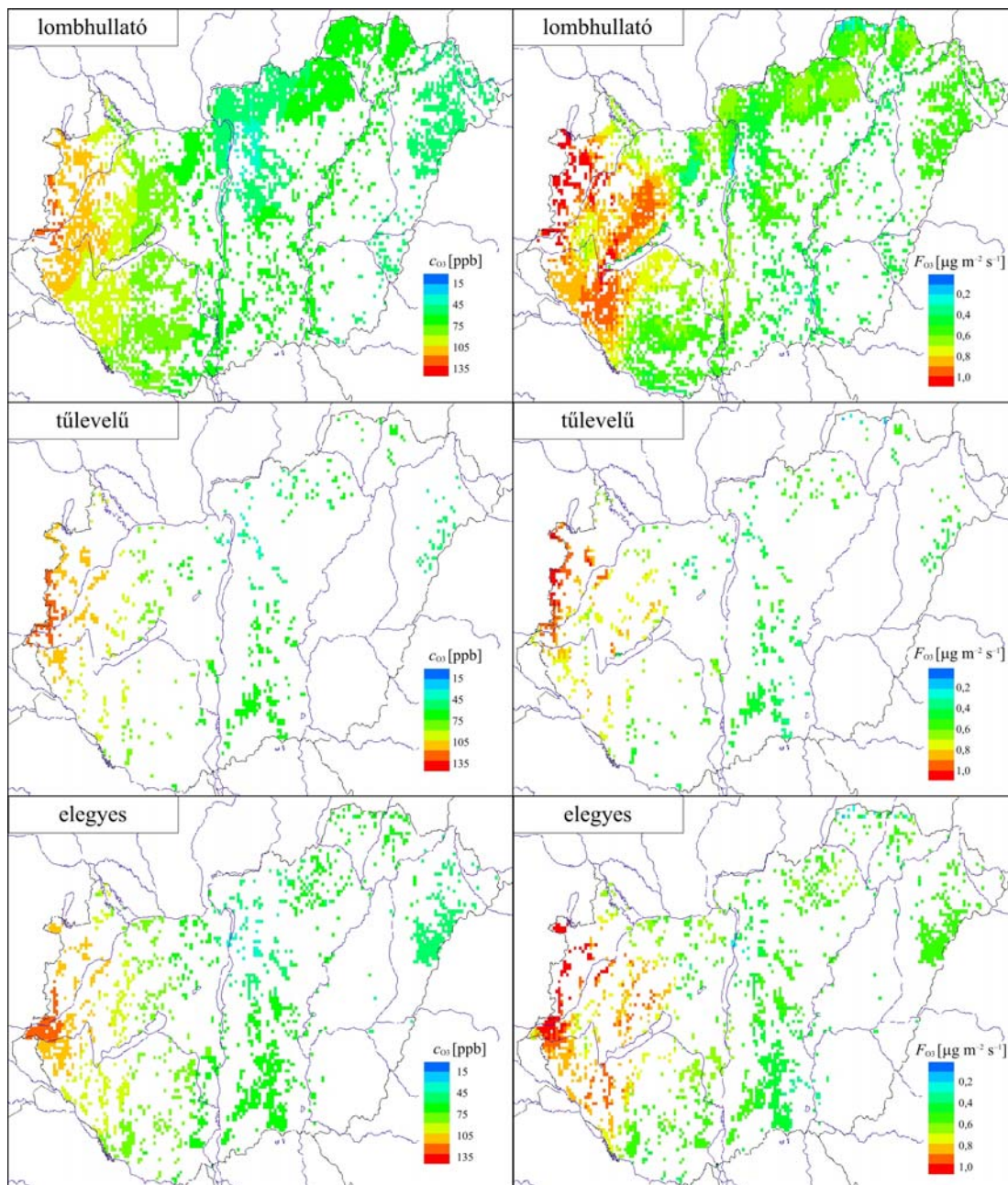
A fluxus alapú ózonterhelési becslésekhez a teljes ózonfluxust az ülepedési sebesség és az ózon koncentrációjának szorzataként számítottuk ki, 1998. július hónapra. A három erdőállományra vonatkozó felszíni (vagy teljes) fluxus térképek a *19. ábrán* láthatók. A fluxus térbeli eloszlása mellett föltüntettük az ózonkoncentráció eloszlását is az egyes növényállományok esetén.

A vizsgált hónapban az ország nyugati területein jóval magasabb volt az ózon koncentrációja, ami a Bécs környéki iparterület magas ózon-prekursor kibocsátásával magyarázható. Az ország keleti felében azonban 60 ppb alatt maradt az átlagos 12 UTC-s ózonkoncentráció.

Jól látható, hogy magas koncentráció esetén általában magas a fluxus értéke is a vizsgált hónapban. Azokon a területeken viszont, ahol a magas koncentráció mellett alacsony volt az ülepedési sebesség, a fluxus értéke kisebbnek adódott. Fordított esetben, alacsony koncentráció esetén is előfordulhat nagyobb mértékű fluxus, mely a magasabb ülepedési sebességekkel magyarázható. Mivel erdőállományok felett az ülepedési sebesség értéke az intenzívebb turbulencia és a nagyobb levélfelületi index miatt általában magasabb, ezért még alacsony koncentrációk esetén is gyakori a nagy ózonterhelés.

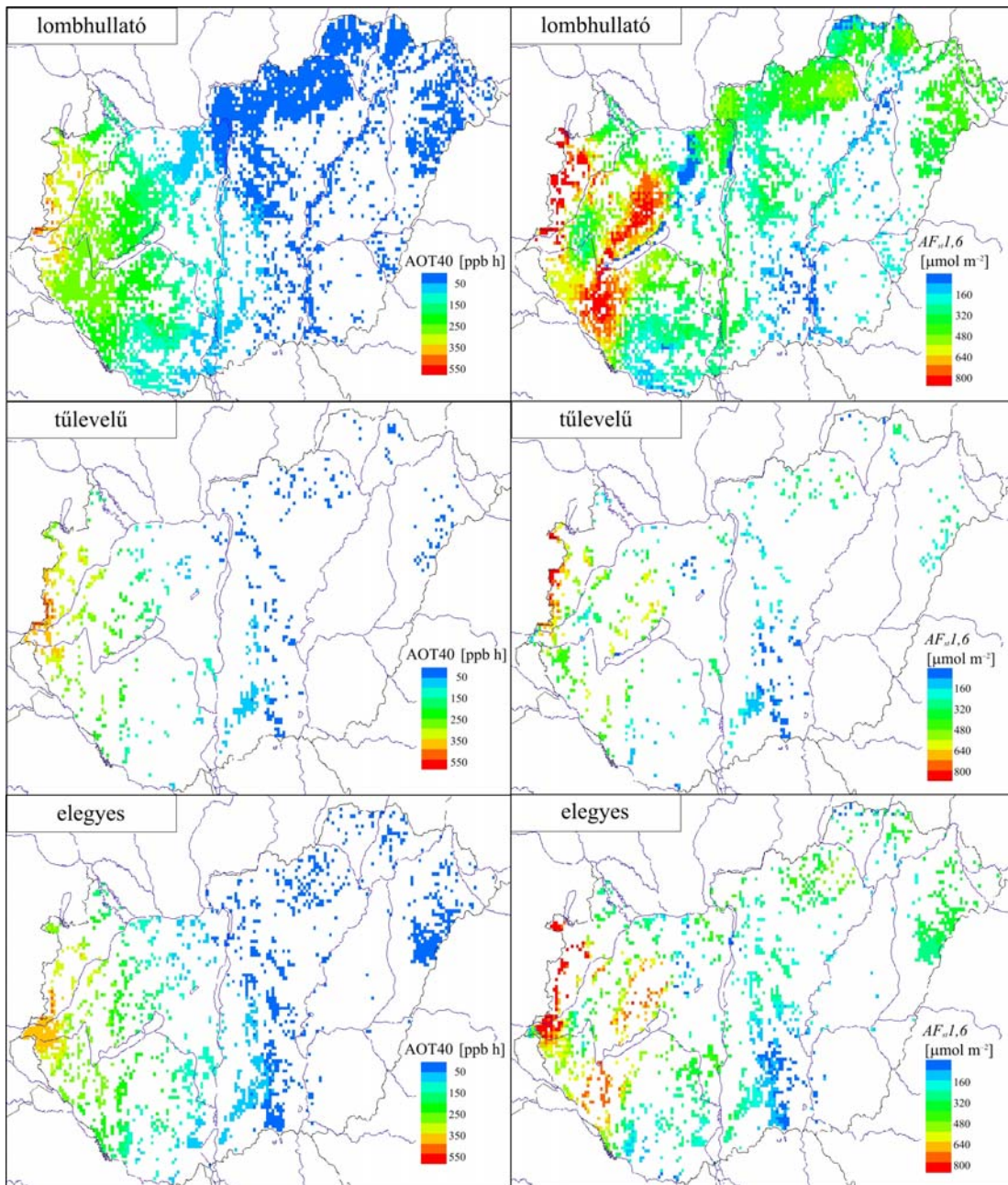
A *20. ábrán* az ózon károsító hatását jellemző két küszöbszám, a koncentráció alapú AOT40 és a fluxus alapú  $AF_{st1,6}$  eloszlása látható a három erdőállományra. Mindkét ábrasorozaton a 12 UTC-re vonatkozó havi kumulált értékeket tüntettük föl. Az AOT40 a 40 ppb fölötti koncentráció értékeket összegzi, az  $AF_{st1,6}$  pedig az  $1,6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  fölötti sztómán keresztüli fluxust, a vizsgált hónap 12 UTC-re vonatkozó óras átlagaira.

A kétféle mérőszám alapján elkészített térképek még inkább rávilágítanak a koncentráció és fluxus alapú becslés eltéréseire. Az AOT40-es térkép szerint a keleti országgrészben a terhelés mértéke minimális, értéke csak a Duna–Tisza-közén haladja meg az 50 ppb h-t. Ugyanakkor az  $AF_{st1,6}$  értéke a keleti régióban is magas (az Északi-középhegységben az  $500 \mu\text{mol m}^{-2}$ -t is meghaladja). A fluxus alapú becslés a magasabb koncentrációjú területeken is árnyaltabb képet ad, mint maga a koncentráció. Így az ország nyugati részén, ahol az AOT40 értéke magas (250 ppb h fölötti), az  $AF_{st1,6}$  nagyobb változékonyságot mutat ( $320\text{--}800 \mu\text{mol m}^{-2}$  között alakul) és olyan területeken is alacsony, ahol pusztán a koncentráció alapján nagyobb mértékű terhelést várnánk.



19. ábra: Az ózon átlagos koncentrációja és fluxusa lombhullató, tűlevelű és elegyes erdőkre, 1998 július, 12 UTC-s átlag.

A koncentráció alapú mérőszámok (ózonkoncentráció, AOT40) használata esetén az egyes régiókban nem látható eltérés a különböző erdőtípusokat érő ózonterhelésben. A fluxus alapú (teljes fluxus,  $AF_{st,1,6}$ ) ózonterhelési térképeken ugyanakkor megjelennek az egyes állományok közti különbségeket. Eszerint július hónapra a legkisebb terhelést a tűlevelű erdőkre kaptunk, ennél nagyobbat az elegyes erdőkre, a legnagyobb terhelés pedig a lombhullató erdőket érte.

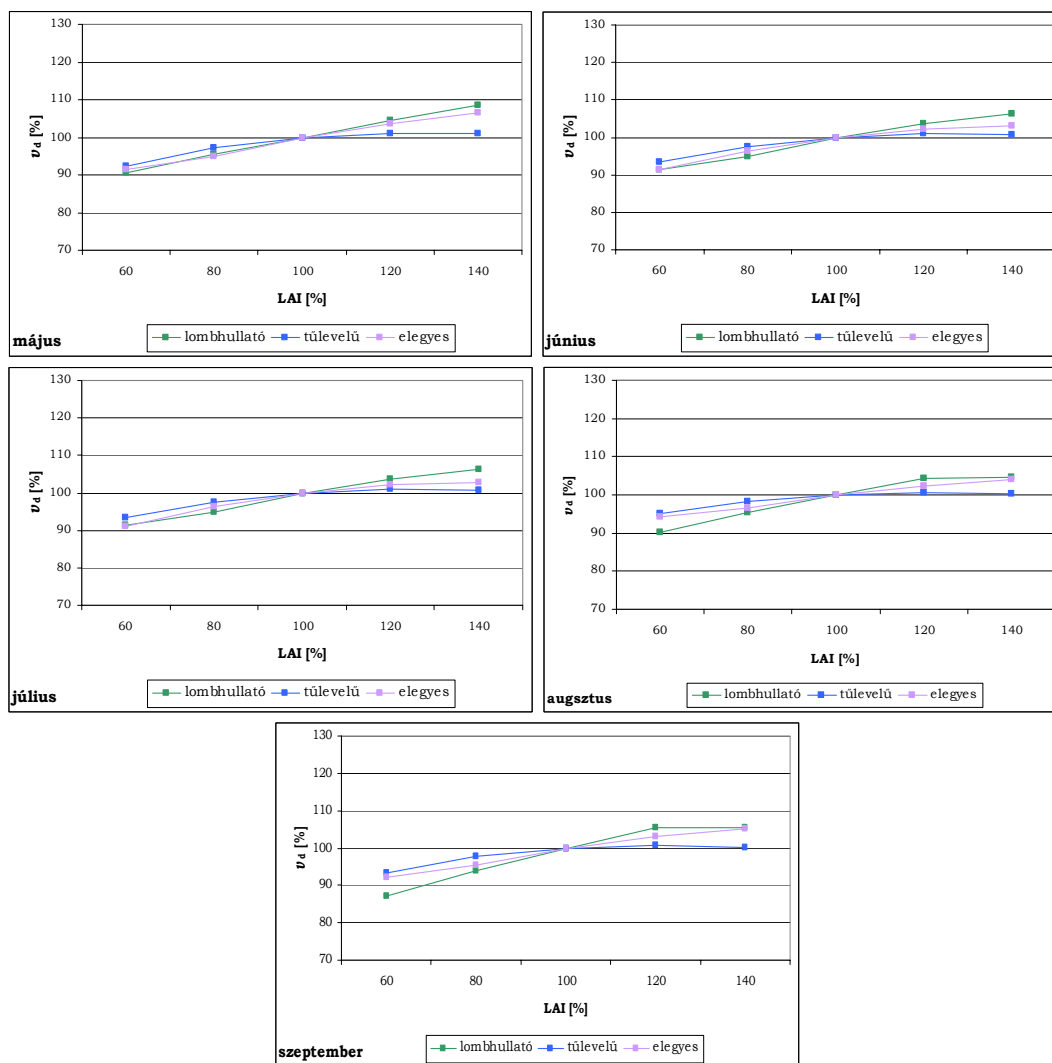


20. ábra: Az AOT40 és az AF<sub>st</sub>1,6 lombhullató, tűlevelű és elegyes erdőkre, 1998 július, 12 UTC-s átlag.



#### 4.4 Érzékenységi vizsgálat

Az ülepedési sebességek érzékenységi vizsgálata során a különböző bemenő adatok értékeit rendre 20 és 40%-kal csökkentettük, illetve növeltük. A módosítások után megvizsgáltuk az átlagos ülepedési sebesség értékeiben bekövetkező változásokat a három erdőféleség esetén 1998 májusától szeptemberéig minden hónapra. Az eredmények a 21., 22., 23., 24. és 25. ábrákon láthatók. Az x tengelyeken rendre a levélfelületi-index, a minimális sztóma ellenállás, a hőmérséklet, a relatív nedvesség és a globálsugárzás értékeinek  $\pm 20$ –40%-os változtatásait tüntettük fel, az y tengelyeken pedig az ehhez tartozó százalékos változásokat az ülepedési sebesség értékeiben.



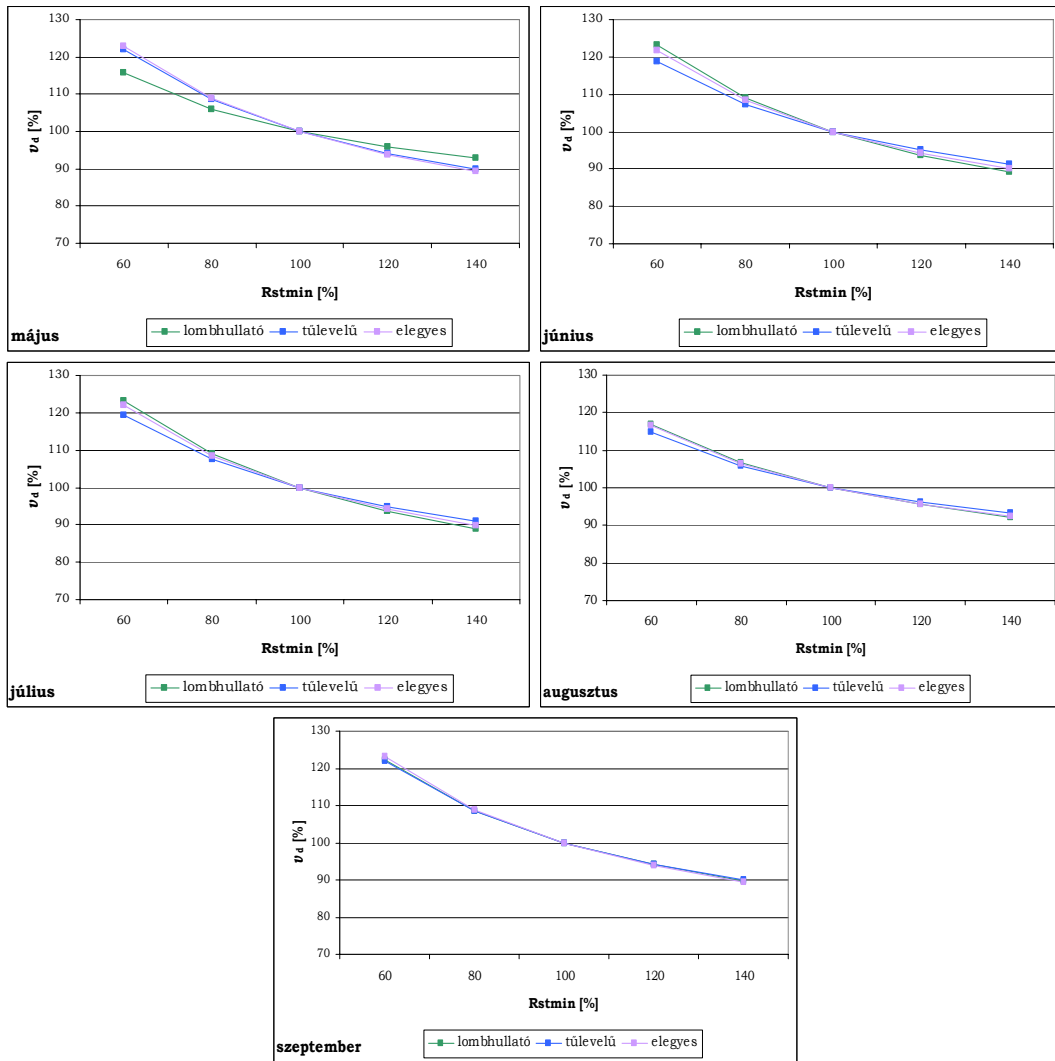
21. ábra: Érzékenységi vizsgálat: a levélfelületi-index (LAI) változtatásának hatása a számított ülepedési sebességre, 1998 május, június, július, augusztus, szeptember.

A levélfelületi-index értéke a modellben nagyon bizonytalan bemenő paraméterként szerepel. A szakirodalmi adatok alapján vett értékekhez képest az állomány kora, magassága, a vegetációs időszak hossza, a fafajok összetétele stb. függvényében igen eltérő értékek adódhatnak. Ezen kívül a LAI értéke egy adott rácsnégyzeten belül is igen változatos képet mutathat. Mivel a pontos értékeket nem ismerjük, ezért fontos tudni, hogy e bizonytalan modellparaméter mekkora hatással van a számított eredményre.

A grafikonok elemzése során megállapítottuk, hogy a levélfelületi index (*LAI*) értékének változtatása a lombhullató erdők esetében okozza a legnagyobb eltéréseket az ülepedési sebességben. Ez a LAI értékének 40%-os növelése esetén körülbelül 6–8%, májusban meg is haladja ezt. A 40%-os csökkentés az összesített ülepedési sebességben mintegy 10%-os csökkentést eredményez. A tűlevelű erdőkre vonatkozóan a LAI növelése csupán 1–2%-os változást eredményez, míg csökkentése megközelítőleg 5%-os csökkenést. Az egyes erőket érő ülepedés az előző két állomány értékei között változik.

A minimális sztóma ellenállás ( $R_{stmin}$ ) változtatásánál kapott értékekre elmondható, hogy a különböző erdőtípusok feletti ülepedési sebességi értékekben bekövetkezett változások közötti eltérések csekélyek. A változás ellentétes irányú és nagyobb mértékű, mint a levélfelületi-index esetén. A minimális sztóma ellenállás 40%-os csökkentése 18–22%-os növekedést okozott az ülepedési sebesség értékeiben, a  $R_{stmin}$  ugyanilyen mértékű növelése körülbelül 10%-os csökkenéssel járt együtt.

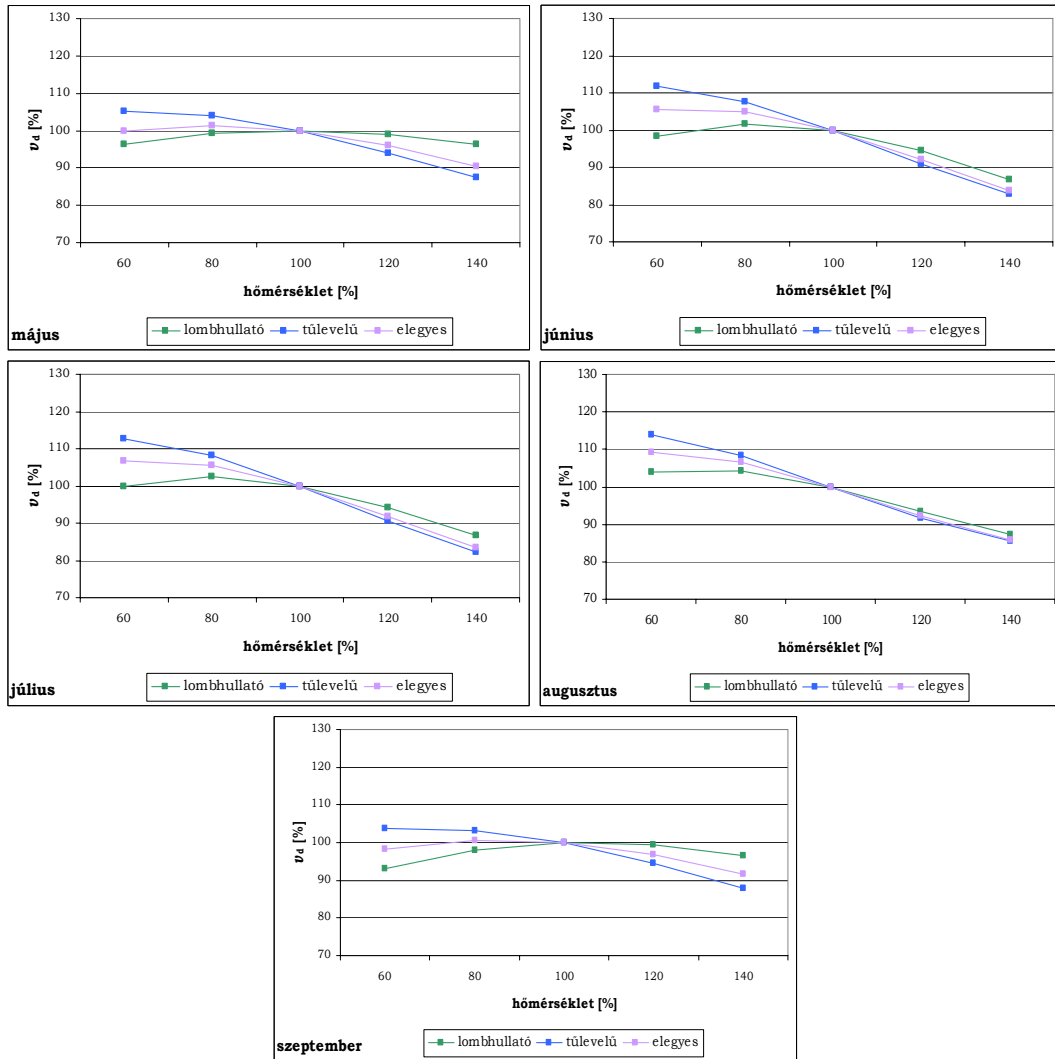
A modellfuttatás során  $R_{stmin}$ -t is szakirodalmi hivatkozások alapján adtuk meg. A bemenő adatok közül a minimális sztóma ellenállás (vagyis a maximális sztóma vezetés) az egyik legbizonytalanabb paraméter. A számított ülepedési sebesség viszont láthatóan igen nagymértékben függ az értékétől. Ezért az ózonterhelés pontosabb megadásának érdekében elsősorban e paraméter precízebb meghatározását kell célul kitűznünk.



22. ábra: Érzékenységi vizsgálat: a minimális sztóma ellenállás ( $R_{stmin}$ ) változtatásának hatása a számított ülepedési sebességre, 1998 május, június, július, augusztus, szeptember.

A hőmérséklet perturbálásának következtében a három erdőtípus görbéje a legkevésbé halad együtt. Ez a lombhullató, a tölvelű és az elegyes erdők sztómáinak nyitottságához tartozó különböző optimális hőmérsékletekkel magyarázható. Tölvelű erdőknél a hőmérséklet csökkentése minden esetben az ülepedési sebesség növekedését okozza, ez 40%-os csökkentés esetén májusban és szeptemberben 5%, júniusban, júliusban és augusztusban megközelítőleg 12%. E három hónapban az elegyes erdőknél is megfigyelhető 8–10%-os növekedés. Lombhullatóknál augusztus kivételével a hőmérséklet 40%-os csökkentése minden hónapban az ülepedés csökkenését okozza. A hőmérséklet növelése mindegyik erdőtípusnál az ülepedési sebesség csökkenését eredményezi. Minden hónapban a tölvelű erdő reagál a legérzékenyebben a módosításokra. Júniusban, júliusban

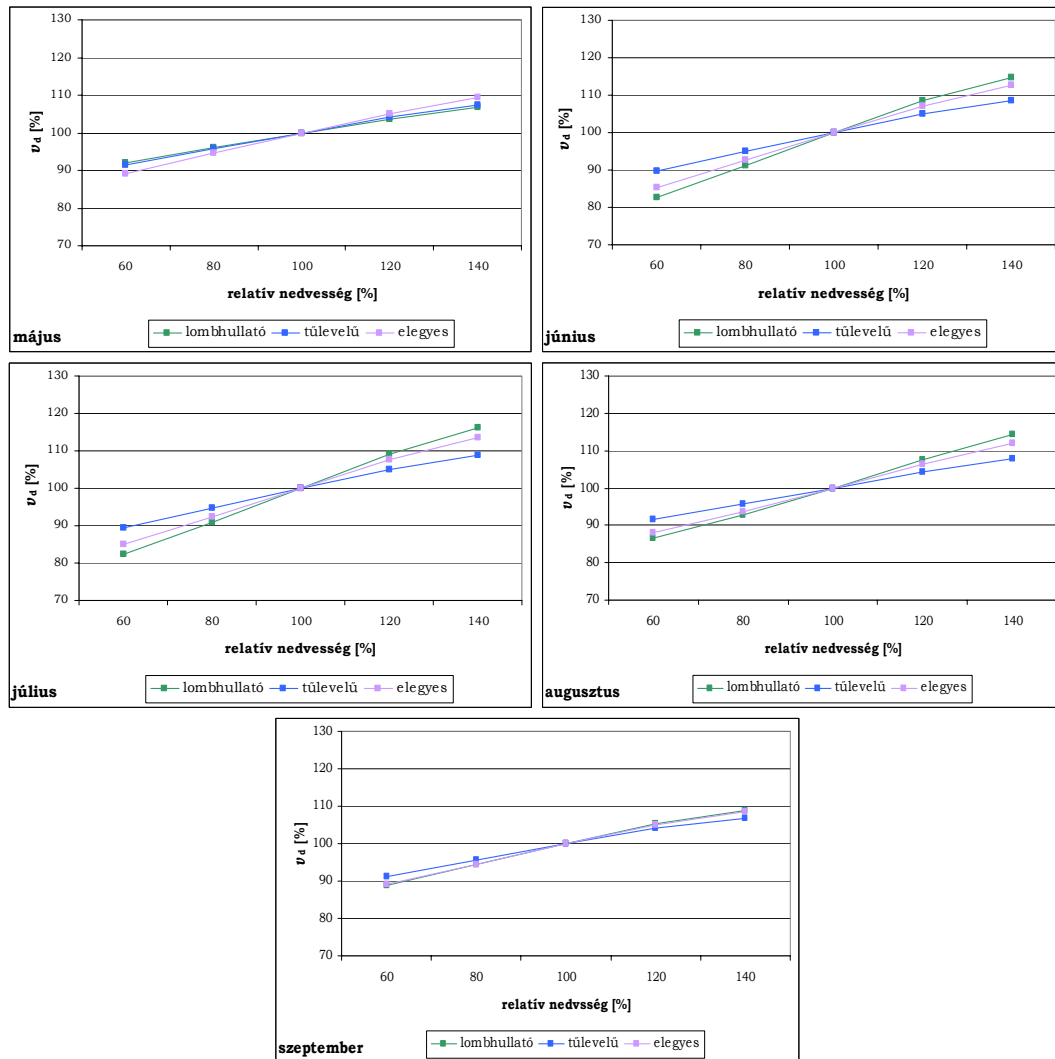
és augusztusban 15–18% közötti mértékben csökken az ülepedési sebesség értéke a hőmérséklet 40%-os növelésére. Elegyes erdők esetén a változások a lombhullató és a tűlevelű erdők változásai között adódtak.



23. ábra: Érzékenységi vizsgálat: a hőmérséklet változtatásának hatása a számított ülepedési sebességre, 1998 május, június, július, augusztus, szeptember.

A hőmérséklet megváltoztatásának hatása az ülepedési sebességre mindhárom erdőállomány esetén jelentős. A számítások során a meteorológiai adatokat a mérések alapján jóval nagyobb pontossággal ismerjük, mint a növényállományokra jellemző paramétereket. Ezért a modelleredményekben a hőmérséklettől való markáns függés nem okoz nagy hibát. Ugyanakkor jól látszik, hogy a hőmérséklet átlagos értékeiben bekövetkező változások közvetve, a növényekre gyakorolt hő-stresszen keresztül

intenzíven befolyásolhatják az ülepedés mértékét. A regionális klímamodellekkel végzett számítások alapján a Kárpát-medence területére előrejelzett nyári magasabb hőmérsékletek mellett kisebb mértékű ülepedés várható, mivel a magasabb hőmérsékletek már a lombhullató erdők számára sem ideálisak.



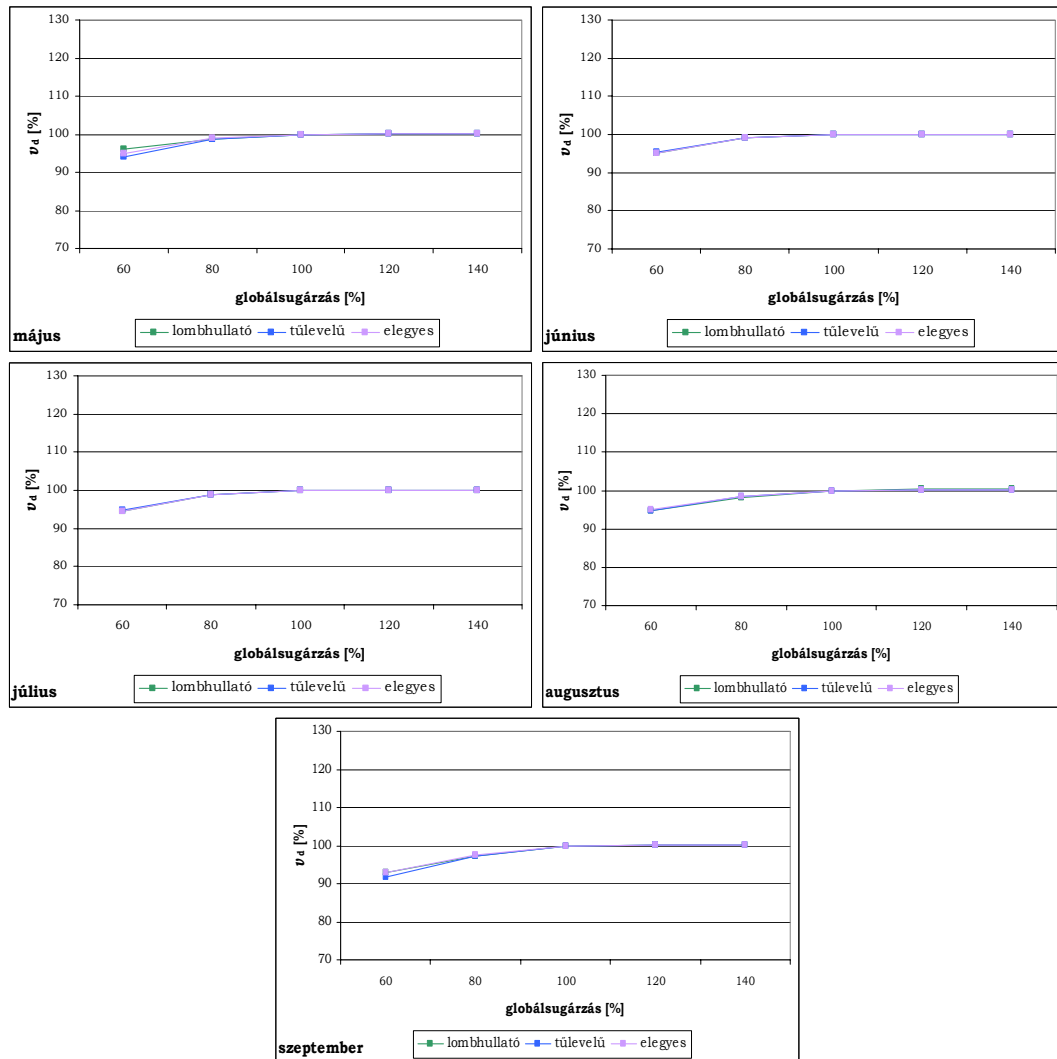
24. ábra: Érzékenységi vizsgálat: a relatív nedvesség változtatásának hatása a számított ülepedési sebességre, 1998 május, június, július, augusztus, szeptember.

A relatív nedvesség értékeinek változtatása az egyes állományokra szintén közel azonos futású görbéket eredményez. A hőmérséklet változtatásával ellentétben növelése növekedést (40% esetén májusban és szeptemberben körülbelül 8–10%, júniustól augusztusig tűlevelűeknél 9%, a másik két állomány esetén megközelítőleg 14–16%), míg csökkentése csökkenést okoz az ülepedési sebesség értékeiben (40% esetén májusban,



augusztusban és szeptemberben körülbelül 10%, a másik két hónapban lombhullatóknál és elegyeseknél 16–18%, míg tűlevelűeknél 10%).

A globálsugárzás növelésének hatására az ülepedési sebességben bekövetkező változások 1% alatt maradtak. Értékének 40%-os csökkentése a teljes nyári félévben mindhárom erdőtípus esetén 5% körüli csökkenést eredményez az ülepedési értékekben, csak szeptemberben ér el körülbelül 8–9%-os értéket.



25. ábra: Érzékenységi vizsgálat: a globálsugárzás változtatásának hatása a számított ülepedési sebességre, 1998 május, június, július, augusztus, szeptember.

## 5. Az eredmények értékelése

A modellszámítás során kapott eredmények számos bizonytalanságot hordoznak. Ezek egyrészt a bemenő adatok bizonytalanságából, másrészt a modell parametrizációk pontatlanságából erednek. A bemutatott modellfejlesztések (részletesebb térbeli felbontás, a felszínborítottság és talajtípusok részletezése, a parametrizáció finomítása) részben csökkentik e bizonytalanságokat, de a kapott eredményeket így is szükséges ellenőrizni. Vizsgálatainkhoz az 1998. júliusra vonatkozó modellszámításokat használtuk föl. Erre a hónapra ugyanis rendelkezésre álltak a fluxusszámítások eredményei is. A modell által becsült ülepedési sebesség és fluxus értékek ellenőrzéséhez a három különböző erdőállomány fölött végzett közvetlen árammérések eredményei szolgálhatnak alapul. Ezeket szakirodalmi hivatkozásokból vettük. Olyan adatokat válogattunk, melyek nyári időszakra, hasonló éghajlati területen végzett mérésekből származnak.

6. táblázat: A mért és a modellezett ülepedési sebességi adatok összehasonlítása

	<i>Szakirodalmi adatok</i>			<i>Modellszámítások</i>	
	<i>eredmény</i> [cm s <sup>-1</sup> ]	<i>körülmény</i>	<i>forrás</i>	<i>eredmény</i> [cm s <sup>-1</sup> ]	<i>körülmény</i>
lombhullató	0,19–0,83	teljes napra	<i>Meyers, and Baldocchi (1988)</i>	0,59	július, 12 UTC
	0,81	nappal	<i>Lamaud et al. (2002)</i>		
	0,80	nyári félév, 12 UTC	<i>Zhang et al. (2006)</i>		
	0,67	teljes napra	<i>Zhang et al. (2002)</i>		
elegyes	0,90	nappal	<i>Lamaud et al. (2002)</i>	0,56	
	0,78	nyári félév, 12 UTC	<i>Zhang et al. (2006)</i>		
	0,50	teljes napra	<i>Zhang et al. (2002)</i>		
tülevelű	0,64	délután	<i>Lamaud et al. (2002)</i>	0,51	
	0,35–0,70	nyár	<i>Hole et al. (2004)</i>		
	0,63	délután, július	<i>Mikkelsen et al. (2000)</i>		
	0,30–0,70	tavaszi	<i>Kurpius et al. (2002)</i>		
	0,59	12 UTC	<i>Tuovinen et al. (2004)</i>		
	0,50–0,58	nyár	<i>Mikkelsen et al. (2004)</i>		

A modellszámítások tényleges verifikációja azt jelentené, hogy a pontbeli méréseket az adott helyre történő modellszámítással vetnénk össze. Az összehasonlítás során viszont a rácsra számított értékeket hasonlítottuk más területeken, de hasonló felszín felett, hasonló időszakban végzett pontbeli mérésekhez. Ennek ellenére a 6. és 7. táblázatokban bemutatott értékek jó egyezést mutatnak a szakirodalmi adatokkal. A 6.

táblázatban az ülepedési sebességek a 7. táblázatban pedig a teljes fluxusok a mért és modellezett értékeinek összehasonlítása látható.

7. táblázat: A mért és a modellezett fluxus adatok összehasonlítása

	<i>Szakirodalmi adatok</i>			<i>Modellszámítások</i>	
	<i>eredmény</i> [ $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]	<i>körülmény</i>	<i>forrás</i>	<i>eredmény</i> [ $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]	<i>körülmény</i>
lombhullató	0,82	nyár i félév 12 UTC	<i>Zhang et al. (2006)</i>	0,65	július, 12 UTC
elegyes	0,70	nyári félév 12 UTC	<i>Zhang et al. (2006)</i>	0,64	
tülevelű	0,30	nyár	<i>Gerosa et al. (2005)</i>	0,64	
	0,40	nyár	<i>Vitale et al. (2005)</i>		
	0,4–0,6	nyár	<i>Mikkelsen et al. (2000)</i>		
0,8	nyár, 12 UTC	<i>Mikkelsen et al. (2004)</i>			

## 6. Összefoglalás

Kutatásunk célja a magyarországi erdőállományokat érő ózonterhelés mértékének, valamint időbeli és térbeli változékonyságának megadása volt.

Munkánk során az Eötvös Loránd Tudományegyetemen kifejlesztett csatolt terjedési–ülepedési modell (TREX) segítségével becslést adtunk a lombhullató, a tűlevelű és az elegyes erdőállományok fölötti ülepedési sebességre 1998 nyári félévére (április–szeptember). A modellfuttatásokhoz erre az időszakra álltak rendelkezésünkre a bemenő adatok.

A modellel korábban is számították már az ózon ülepedését. Diplomamunkám során a korábbi eredményekre és tapasztalatokra támaszkodva a modell fejlesztését és alkalmazását végeztem el. A fejlesztés során pontosítottuk a térbeli felbontást, finomítottuk a parametrizációkat. A számításokat azokon a rácpontokon végeztük el, amelyeken található valamilyen erdőállomány. Így képet kaptunk a hazai erdők fölötti ülepedés mértékéről, időbeli és területi változékonyságáról. Lehetőség nyílt a három különböző állomány közti eltérések elemzésére is.

Kiszámítottuk Magyarország erdővel borított területére az ózon ülepedési sebesség nappali órákra jellemző (12 UTS-s) havi átlagos értékeit. Meghatároztuk a lombhullató, tűlevelű és elegyes erdőkre jellemző országos havi átlagokat, minimumokat és maximumokat.

Az ülepedési sebesség térbeli eloszlásának elemzése során rámutattunk az időjárás helyzet, a talajtípus és talajállapot okozta területi különbségekre. Megállapítottuk, hogy hazánkban a nyári időszakban a csapadék hiánya, s ezen keresztül a kisebb talajnedvesség nagymértékben csökkentheti az ülepedés mértékét.

Az időbeli változást vizsgálva azt tapasztaltuk, hogy az egyes állományok fölött eltérően alakul az ülepedési sebesség időbeli menete. Lombhullató erdőkre a tavaszi és nyári hónapokra nagyobb eltéréseket kaptunk, míg tűlevelűekre jóval kiegyenlítettebb a havi változékonyság. Összességében, átlagosan a legnagyobb terhelés júniusban és júliusban a lombhullató erdőket éri.

Részletes érzékenységi vizsgálatokat végeztünk, melynek során a levélfelületi index, a minimális sztómaellenállás, a hőmérséklet, a relatív nedvesség és a globálsugárzás értékek módosításának hatását figyeltük az ülepedési sebesség havi átlagos értékeiben. Megállapítottuk, hogy a három erdőállomány közti eltérés a hőmérsékleti stressz esetén legnagyobb. A legérzékenyebben a minimális sztómaellenállás változtatására reagált a

modell. Mivel egyben ez a modell egyik legbizonytalanabb bemenő paramétere is, ezért értéke további pontosítást igényel.

1998 júliusára koncentráció- és fluxus alapú terhelési térképeket is készítettünk. Ráműtattunk, hogy a tényleges ózonterhelés mértékéről és lokális változékonyságáról a fluxus alapú mérőszámok (teljes fluxus és a kumulatív sztómafluxust leíró  $AF_{stY}$ ) pontosabb, árnyaltabb képet nyújtanak, mint a koncentráció alapú mérőszámok (ózonkoncentráció és AOT40).

A bemutatott modellfejlesztések révén lehetőség nyílt adott felszínűtípust érő ózonterhelés becslésére. A modell pontosítása, a számítások során fölmerült technikai nehézségek kiküszöbölése, valamint az eredmények értékelése nagymértékben elősegítik a további modellezési feladatokat.

A további céljaink között szerepel az ózon teljes és sztómákon keresztüli fluxusának meghatározása a teljes nyári félévre, illetve részletesebb parametrizáció alkalmazása az erdőállományokra (fafajok elkülönítése, pontosabb növényfiziológiai paraméterek). Ez azért fontos, mert az Erdészeti Tudományos Intézet által végzett megfigyelések is azt mutatják, hogy az egyes erdőállományokon belül a különböző fajok is eltérően reagálnak az ózonterhelésre.

A diplomamunkában bemutatott módszerrel lehetséges egyéb felszínűtípusokra vonatkozó becsléseket is végezni, ezáltal hazánk környezeti terhelésének pontosabb képét adhatjuk meg.

## Irodalomjegyzék

- Antal, K.*, 2006: Terjedési–ülededési modell kémiai almoduljának finomítása. Tudományos Diákköri Dolgozat.
- Bán, I., Király, P., Pluzsik, A., Szabó, P., Wisznovszky K., Zétényi*, 2003: Magyarország erdőállományai, 2001. *Állami Erdészeti Szolgálat, Budapest*
- Bassin, S., Calanca, P., Weidinger, T., Gerosa, G., Fuhrer, J.*, 2004: Modeling seasonal ozone fluxes to grassland and wheat: model improvement, testing, and application. *Atmospheric Environment* 38, 2349–2359.
- Borhidi, A.*, 1991: Az ózon hatása a növényzetre. *Időjárás* 95. 2–3, 128–130.
- Bozó, L., Mészáros, E., Molnár, Á.*, 2006: Levegőkörnyezet. *Akadémia Kiadó, Budapest.*
- Breuer, L., Eckhardt, K., Frede, H.G.*, 2003: Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling* 169, 237–293.
- Brook, J. R., Zhang, L., Di-Giovanni, F., and 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.
- 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., de la Torre, D.*, 2007: Comparison of different stomatal conductance algorithms for ozone flux modelling. *Environmental Pollution* 146, 726–735.
- Cieslik, A. S.*, 2004: Ozone uptake by various surface types: a comparison between dose and exposure. *Atmospheric Environment* 38, 2409–2420.
- Debreczeni, V.*, 2006: A felszínközeli háttér-ózonkoncentráció trendje Magyarországon. *Diplomamunka*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest.
- Ferretti, M., Fagnano, M., Amoriello, T., Badiani, M., Ballarin-Denti, A., Buffoni, A., Bussotti, F., Castagna, A., Cieslik, S., Costantini, A., De Marco, A., Gerosa, G., Lorenzini, G., Manes, F., Merola, G., Nali, C., Paoletti, E., Petriccione, B., Racalbutto, S., Rana, G., Ranieri, A., Tagliaferri, A., Vialetto, G., Vitale, K.*, 2007: Measuring, modelling and testing ozone exposure, flux and effects on vegetation in southern European conditions – What does not work? A review from Italy. *Environmental Pollution* 146, 648–658.

- Fuhrer, J., Skärby, L., Ashmore, M. R., 1997: Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environmental Pollution* 97, 91–106.
- Gerosa, G., Marzuoli, R., Cieslik, S., 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.
- Gerosa, G., Vitale, M., Finco, A., Manes, F., Ballarin–Denti, A., Cieslik, S., 2005: Ozone uptake by evergreen Mediterranean Forest (*Quercus ilex*) in Italy. Part I: Micrometeorological flux measurements and flux partitioning. *Atmospheric Environment* 39, 3255–3266.
- Guicherit, R., and Roemer, M., 2000: Tropospheric ozone trends. *Chemosphere–Global Change Science* 2, 167–183.
- Hole, L. R., Semb A., and Tørseth K., 2004: Ozone deposition to a temperate coniferous forest in Norway, gradient method measurements and comparison with the EMEP deposition module. *Atmospheric Environment* 38, 2217–2223
- Jarvis, P. G., 1976: The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B* 273, 593–610.
- Jonson, J. E., Simpson, D., Fagerli, H., and Solberg, S., 2006: Can we explain the trends in European ozone levels? *Atmospheric Chemistry and Physics* 6, 51–66.
- Juhász, Á., 2006: Az ózonerjedés becslése csatolt terjedési–üledési modellel. *Diplomamunka*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest.
- Karlsson, P. E., Uddling, J., Braun, S., Broadmeadow, M., Elvira, S., Gimeno, B. S., Le Thiec, D., Oksanen, E., Vandermeiren, K., Wilkinson, M., Emberson, L., 2004: New critical levels for ozone effects on young trees based on AOT40 and simulated cumulative leaf uptake of ozone. *Atmospheric Environment* 38, 2283–2294.
- Karlsson, P. E., Braun, S., Broadmeadow, M., Elvira, S., Emberson, L., Gimeno, B. S., Le Thiec, D., Novak, K., Oksanen, E., Schaub, M., Uddling, J., Wilkinson, M., 2007: Risk assessments for forest trees: The performance of the ozone flux versus the AOT concepts. *Environmental Pollution*, 146, 608–616.
- Klemm, O., and Mangold, A., 2001: Ozone deposition at a forest site in Ne Bavaria. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 1, 223–232.
- Komjáthy, E., 2006: Ózonüledés becslése Magyarország területére a TREX modellel. Tudományos Diákköri Dolgozat.



- Kurpius, M. R., McKay, M., and Goldstein, A. H., 2002: Annual ozone deposition to a Sierra Nevada ponderosa pine plantation. *Atmospheric Environment* 36, 4503–4515.
- Lagzi, I., 2003: Magyarország levegőszennyezettségének modellezése adaptív térbeli rács alkalmazásával. *Doktori értekezés*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizikai Kémiai Tanszék, Budapest.
- Lagzi, I., Mészáros, R., Horváth, L., Tomlin, A., Weidinger, T., Turányi, T., Ács, F., Haszpra, L., 2004. Modelling ozone fluxes over Hungary. *Atmospheric Environment* 38, 6211–6222
- Lagzi, I., Mészáros, R., Ács, F., Tomlin, A. S., Haszpra, L., and Turányi, T., 2006: Description and evaluation of a coupled Eulerian transport–exchange model. Part I. Model development. *Időjárás* 110, 349–363.
- Lamaud, E., Carrara, A., Brunet, Y., Lopez, A., and Druilhet, A., 2002: Ozone fluxes above and within a pine forest canopy in dry and wet conditions. *Atmospheric Environment* 36, 77–88.
- Matyssek, R., Bytnerowicz, A., Karlsson, P. E., Paoletti, E., Sanz, M., Schaub, M., Wieser, G., 2007: Promoting the O<sub>3</sub> flux concept for European forest trees. *Environmental Pollution*, 146, 587–607.
- Meyers, T. P., Baldocchi, D. D., 1988: A comparison of models for deriving dry deposition fluxes of O<sub>3</sub>, and SO<sub>2</sub> to a forest canopy. *Tellus* 40B, 270–284.
- Mészáros, E., 1997: Levegőkémia. *Veszprémi Egyetemi Kiadó*
- Mészáros, R., 2002: A felszínközeli ózon száraz ülepedésének meghatározása különböző felszíntípusok felett. *Doktori értekezés*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest.
- Mészáros, R., Lagzi, I., Juhász, Á., Szinyei, D., Vincze, Cs., Horányi, A., Kullmann, L., and Tomlin A. S., 2006: Description and evaluation of a coupled Eulerian transport–exchange model. Part II. Sensitivity analysis and application. *Időjárás* 110, 365–377.
- Mészáros, R., Szinyei, D., Vincze, Cs., Lagzi, I., Turányi, T., Haszpra, L., Tomlin A. S., 2006: Effect of the soil wetness state on the stomatal ozone fluxes over Hungary. *Int. J. Environment and Pollution* (in press)
- Mikkelsen, T. N., Ro-Poulsen, H., Hovmand, M. F., Jensen, N. O., Pilegaard, K., and Egeløv, A. H., 2004: Five-year measurements of ozone fluxes to a Danish Norway spruce canopy. *Atmospheric Environment* 38, 2361–2371.

- Mikkelsen, T. N., Ro-Poulsen, H., Hovmand, M. F., Jensen, N. O., Pilegaard, K., Christensen, C. S., and Hummelshøj, P., 2000: Ozone uptake by an evergreen forest canopy: temporal variation and possible mechanisms. *Environmental Pollution* 109, 423–429.
- 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.
- Padro, J., Den Hartog, G., Neumann, H., 1991: An investigation of the ADOM dry deposition module using summertime O<sub>3</sub> measurements above a deciduous forest. *Atmospheric Environment* 25, 1689–1704.
- Padro, J., 1996: Summary of ozone dry deposition velocity measurements and model estimates over vineyard, cotton, grass and deciduous forest in summer. *Atmospheric Environment* 30, 2363–2369.
- Szinyei, D., Vincze, Cs., 2005. Talajnedvesség-becselő modell tesztelése és alkalmazása magyarországi adatsorokon. XXV. FiFöMa OTDK Konferencia, ELTE TTK, Budapest
- Tuovinen, J. P., Simpson, D., Mikkelsen, T. N., Emberson, L. D., Ashmore, M. R., Aurela, M., Cambridge, H. M., Hovmand, M. F., Jensen, N. O., Laurila, T., Pilegaard, K., and Ro-Poulsen, H., 2001: Comparisons of measured and modelled ozone deposition to forests in northern Europe. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 1, 263–274.
- Tuovinen, J. P., Ashmore, M. R., Emberson, L. D., and Simpson, D., 2004: Testing and improving the EMEP ozone deposition module. *Atmospheric Environment* 38, 2373–2385.
- Vincze, Cs., 2006: Baleseti kibocsátási modell fejlesztése és operatív alkalmazása. *Diplomamunka*. ELTE–TTK, Meteorológiai Könyvtár, Budapest.
- Vitale, M., Gerosa, G., Manes, F., Ballarin Denti, A., 2005: Ozone uptake by evergreen Mediterranean Forest (*Quercus ilex*) in Italy. Part II: Flux modelling. Upscaling leaf to canopy ozone uptake by a process-based model. *Atmospheric Environment* 39, 3267–3278.
- Wesely, M. L., 1989: Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. *Atmospheric Environment* 23, 1293–1304.

Zeller, K., 2002: Summer and autumn ozone fluxes to a forest in the Czech Republic Brdy Mountains. *Environmental Pollution* 119, 269–278.

Zhang, L., Moran, M., D., Makar, P., Brook, J., R., and Gong, S., 2001: Modeling gaseous dry deposition in AURAMS: a unified regional air-quality modeling system *Atmos. Environ.* 36, 537–560.

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**

[http://www.emep.int/mscw/mscw\\_datanotes.html](http://www.emep.int/mscw/mscw_datanotes.html)

[www.eur-lex.europa.eu](http://www.eur-lex.europa.eu)

## **Köszönetnyilvánítás**

Elsősorban köszönetemet fejezem ki témavezetőimnek dr. Mészáros Róbertnek (ELTE TTK Meteorológiai Tanszék) és dr. Lagzi István Lászlónak (ELTE TTK Fizikai Kémiai Tanszék) a közös munkára szánt rengeteg időért, és a sok segítségért.

Köszönöm Vincze Csillának, Szinyei Dalmának, Komjáthy Eszternek és Antal Krisztinának, hogy mindvégig jó hangulatban dolgozhattunk együtt.

Külön köszönöm dr. Sitkey Juditnak (ERTI) szíves együttműködését.