

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Meteorológiai Tanszék

A levélfelületi index mérése és modellezése



Készítette:

Richter Péter

Témavezetők:

dr. Mészáros Róbert

(ELTE Meteorológiai Tanszék)

dr. Barcza Zoltán

(ELTE Meteorológiai Tanszék)

Budapest, 2009.

Tartalomjegyzék

| | |
|--|----|
| 1. Bevezetés | 3 |
| 2. A levélfelületi index | 4 |
| 3. A levélfelületi index mérése és számítása | 5 |
| 3.1. A mérések általános jellemzői | 5 |
| 3.2. Egy levél felületének megmérése | 6 |
| 3.3. A levélfelületi index statisztikai becslése..... | 7 |
| 3.4. A kiterítéssel módszer | 8 |
| 3.5. A tömeg mérésén alapuló módszer | 8 |
| 3.6. A halszemoptikás módszer | 8 |
| 3.7. Sugármérővel való mérés | 9 |
| 3.8. Műholdas mérés | 11 |
| 4. Nemzetközi mérési eredmények | 13 |
| 5. Levélfelületi index modellek..... | 20 |
| 5.1. A modellekről általánosan..... | 20 |
| 5.2. Nussbaum modellje gabonára..... | 21 |
| 5.3. Rosset és Lambert modellje gyepre | 22 |
| 6. Saját modellfuttatások..... | 25 |
| 6.1. Modell illesztése Braunschweig-i mérési adatokra..... | 25 |
| 6.2. A Rosset–Lambert modell fejlesztése | 27 |
| 7. Összefoglalás..... | 34 |
| Köszönetnyilvánítás | 35 |
| Irodalomjegyzék..... | 36 |

1. Bevezetés

A meteorológia tudománya kezdetektől fogva méréseken és megfigyeléseken alapul. A számítástechnikát ma már nélkülözhetetlennek tartó világunk egyre inkább képes nagy mennyiségű mérési adatot feldolgozni, egyre bonyolultabb matematikai modellezési eljárásokkal számolni. Ebből kifolyólag az időjárás számszerű előrejelzésnél, vagy a talaj–felszín–léggör kölcsönhatások modellezésénél egyre több mért vagy modellezett állapothatározót vehetünk figyelembe, ezáltal pontosítva a számításokat. E modellek egyik fontos bemenő vagy származtatott adata a levélfelületi index.

A levélfelületi index (LAI) jelentőségére a XX. század első felében figyeltek fel, 1932 óta hozzáférhetők a mérési adatsorok (Scurlock et al., 2001). Vizsgálata elsődlegesen meteorológiai és mezőgazdasági célokat szolgál. Értéke meghatározó szerepet tölt be a felszín és a léggör között végbemenő folyamatokban, a mért vagy parametrizált adatsorokat felhasználják levegőkémiai, ülepedési, valamint időjárás előrejelző és más modellekben is (Barcza et al., 2003; Mészáros et al., 2009).

A levélfelületi index meghatározására különböző mérési módszereket és parametrizációkat használnak. Pontbeli LAI mérések csak szűkösen állnak rendelkezésre, azok elsősorban egy-egy kutatási programhoz kapcsolódnak. A műholdas mérések pedig egy-egy terület átlagos LAI értékét adják meg (esetenként igen nagy hibával terhelt), holott sok esetben az adott vegetációkra vonatkozó konkrét értékekre lenne szükség. Ez a LAI különböző parametrizációjával adható meg.

Munkám során az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén folyó kutatási programokba kapcsolódtam be. Kutatásunk célja a levélfelületi index értékének, valamint tér- és időbeli változásának modellezése.

Dolgozatomban ismertetem a levélfelületi index felhasználási lehetőségeit, bemutatom a különböző mérési és modellezési eljárásokat, valamint hazai és nemzetközi mérési adatok felhasználásával összehasonlítok néhány LAI parametrizációs eljárást.

2. A levélfelületi index

Az élő szervezetekre jellemző mérőszámokat fenometriai mérőszámoknak nevezzük. Az élőlényeknek bármilyen számmal jellemezhető (mérhető vagy kiszámolható) tulajdonsága egy-egy fenometriai mérőszám. Ilyen például a levélfelületi index is.

A levélfelületi indexet az LAI (Leaf Area Index) angol mozaikszóval szokták rövidíteni.

A levélfelületi indexnek nincs dimenziója: egy szám, ami kifejezi azt, hogy egy négyzetméter földfelszínre hány négyzetméter levélfelület jut (Huzsvai et al., 2004):

$$\text{LAI} = \text{levélfelület [m}^2\text{]} / \text{talajfelület [m}^2\text{]}$$

Megkülönböztetnek egy- és kétoldalas levélfelületi indexeket. Egyoldalas LAI esetén csak a levelek egyik oldalának a felülete számítandó, kétoldalas esetén mindkét oldal. Az egyoldalas levélfelületi indexet gyakran úgy számítják, hogy a kétoldalasat elfelezik. Alapesetben, ha levélfelületi indexről beszélünk, az egyoldalas levélfelületi indexre gondolunk (Huzsvai et al., 2004).

A LAI előnye, hogy könnyen megérthető, egyszerű vele számolni, ugyanis az index értéke épp a kiszámolásból adódóan nem lehet negatív vagy komplex. Jól jellemzi az adott növényállomány sűrűségét, ezért számos területen felhasználják a felszín–léggör közti kölcsönhatások modellezése során. Hátránya ugyanakkor, hogy értéke nehezen meghatározható és pusztán a LAI alapján nem derül ki semmi a növények alakjáról és eloszlásáról. Egy példával szemléltetve: egy adott területre vonatkoztatva ugyanazon levélfelületi index érték jelentheti azt, hogy az összes levél egymás felett helyezkedik el, alig borítva be a területnek egy kis hányadát (pl. szőlőtőkék esetén), vagy jelentheti azt is, hogy a talajfelszín levelekkel egyenletesen borított (pl. egy gyep esetén).

Ennek ellenére a LAI jól használható többek között a növényzet párolgásának, az ülepedési sebesség térbeli eloszlásának, valamint a növényi produktivitásnak és szénmérlegnek a meghatározására, alkalmazható a távérzékelési adatok validálása céljából, valamint beépíthető időjárás és éghajlat előrejelző numerikus modellekbe is (Mészáros et al., 2009).

3. A levélfelületi index mérése és számítása

3.1. A mérések általános jellemzői

A levélfelületi index mérése számos különböző módon történhet. A lényeg, hogy minden esetben pontosan meg kell tudni határozni a levélzet felületét, és a földfelszín területét, amely felett a levelek elhelyezkednek (Huzsvai et al., 2004).

A levélfelületi index mérésére rendszeresen szükség van a modellek felállításához, mert értéke napról-napra változhat. A legkisebb éghajlati és földrajzi eltérések, a területen különböző növényfajták mind-mind megváltoztathatja az értékét (Scurlock et al., 2001; Breuer et al, 2003).

Levélfelületi indexet mérni elsősorban mikrometeorológiai módszerekkel lehet pontosan. A mérés nagy távlatokban szinte pontszerűnek fogható fel, mert csak egy kis területet vizsgálunk vele. Azért csak ilyen kis területeket vizsgálunk, mert mind a növényzet, mind a növényvel való borítottság mértéke változó, nehéz elkülöníteni a növényfajtákat, a növényvel borított és borítatlan területeket, a borítottság mértékét. Még így közelről is szinte csak becsülni lehet, pontosan mérni nagyon nehéz a növényzeti paramétereket a kisebb-nagyobb skálájú heterogenitások miatt (Breuer et al, 2003).

A mikrometeorológiai mérések előnye, hogy minden tekintetben pontosabb adatokat szolgáltat a többi módszerrel összehasonlítva.

Hátránya, hogy csak egy viszonylag kicsi területet tudunk így mérni. Ahhoz, hogy átfedő képet kapjunk, rengeteg mérőállomásra lenne szükség, ami alapjában véve nagyon drága volna.

Mai világunkban már távérzékeléssel (pl.: műholddal) is egyre pontosabb képet kapunk a növényzetről, a legújabb műholdakon már méternyi felületek megkülönböztethetők a Föld felszínén. Ennek ellenére ma műholddal levélfelületi indexet legjobb esetben is csak több száz négyzetméteres felbontással tudunk mérni (Borak et al., 2008).

A legideálisabb az olyan mérőhálózat létrehozása, amelyben mind a helyszíni, mind a távérzékelési, valamint mind a regionális, mind a globális skálájú méréseknek szerepe van. Így a paraméterek becsülhetők, és nem szükséges nagy sűrűségű mérőhálózat létrehozása. A műholdas mérésekkel elkerülhetők a nagyobb területi tévedések, a közeli mérésekkel pedig pontosabban mérve, a becsléseket nagyobb területre terjeszthetjük ki.

Ez a fajta rendszer a fejlődés következtében egyre inkább használatos a mai meteorológiában, de még nem teljesen valósult meg a növényparaméterek, ezen belül a levélfelületi index vizsgálatának terén.

A következőkben áttekintjük az egyes levélfelületi index mérési módszereket.

3.2. Egy levél felületének megmérése

Egy levél felülete (LA = Leaf Area) pontosan lemérhető, ha milliméterpapírra rajzoljuk a körvonalát, és megszámoljuk a négyzeteket.

Ez a módszer a mai digitális technika segítségével úgy is alkalmazható, hogy egy olyan érzékelő felületre helyezzük el a levelet, amelyen egy milliméter-pontosságú detektáló háló van. A számítógép vagy mérőműszer automatikusan meghatározza a felületet.

Másik digitális módszer, hogy merőlegesen felülről lefényképezzük a levelet lehetőleg egy digitális fényképezőgéppel. Egy grafikai programmal körberajzolva a levelet a program képes a körberajzolt terület nagyságát kiszámítani. Ez esetben viszont vigyázni kell a megfelelő méretarányokkal. Vagyis ami a valóságban egy centiméter, az a számítógépben is annyi legyen!

Ugyanígy megtehetjük azt is, hogy csak nagyon tiszta fehér lapra téve a levelet fényképezünk, és teljesen kontrasztossá tesszük a képet: a levél fekete, a háttér fehér lesz. Így csak a színek arányát kell meghatározni.

A növény fajtáját vagy a levél formáját ismerve a levélfelület a lenti képlettel határozhatjuk meg (Huzsvai et al., 2004):

$$LA = (s - h) / K = k (s \cdot h), \quad (1)$$

ahol s a levél maximális szélessége, h a levél maximális hosszúsága, míg K és k fajra és fajtára vagy levélformára jellemző állandók.

Polster és Reichenbach (1958) a növények leveleit alakjuk szerint tipizálta, és meghatározta K és k értékét (1. táblázat).

1. táblázat: Az (1) egyenletben használt levélállandók különböző alakú levelek esetén

| Forma | K | k |
|--------------|-------|-------|
| A: vese | 1,019 | 0,982 |
| B: nyárs | 1,086 | 0,921 |
| C: hosszúkás | 1,167 | 0,857 |
| D: szív | 1,169 | 0,856 |
| E: nyíl | 0,816 | 1,126 |
| F: kör | 1,300 | 0,769 |
| G: lándzsa | 1,528 | 0,654 |
| H: rombusz | 1,635 | 0,612 |

Forrás: Huzsvai et al., 2004

3.3. A levélfelületi index statisztikai becslése

Ha megvizsgálunk több különböző, de egyazon növénytípushoz tartozó levelet véletlenszerűen, egy idő után statisztikai átlagokat képezhetünk az adott növényfaj átlagos levélfelületéről. Meghatározható adott fajból az egy növényen található átlagos levelek száma, valamint hogy az adott területen mennyi az adott fajtájú növény száma. Kevesebb és nagyobb növények esetén akár egyenként is megszámlálható (ezt az erdészek gyakran meg is teszik, lásd Ujvári et al., 2001), kisebb növények vagy nagyobb egyedszám esetén az érték meg is becsülhető. Ez esetben az alábbi képlettel határozhatjuk meg a levélfelületi indexet az adott fajra vonatkoztatva.

$$LAI_0 = (LA_0 \cdot LN \cdot PN) / T, \quad (2)$$

ahol LAI_0 az adott faj levélfelületi indexe, LA_0 az adott faj átlagos nagyságú levelének területe, LN az egy növényre jutó átlagos levélszám, PN a faj egyedeinek száma a területen, és T a vizsgált terület

Ha ezt a módszert a területen található összes növényfajra elvégezzük, és a fajra vonatkoztatott levélfelületi index adatokat összegezzük, a teljes levélfelületi index értéket kapjuk meg.

Azért célszerű a fajokra, de legalábbis növénycsoportokra való leosztás, mert így sokkal több információhoz jutunk. Egyrészt, mert a növényzet időjárás módosító paraméterei a fajtól

is függenek, valamint így ha egy faj-állomány számban hirtelen változás (pl.: betegség, fák kivágása vagy telepítése) lép fel, nem kell újabb felmérést készítenünk.

A módszer hátránya, hogy csak viszonylag kicsi, vagy viszonylag homogén területen alkalmazható.

3.4. A kiterítéssel módszer

Egyszerű, mégis hatékony eljárás az, amit az erdészek alkalmaznak. Ősszel összegyűjtik a lehullott avart, gondosan figyelve, mekkora területről gyűjtötték össze. A leveleket, mint egy gyepszőnyeget kiterítik egymás mellé, és lemérik ennek a felületét. Ez határozza meg az összes levélfelületet. Ez alapján egyszerűen osztással származtathatjuk a levélfelületi indexet az adott területre vonatkozóan.

3.5. A tömeg mérésén alapuló módszer

A levél felülete leírható a következő egyenlettel:

$$LA = m \cdot b, \tag{3}$$

ahol m a levél tömege, b pedig egy empirikus együttható (specific leaf area [m^2/kg]).

Csak teljesen lehullott leveleknél alkalmazható az eljárás, mivel csak így vagyunk képesek a teljes levélzet felületét meghatározni. Viszonylag pontatlan az eljárás az empirikus állandó hibája miatt, valamint amiatt is, hogy minden levelet képtelenség összegyűjteni és lemérni, és az összes úgysem hullik le egyszerre. Száraz levelekkel számolnak, mert a nedves levélnek és a száraz levélnek a tömege nem egyezik meg. Továbbá tudni kell, hogy a lehullott levél már nem ugyanaz, ami a növényen található. A lehullás után a levél már nem egy élő szervezet része, bomlani kezd, veszít a tömegéből (Ujvári et al., 2001).

3.6. A halszemoptikás módszer

A halszemoptika egy fotografiai objektív, melyet eredetileg meteorológiai és csillagászati célokra fejlesztett ki Robin Hill angol tudós 1924-ben. Ma már a mindennapi életben is egyre nagyobb népszerűségnek örvend. Egy jellegzetes formában görbített optikai lencsét tartalmaz. Különlegessége, hogy a tér minden irányába akár 180 fokot is meghaladó látószöggel rendelkező valódi képet kapunk eredményül. Ez az eredményül kapott kép kör alakú.

Ha a zenit irányába fényképezünk, 180 fokos vagy annál nagyobb látószögű lencsével az egész égboltot, mint egy félgömböt látjuk. Angolul ezért a fisheye (halszem) photography-n kívül a hemispherical (félgömb) photography kifejezést is használják (http://en.wikipedia.org/wiki/Hemispherical_photography).

A digitális fényképezést célszerű alkalmazni, mert így az adatok közvetlenül a számítógépbe vihetők. A gépet úgy kell elhelyezni, hogy a lencséje függőlegesen felfelé nézzen.

Ha a kép elkészült, a képen látható növények területét az égbolttól megkülönböztetve egy program analizálja. A programnak kalkulálnia kell mind a dőlésszöggel, mind pedig a levelek távolságával, hogy képes legyen meghatározni, mekkora területek felett mekkora levélfelület található. Hogy a levelek milyen távol vannak, a levelek nagyságából és a dőlésszögének változásából határozható meg.

Tulajdonképp a programunk egy képzeletbeli vetítést végez: a föld síkjára vetíti le a leveleket.

A módszert alkalmazzák az égbolt láthatóságának közvetlen mérésére is. Ez nagyon fontos például a városi hősziget meghatározásához a beépítettség függvényében (Unger et al., 2006).

3.7. Sugárzásmérővel való mérés

Sugárzástanilag a zöld levelek jelentős része egymáshoz hasonlóan viselkedik. Ezt az általánosan jellemző viselkedési formát a 2. táblázat szemlélteti.

2. táblázat: A zöld levelek sugárzástani viselkedése

| A zöld levelek általános viselkedése | 0,38 – 0,71 μm (fotoszintetikusán aktív sugárzás) | 0,71 – 4 μm (közeli infravörös) | 0,35 – 3 μm (rövidhullám) | 3 – 100 μm (hosszúhullám) |
|---|---|---|---|---|
| <i>visszaverés</i> | 0,09% | 0,51% | 0,30% | 0,05% |
| <i>átbocsátás</i> | 0,06% | 0,34% | 0,20% | 0,00% |
| <i>elnyelés</i> | 0,85% | 0,15% | 0,50% | 0,95% |

Forrás: Unger és Sümegey, 2002

Az általános, 2. táblázatban ábrázolt képhez képest két kivételt érdemes megemlíteni: a sivatagi növényeket és a fenyőket. Sok sivatagi növénynek vastagok a levelei, ezzel csökkentik vagy teljesen megszüntetik az átbecsátást. Ezen növények az átlagosnál jobban visszaverik a sugárzásokat, különben túlmelegednének (Unger és Sümeghy, 2002).

A hordozható, kézi LAI RL-Iugárásmérők optikai lencsüket, szűrőket tartalmaznak, és a fotoszintetikusan aktív sugárzási tartományban (PAR) mérnek. A levelek fény abszorpciója és intercepciója alapján számolnak a műszerbe beérkező direkt és diffúz sugárzás arányából, valamint akár több magassági szinten mérve a fény gyengülésének az arányából.

A levélfelületi index mérésére gyakran használatos kézi sugárásmérők például a Li-Cor LAI 2000 és a Decagon AccuPAR LP-80.

A kézi módszer nehezen megközelíthető, sűrű erdős területen csak igen körülményesen, vagy egyáltalán nem alkalmazható. A lombkoronák magasságát meghaladva a mérés sokszor csak helikopterrel, repülővel vagy műholddal oldható meg. Ezért a digitális leképező technika és a távérzékelés szerepe folyamatosan nő.

A távmérés esetén egyes növény-társulások, növényfajok, és az egyes talajtípusok albedóját mérésekkel határozhatjuk meg. Ha tudjuk, hogy a területen milyen talaj és növénytípusok vannak, attól függően, hogy a sugárzásnak hány százaléka verődik vissza a mérőműszerünkbe, következtetni lehet a levéllel való borítottság mértékére, ebből pedig a levélfelületi indexre.

A levéllel való borítottság meghatározza annak a valószínűségét, hogy a fénysugár nem éri el a talajfelszínt. A levéllel való borítottság és a levélfelületi index közötti kapcsolat az alábbi képlettel határozható meg, ha a megvilágított és az árnyékolt felület arányának az állandóságát feltételezzük:

$$GC = 1 - e^{-LAI}, \quad (4)$$

ahol GC a levélborítottság.

A levélborítottság meghatározásához azonban tudnunk kell az egyes felszíntípusok albedóját, hogy meg tudjuk becsülni a százalékos arányát a felszíni elemeknek (3. táblázat).

3. táblázat: Albedó értékek

| Legfontosabb felszíni albedó értékek: | |
|---|--------|
| víz | 5–10% |
| erdő | 5–15% |
| fü | 20–25% |
| rét, szántó | 25–40% |
| homok | 30–50% |
| hó | 60–80% |
| jég | 90% |
| Műholdas mérés esetén érdemes ismerni: | |
| átlagos felhőzet | 40–50% |
| vastag felhőzet | 60–80% |

A méréshez két rövidhullámhosszon mérő sugárzásmérő kell, hogy a légkör többi részéből szórt sugárzásokat kiküszöböljük. Az egyiket felfelé, a másikat lefelé kell fordítani, hiszen csak külön tudjuk mérni a beeső és a visszavert sugárzást.

Sugárzásmérés esetén a levélfelületi index és a visszaverődés közötti korreláció 0,6–0,9 között változik, ami azzal magyarázható, hogy az elektromágneses sugárzást a növény levélzetének állása, illetve a szöge is befolyásolja. A vízigényes növényfajoknál közel vízszintes, a szárazságtűrőknél pedig függőlegeshez közelálló levélállást figyelhetünk meg. Ennek figyelembe vétele jelentősen pontosíthatja a távérzékelés útján történő növényfaj elkülönítést.

3.8. Műholdas mérés

A műhoddal történő mérés szintén a sugárzáson alapszik. A módszer ugyanaz, mintha közelebbről vizsgálnánk, de a légköri viszonyok jobban befolyásolják a távérzékelést. Ha az ég például felhős, szennyezett vagy poros, nehezen vagy egyáltalán nem alkalmazható az eljárás.

A kvázipoláris műholdak fényképezéstechnikailag szinte a Föld minden egyes négyzetcentiméterét le tudják képezni. Azonban a levélfelületi index mérését műhoddal ilyen pontossággal végezni nehéz. Általában csak nagyobb területre, több száz négyzetméterre alkalmazzák.

Ezen mérések leginkább az infravörös tartományban történnek, mert ebben a tartományban a visszaverődés mértékét pont a levélfelület határozza meg. Nem csak azt képezi le, hogy a terület hány százalékát borítja levél. Bizonyos levélállás esetén akár az ötödik-hatodik levélréteg is módosíthatja a végső, mért érték alakulását.

Az előbb említett okok miatt a LAI műhóddal közvetlenül nehezen mérhető, ezért pontbeli mérésekkel validálják a távérzékelte adatokat, továbbá a LAI meghatározásánál más, a LAI-val szoros kapcsolatban álló változók (például a vegetációs index - NDVI) is szerepet játszanak a meghatározásnál.

A zöld területek vizsgálatával foglalkozik például a Landsat műholdcsalád. Jelenleg a Landsat 5 és 7 működik. Az 1999-ben felőtt Terra műhold MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) szenzora szintén nagyban hozzájárul a LAI megismeréséhez (Borak et al., 2008).

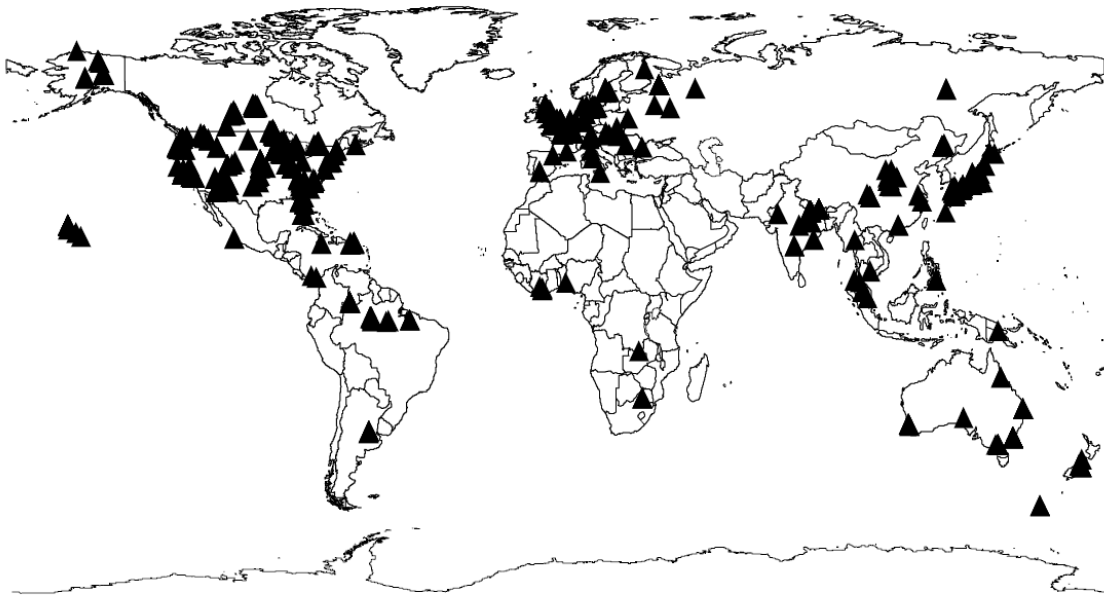
4. Nemzetközi mérési eredmények

Scurlock et al. (2001) a nemzetközi szakirodalomban rendelkezésre álló LAI mérési adatokat elemezték. Eszerint a méréseknek több mint a 40%-át az USA, körülbelül 15%-át Japán dokumentálja (4. táblázat). A LAI mérésével nem foglalkoznak minden országban (1. ábra), így lehetetlen a Föld felszínét felszínborítottság szerint viszonylag egyenletesen lemérni. Ennek oka, hogy a LAI nem tartozik bele az alap, kötelezően mérendő meteorológiai állapothatározók közé, mérését semmiféle nemzetközi egyezmény nem írja elő, így főleg csak a fejlett országokban végeznek LAI megfigyeléseket. A mérések kétharmadának a hitelessége és származása még a jelenlegi szinthez képest is bizonytalan, és kevesebb, mint tíz százaléka tünteti fel precízen a mérés helyét, földrajzi koordinátáit. Átlagosan 15 alapvető növényzeti (földrajzi és éghajlati viszonyoktól függő) paraméter alapján számolnak. Bár a szakértők egy része ezt is kevesli, tudjunk róla, hogy nem csak nehéz a csoportokat egymástól elkülöníteni, egy csoporton belül is jelentős eltérések adódhatnak, hiszen az egy típusba sorolandó növények sem mind ugyanúgy viselkednek. Sőt, még egy homogén ültetvényen a mérést pár méterrel arrébb elvégezve is kaphatunk más eredményt!

4. táblázat: LAI pontbeli mérés eloszlások 1.

| A LAI mérések gyakoriságának százalékos megoszlása országonként | |
|--|---------------------|
| Országok | Százalék (%) |
| Ausztrália | 4,3 |
| Brazília | 2,1 |
| Egyesült Államok | 41,1 |
| Egyesült Királyság | 6,3 |
| Franciaország | 1,7 |
| India | 3,2 |
| Japán | 15,2 |
| Kanada | 5,8 |
| Kína | 2,8 |
| Nepál | 1,1 |
| Oroszország | 2,2 |
| Puerto Rico | 1,3 |
| Svédország | 1,5 |
| Új-Zéland | 1,4 |
| Venezuela | 1,0 |
| Egyéb országok összesen | 9,0 |

Forrás: Scurlock et al., 2001



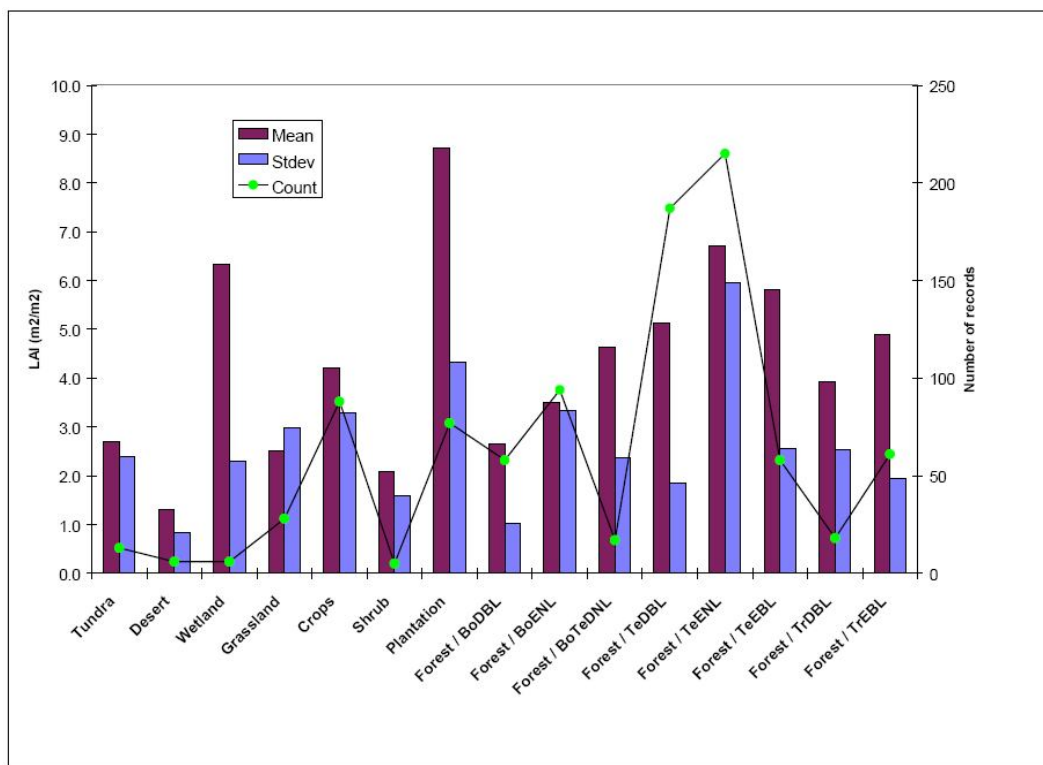
1. ábra. Az LAI mérési helyek globális eloszlása.
 Forrás: Scurlock et al., 2001

Az 5. táblázat a szemlélteti a fentebb említett 15 alapvető osztályt, valamint segítséget nyújt a lentebb található 2. ábra értelmezéséhez is.

5. táblázat: A 15 általánosan elkülönített növényzeti-éghajlati csoport jelölése és jelentése.

| | |
|-------------|---|
| tundra | tundra, sarkvidéki és hegyvidéki területek |
| desert | sivatagok |
| wetland | nedves talajú területek (mérsékelt és trópusi) |
| grassland | füves területek (mérsékelt és trópusi) |
| crops | gabonaültetvények (mérsékelt és trópusi) |
| shrub | bozótos területek (meleg és mediterrán vegetáció) |
| plantations | ültetett erdők, mérsékelt övi lehullott lomblevelűek, mérsékelt övi örökzöld tűlevelűek és trópusi lehullott lomblevelűek |
| BoDBL | erdő, boreális lehullott lomblevelűek |
| BoENL | erdő, boreális örökzöld tűlevelűek |
| BoTeDNL | erdő, boreális/mérsékelt övi lehullott tűlevelűek |
| TeDBL | erdő, mérsékelt övi lehullott lomblevelűek |
| TeENL | erdő, mérsékelt övi örökzöld tűlevelűek |
| TeEBL | erdő, mérsékelt övi örökzöld lomblevelűek |
| TrDBL | erdő, trópusi lehullott lomblevelűek |
| TrEBL | erdő, trópusi örökzöld lomblevelűek |

Forrás: Scurlock et al., 2001



2. ábra: A 15 alapvető osztály mérési adatsora 1000 hitelesített történeti mérés alapján. A 'Mean' az átlagos levélfelületi index értéket jelenti, az 'Stdev' pedig a szórást. Ezeket a bal oldali értéktengelyen szemléljük. A zöld pontok a mérések darabszámát jelentik a jobb oldali értéktengelyen. Forrás: Scurlock et al., 2001

6. táblázat: LAI pontbeli mérés eloszlások 2.

| A LAI mérések gyakoriságának százalékos megoszlása növényfajonként | |
|--|--------------|
| Növényfajok | Százalék (%) |
| juhar | 1,4 |
| szugifenyő | 1,3 |
| eukaliptusz | 2,3 |
| bükkfa | 1,6 |
| napraforgó | 1,7 |
| új-zélandi karácsonyfa | 1,7 |
| lucfenyő | 7,0 |
| törpefenyő | 11,0 |
| nyárfa | 4,8 |
| duglászfenyő | 1,8 |
| tölgy | 5,0 |
| szálafa | 1,4 |
| búza | 1,9 |
| bükköny | 1,0 |
| kukorica | 1,5 |
| Egyéb növények összesen | 22,1 |
| Nincs növényfaj adat | 32,6 |

Forrás: Scurlock et al., 2001

A 6. táblázat a konkrét növényállományok fölötti mérések százalékos eloszlását mutatja. A legkorábbi LAI mérési eredmények 1932-ből származnak, az eredmények több mint 60%-a 1980 utáni. Ennek oka egyértelműen a technikai fejlődés a meteorológiai mérések és a numerikus modellek terén, valamint közrejátszanak mezőgazdasági és környezetvédelmi szempontok is.

A történelmi méréseknek jelentősége nem csak a régmúltról kapott információkban rejlik a levélfelületi index esetében. Épp a nem megfelelő számú mérések miatt a jelenlegi modellekben is felhasználják a régi mért értékeket, a modellek kalibrálására illetve a távérzékelés kötelező validálására is.

Újabban egyre elterjedtebben használják a LAI távérzékelésen alapuló meghatározását. A MODIS egy műholdon található szabványosított rendszer, ami a földfelszín jobb felbontású leképezését teszi lehetővé egy sugárzásmérő műszer segítségével. A MODIS szenzort az 1999-ben fellőtt kvázipoláris Terra műholdon használták először, majd 2002-ben az Aqua műholdon (Barnes et al., 2003; <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/directbrod/index.php>).

A rendszer segítségével az eddiginél részletesebb képet kapunk többek között a felhőzet állapotáról, a légköri gázok mennyiségéről és a talaj-növény rendszerről.

Felhővel fedett területekről értelemszerűen nem tudunk származtatni növényi paramétereket, így LAI-t sem. A hiányzó mérési adatok pótlására ezért valamilyen matematikai módszer kidolgozására van szükség. Ilyen eljárás lehet az interpoláció.

Kétféle interpolációt használnak a gyakorlatban.

A térbeli interpoláció a felszín különböző pontjait megvizsgálva határozza meg a hiányos pontban lévő értéket (például a környezetében található pontok értékeinek az átlagolásával). Ez jobb eredményt ad erdős területek esetén (Borak et al., 2008).

Az időbeli interpoláció a térségre jellemző régebben mért időbeli adatokból von le következtetést a jelenlegi helyzetre, amennyiben az nem ismert. Ez az eljárás erdő nélküli területen hatásosabb (Borak et al., 2008).

A két eljárás együttesen is alkalmazható. Ez által pontosíthatjuk az eredményünket, vagy olyan sok hiányos adat esetén is kaphatunk eredményt, amelyeken csak az egyik módszert kapva fals eredményt kapnánk.

Az interpolációs eljárásokat a 2001-2006 közötti mért adatsorok alapján alkalmazták, körülbelül 1 km²-es felbontással (~1 pixel). Eredménye, hogy nagy vonalakban sikerült meghatározni az Egyesült Államok növényzeti borítottságát és LAI-jának területi eloszlását. (Borak et al., 2008).

A mért LAI adatokkal Kanadában a globális felmelegedés és az erdőtüzek kapcsolatát vizsgálják (Peckham et al., 2008). A kettő összefügg, mert az utóbbi évtizedekben a hőmérsékletnövekedés a vegetáció produktivitását megnövelte, a vegetációs időszakot meghosszabbította. Ezáltal nőtt a fotoszintézis, így az oxigén mennyisége is, és több lett az éghető szerves anyag. Az elkövetkezendő 50 évre a globális cirkuláció modellek alapján 2–4°C további hőmérsékletnövekedésre számíthatunk a térségben (Peckham et al., 2008).

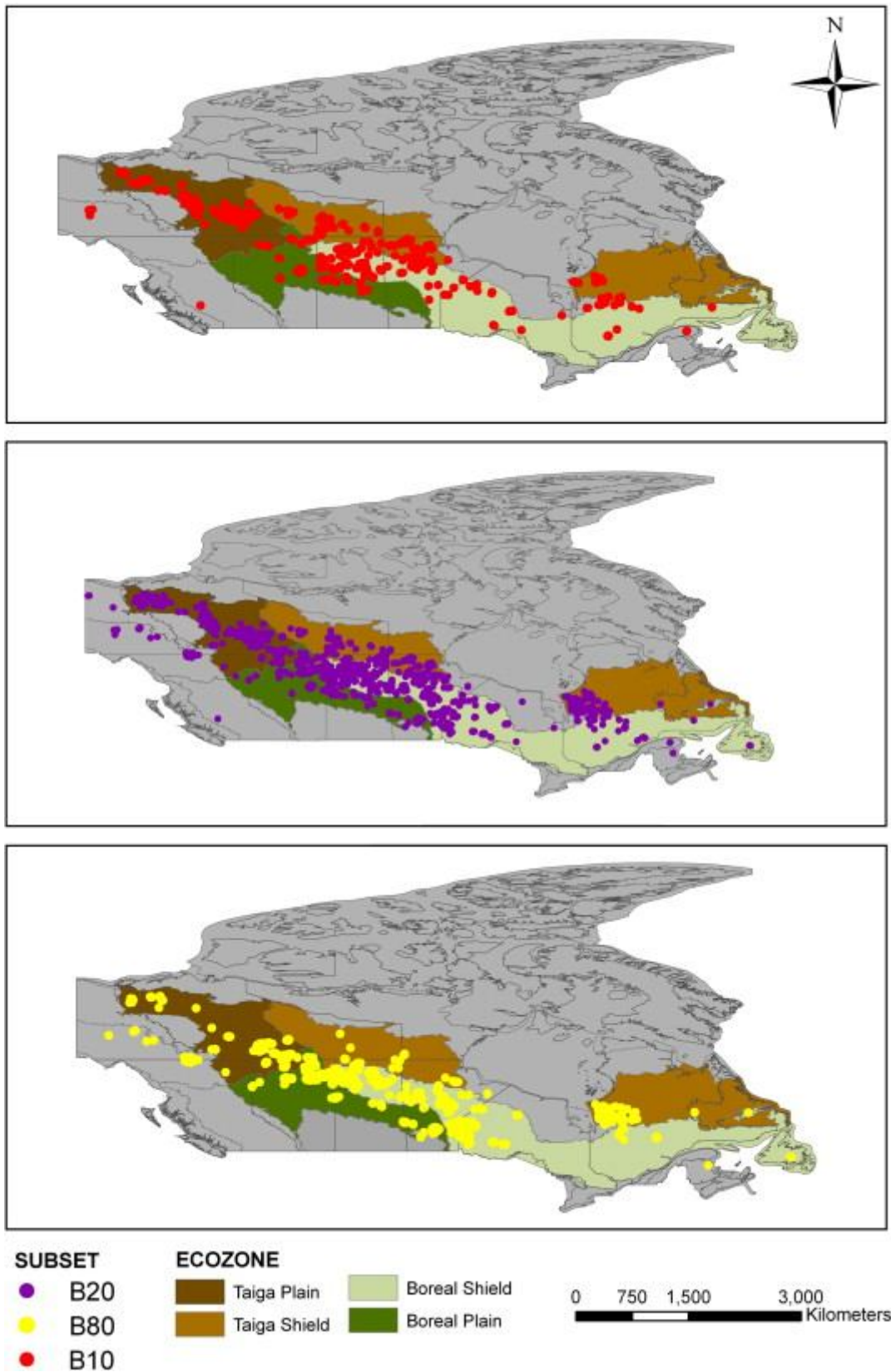
A LAI növekedésével mindezen változások nyomon követhetőek. A tűz terjedése a növényfajától is függ, ezért abból, hogy a területek hogyan égnék meg, következtetni lehet belőle a növények milyenségére, ez pedig visszautal az üvegházhatás által előidézett éghajlati változásokra (Peckham et al., 2008).

Háromfajta égési területet vizsgálnak:

- A B10 jelű terület 1994–2003 időszakban bekövetkezett tüzesetre utal.
- A B20 1980–2003 közötti tüzesetet jelöl.
- A B80 pedig 1980–1989 közöttit.
- Az NB10 azt jelenti, hogy az utóbbi kb. 10 évben nem volt tüzeset a térségben.
- Az NB20 azt, hogy az utóbbi 20 évben sem.
- A NB80 pedig hogy a 80-as években nem volt.

A leégett területeket a 3. ábrán mutatjuk be. Ezen területek 96%-a az ábrán négy színnel jelölt tartományba esik, ezért csak ezekben a térségekben vizsgáljuk az eseményeket (Peckham et al., 2008):

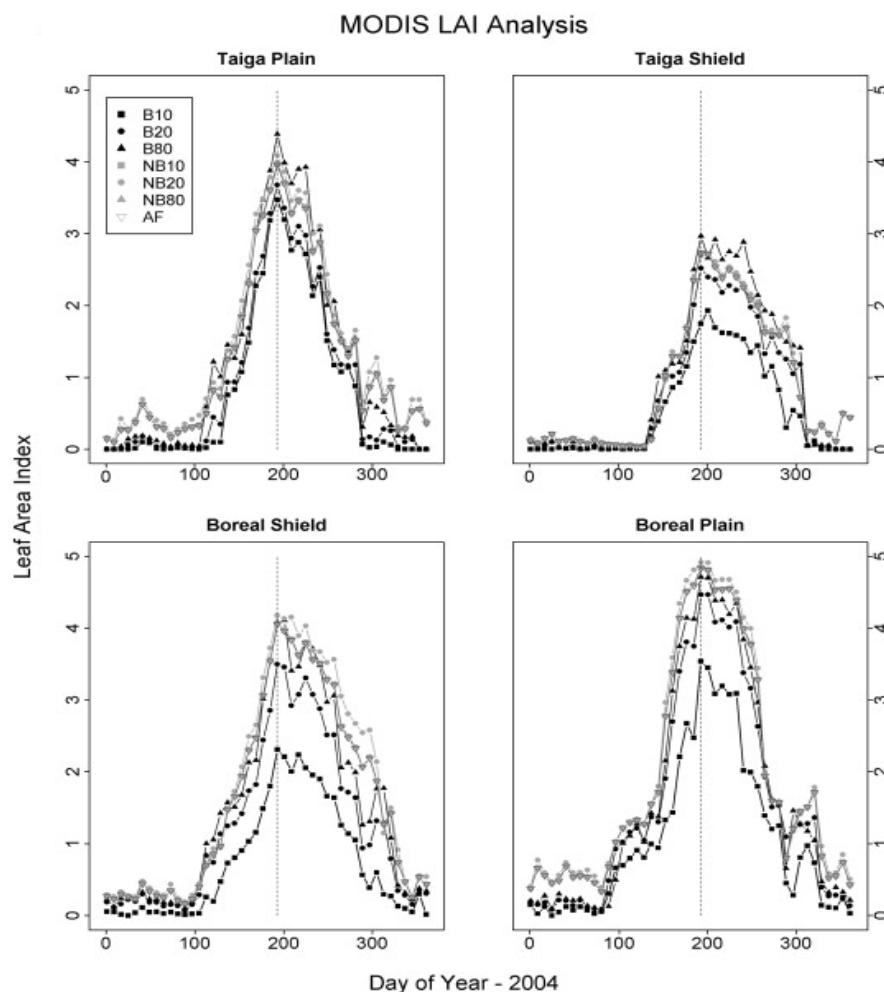
- Taiga Shield:
Boreális tűlevelű erdő borítja.
Évi átlagos csapadék: 400–800 mm, átlaghőmérséklet: $-5^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$
- Taiga Plain:
Boreális tűlevelű erdő borítja.
Évi átlagos csapadék: 200–500 mm, átlaghőmérséklet: $-10^{\circ}\text{C} - -1^{\circ}\text{C}$
- Boreal Shield:
Boreális tűlevelű erdők, lombhullató erdők (pl.: nyárfa, nyírfa)
Évi átlagos csapadék: 400–1000 mm, átlaghőmérséklet: $-4^{\circ}\text{C} - 5,5^{\circ}\text{C}$
- Boreal Plain:
Boreális tűlevelű erdők, lombhullató erdők (pl.: nyárfa, nyírfa)
Évi átlagos csapadék: 300–625 mm, átlaghőmérséklet: $-2^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}$



3. ábra: A vizsgált területek és az ismert égési területek Kanada térképén.
 Forrás: Peckham et al., 2008

Azért fontos így részekre bontva vizsgálni a tüzeseteket, mert a terület és a LAI helyreállása időt vesz igénybe, és így követhető ennek a mértéke. Tűz esetén a LAI lecsökken, és átlagosan 15–20 év alatt regenerálódik az eredeti állapot (bozótos-bokros területeken csak 1–3 év, de az óriásfenyők birodalmában akár 70 év is lehet). A LAI eredmények alapján átlagosan 8 nappal később zöldülnek a növények egy, a vizsgált adatsorban lévő égési területen. Normális esetben a vegetáció mértéke már közvetlenül a hóolvadás időszakában növekedni kezd, leégett erdő esetén viszont még napokig, akár hetekig csökken.

A rendszerben a MODIS adatokon kívül AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) műholdas adatok alapján is dolgoznak, ami a vegetációs indexet (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) képes figyelni. 1978 óta működik az AVHRR (Huh et al., 1981, http://www.agiweb.org/pubs/globalgis/AVHRR/avhrr_sensor.html) és a korábbi négyhez képest jelenleg 5 sávós, széles spektrális tartományt képes vizsgálni. Az éves LAI mérési eredményeket szemlélteti a 4. ábra a 2004-es évre az év napjainak a függvényében.



4. ábra: LAI értékek Kanada vizsgált területein.
 Forrás: Peckham et al., 2008

5. Levélfelületi index modellek

5.1. A modellekről általánosan

A LAI modellek lényege, hogy egy időszakra utólag, vagy akár előre is meghatározzák a levélfelületi index értékét. Erre a célra különböző parametrizációs eljárásokat, analitikai módszereket alkalmaznak. Meg kell ismerni, hogy egy adott területen a LAI megváltozása milyen változóktól függ a legnagyobb mértékben (korreláció vizsgálatok), és hogy milyen ismert bemeneti adatok alapján kapjuk vissza kimenetként a LAI-t (Lambert et al., 1999).

A modellek levélfelületi index mérési adatsorok ismerete nélkül is működniük kell. Ez nem azt jelenti, hogy a modell készítésekor nem használnak LAI adatsorokat: ilyet nyilvánvalóan kötelező használni a modell kalibrálásához és validálásához. Erre azért van szükség, mert a modellekben nem lehet számolni minden LAI-t befolyásoló, akár véletlenszerű változással (például fűnyírás, fakivágás, hirtelen virágzás) és állapothatározóval. A LAI modellezésére használt képletek, függvények nem levezetések eredményeképpen jöttek létre, hanem empirikus úton. A modell, mint minden modell, mindig a valóság leegyszerűsítése. Alapvető probléma a modellekkel, hogy még a legpontosabb modellek is csak egy konkrét pontban, egy konkrét növényzeti típus esetén működnek. Általában valamilyen homogénnek tekinthető (például gyepek, gabona) növényzetre készítik el a modellt, mert ennek a változását a legkönnyebb mérni is és megbecsülni is. Viszont a modellek még itt sem feltétlenül pontosak (Lambert et al., 1999; Breuer et al., 2003; Nussbaum et al., 2003).

Másik alapvető probléma, hogy nincs elég mérési adatsor, amivel kalibrálni illetve validálni lehetne a modellt. Ezen kívül szintén gondot jelent, hogy a modellek nem képesek az időben sem egyenletes képet alkotni a LAI-ról. Gyakran csak rövidebb időszakokra lehet velük LAI-t becsülni. Sokszor működik egy adott modell egy teljes év minden napjára is, de minden egyéb meteorológiai változótól és antropogén tevékenységtől függetlenül minden egyes évre ugyanazt az eredményt adja (Nussbaum et al., 2003). Optimális esetben egy olyan pontos modellre lenne szükségünk, ami az év minden napjára megbecsüli a LAI-t egy területen.

A következő alfejezetek két LAI modell leírását tartalmazzák, részletesen elemezve azok működését, szemléltetve előnyeit és hátrányait.

5.2. Nussbaum modellje gabonára

Ez a modell a gabona levélfelületi indexének a becslésére ad meg képletet az év napjának függvényében (Nussbaum et al., 2003) Svájc területére.

A modell először a tengerszint feletti magasság alapján meghatározza Svájc területén a gabona kicsírázásának a napját az évben egy empirikus függvény segítségével:

$$\text{Emergence DOY} = 87,5 + 0,02688 \text{ Elevation}, \quad (5)$$

ahol Elevation a tengerszint feletti magasság méterben, míg Emergence DOY (day of year) a kicsírázás napját adja meg az éven belül.

A gabona LAI-ja (LAI_{wheat}) az év napjának és a kicsírázás napjának függvényében számítható:

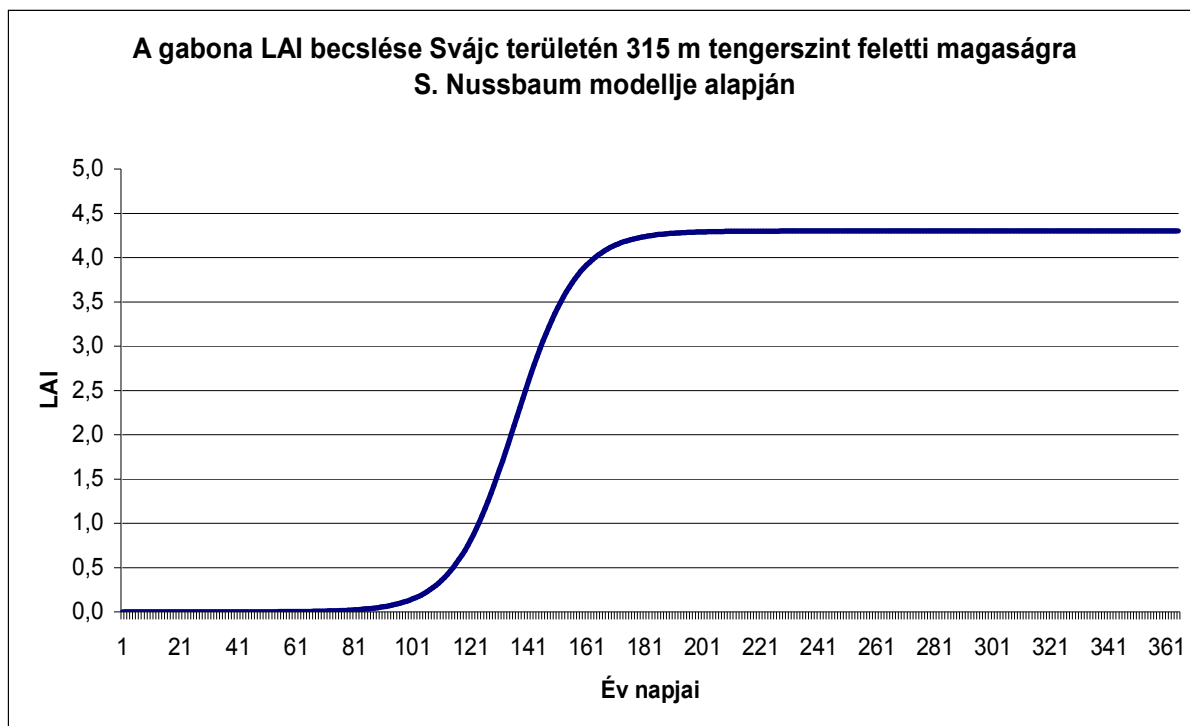
$$LAI_{\text{wheat}} = LAI_{\text{max}} - LAI_{\text{max}} / (0,09457 (\text{DOY} - \text{Emergence DOY} - 40,49)) \quad (6)$$

ahol LAI_{wheat} a gabona levélfelületi index értéke, LAI_{max} a gabona maximális levélfelületi index értéke, míg DOY (day of year) megmondja, hogy az év hányadik napjától van szó.

A függvénybe az argumentumokon kívül bemeneti adatként meg kell adni, hogy az év hányadik napján érdekel minket a LAI, és hogy mekkora a gabona maximális LAI-ja (LAI_{max}) az adott térségben (Nussbaum et al., 2003).

Az 5. ábrán bemutatott függvény alapján látható a Nussbaum modell legnagyobb hibája, nevezetesen hogy csak kb. az év feléig működik. Nem képes számolni azzal, hogy a gabonát akkor learatják, valamint nem számol tél közeledtével beálló vegetáció pusztulással. Ezért a modell csak a növény fejlődési szakaszában alkalmazható.

A modell legnagyobb előnye ugyanakkor, hogy csak viszonylag kevés információra van szükségünk a futtatásához.



5. ábra: Nussbaum gabona LAI modelljének futtatása.
Nussbaum et al., 2003 alapján

5.3. Rosset és Lambert modellje gyepre

Rosset és Lambert (1999) modelljében bemeneti adatként nem csak konstansokat, hanem egy függvényt is meg kell adnunk; ez a függvény felhasználja a vizsgált helyszínen lévő napi átlaghőmérsékleti adatokat. Azért pont az átlaghőmérsékletet, mert a LAI változása a leginkább ezzel korrelál (Lambert et al., 1999). A modell alapegyenlete a következő:

$$LAI_{grass} = 0,017 \sum T_n \quad (7)$$

ahol LAI_{grass} a fű levélfelületi index értéke az adott napon, $\sum T_n$ a napi átlaghőmérsékletek összege, míg 0,017 a meredekségi szorzó (helytől függ az értéke).

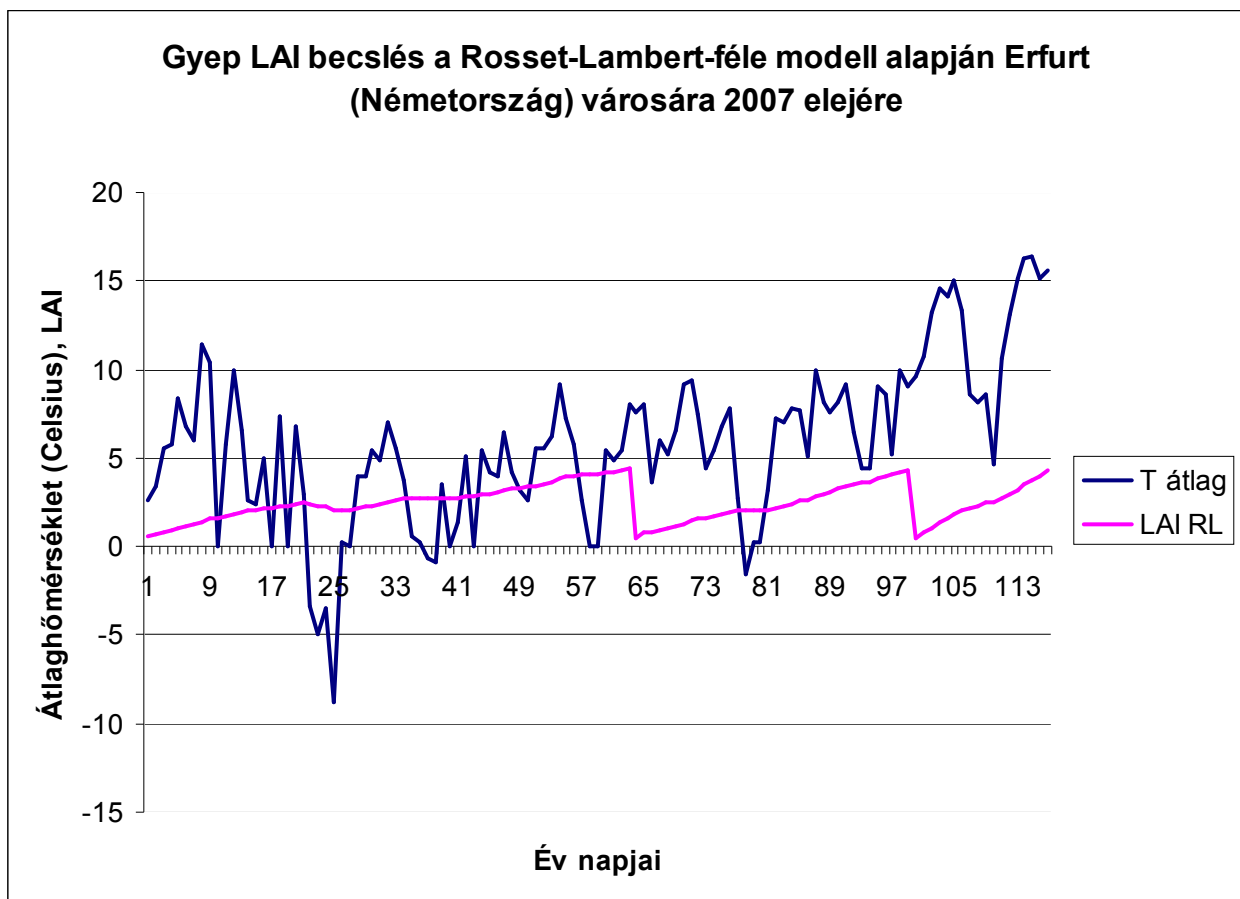
Az itt szereplő képlet esetén a napi átlaghőmérsékletek összegzését mindig az utolsó fűnyírás óta (a közvetlen nyírás utáni LAI ismert), vagy ha van mért adatunk, az utolsó ismert LAI érték óta eltelt napokra vonatkoztatva kell végrehajtani (Lambert et al., 1999).

A meredekségi szorzó attól függ, hogy milyen pontban (területen) akarjuk meghatározni a LAI értékét a modell segítségével. Értéke a pontra jellemző állandó, és úgy határozzák meg, hogy melyik illeszkedik a legjobban a lehetőleg naponta mért LAI adatsorra. A fent található érték (0,017) öt francia területen található mérőhelyre jellemző érték kiátlagolása alapján

képződött. Minden esetben körülbelül egy hónapos referencia időszakot vizsgáltak meg, tavaszi vegetáció produktivitás hirtelen növekedésének kezdetétől addig a pillanatig, amíg a LAI értéke eléri a 4-et, ezért a modell használata is tavaszi időszakra ajánlott (Lambert et al., 1999).

A 6. ábra Erfurt városára (Németország) az ECA&D (European Climate Assessment & Dataset) adatbázisból (<http://eca.knmi.nl>) letöltött valós átlaghőmérséklet adatsorra épülve határoz meg levélfelületi indexet.

Mért LAI adatsor híján a 0,017-es francia területre jellemző értéket használtam meredekségi szorzóként a képletben. Úgy futtattam a modellt, hogy az év első napjától induljon 0,5-ös LAI értékről, majd 4,5-öt elérve a fű LAI értéke essen le 0,5-re, mintha a fűvet lenyírták volna. Ezáltal a modell egyfajta érzékenységét szemléltetem.



6. ábra: Modellfuttatási eredmények Rosset és Lambert gyep LAI modellével. Lambert et al., 1999 alapján

A 6. ábrán jól látszik, hogy a LAI nem lineárisan változik, hanem a hőmérséklet függvényében. A feltételezett fűnyírás miatt létrejövő szakaszok szemléltetik, hogy mint a valóságban, a fű a nyári meleghez közeledvén egyre gyorsabban nő, télen viszont nagyon lassan.

Ennek a modellnek egyik legnagyobb hibája (bár a szerzők megjegyzik, hogy használata tavaszi időszakra ajánlott), hogy nyírás nélkül még tavasszal is valószínűtlenül magas értéket venne fel egy idő után a fű, csak egy bizonyos szintig (körülbelül 5-6-os LAI értékig) lenne használható. Nyári időszakra azért sem lenne alkalmas, mert a fű nyáron másképp nő, valamint nyáron a nagy melegben akár ki is éghet.

További nagy hibája, hogy csak mérési adatsorok ismerete esetén alkalmazhatjuk egy konkrét pontban, mert a pontos meredekségi szorzó értéket csak így határozhatjuk meg.

Ha nem ismerjük, milyen időközönként nyírják a fűvet, vagy legelik le az állatok, nem is tudjuk alkalmazni olyan területekre, ahol emberi beavatkozások történnek.

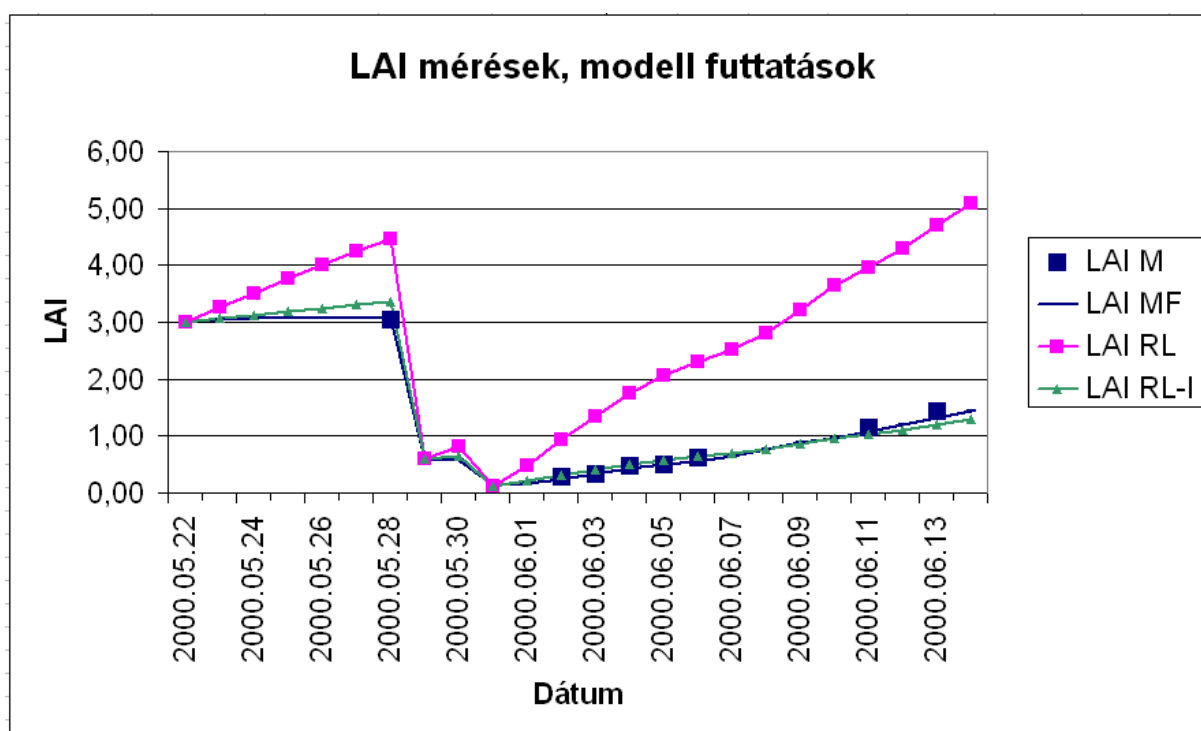
6. Saját modellfuttatások

6.1. Modell illesztése Braunschweig-i mérési adatokra

Braunschweig városában, Németországban 2000 tavaszának végén és a nyarának elején nemzetközi kutatócsoportok meteorológiai méréseket és megfigyeléseket végeztek. A mérésen az ELTE Meteorológiai Tanszék dolgozói is részt vettek (Sutton et al., 2001).

A program keretében többek között mérték a hagyományosan mérendő meteorológiai változókon kívül a levélfelületi indexet is, ami most referenciaként fog szolgálni a modell illesztéséhez.

Az illesztésnél a már ismert Rosset és Lambert (1999) által publikált modellt használtam. A mérési eredményeket és a modellillesztést a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra: LAI mérési adatok és a saját modellfuttatásaim eredményei Braunschweig városára. A rövidítések magyarázatát lásd a szövegben.

Az ábrán a kék színnel jelölt vastag pontok (LAI M) a levélfelületi index mérési eredmények (összesen 8 db mérés), a kék színnel jelölt függvény (LAI MF) pedig a fű naponta mért magasságának és a mérési eredményeknek a függvényében becsült LAI értéke. A lila függvény (LAI RL) az eredeti Rosset- és Lambert-féle modell a francia területen

érvényes adatokkal, a zöld (LAI RL-I) pedig az ezen modell alapján készült illesztés a mérési eredményekhez.

A mért adatsorban 2000. május 29-én és 31-én a hirtelen esések a kaszálásnak, majd a kaszálás után a széna elszállításának köszönhetőek. Mivel ezeket a változásokat a modellek tudják kezelni, a modellek futtatását ezekben a pontokban a mért értékekhez igazítottam. Így a két modell három fő szakaszban futott le: az első május 22-től 28-ig, a második 29-től 31-ig, a harmadik május 31-től június 14-ig.

A modell kalibrálását a meredekségi index megváltoztatásával végeztem. A legjobb egyezést 0,004 esetén kaptam a mért és a modellezett adatsor között (szemben a francia adatsorra vonatkozó 0,017-es értékkel). Ez azt mutatja, hogy eltérő környezetben nagyon nagy különbségek adódhatnak a meredekségi együtthatóban.

A modell a harmadik szakaszon jól láthatóan hasonló tendenciákat mutat, mint a mért adatsor. Az első szakaszban viszont enyhe emelkedést mutat a mért, nagyjából állandó értékkel szemben. Ennek oka valószínűleg az, hogy a fű növekedése a valóságban egy idő után lelassul, sőt bizonyos magasságnál tovább nem is növekszik, amit a modell nem tud kezelni.

A probléma kijavítható volna úgy, hogy nem engednénk meg, hogy a LAI értéke túllépjen egy maximumot. Ez azonban nem folyamatos lassulást, hanem hirtelen törést eredményezne a függvényünkben a LAI maximumának elérésénél.

Ennél jobb volna időben konstans csökkenését feltételezni a meredekségi szorzónak, de az esetben meg a LAI értéke nem állna be a megfelelő maximális szintre végül, mert attól függően, hogy milyen kezdeti LAI értéknél indítanánk el a modell futtatását, más és más maximum LAI értéknél állna be a modell.

A legkézenfekvőbb olyan megoldást választani, ami a meredekségi index megváltozását is a LAI megváltozásaitól teszi függővé. Ha hirtelen nő meg a LAI a maximum közelében, akkor hirtelen csökken le a meredekség, ha viszont lassan, akkor a meredekségi szorzó is lassan csökken. Ezzel a módszerrel a LAI maximuma is pontosan beállítható. Hátránya, hogy a modell működéséhez még egy adatra, a területre jellemző maximális gyep LAI értékére is szükség van. Viszont mind a meredekségi szorzót, mind a maximálisan lehetséges LAI-t csak egyszer kell megbecsülnünk. A következőkben a Rosset–Lambert modell olyan fejlesztéséről lesz szó, ami hosszabb távra is pontosabb eredményt ad az eredeti modellnél.

6.2. A Rosset–Lambert modell fejlesztése

A Rosset–Lambert modell továbbfejlesztéséhez olyan mért LAI adatsorra volt szükség, ami ha nem is napi rendszerességgel, de legalább heti rendszerességgel végzett méréseket tartalmaz hosszabb, akár több hónapos időszakokra. Emellett szükséges volta napi átlaghőmérséklet adatsorára is.

Ezeknek a szempontoknak Hegyhátsálról (Vas megye) származó 2007–2008-as, gyep felett mért adatsorok tettek eleget, így ezekre alkalmaztam a modellt (a mérőhely leírásáról bővebben lásd Barcza et al., 2003). Minden olyan napon, amelyiken LAI mérés készült, hat mérést végeztek különböző, egymáshoz viszonylag közeli helyszínekről. Mivel az adatok szórása még így is viszonylag nagy, ezért az átlagolt értékeket használtam viszonyítási alapként. Továbbá minden egyes napról csak a hegyhátsáli mérőtoronynál mért napi maximum- és minimumhőmérsékleti értékek álltak rendelkezésemre, így az átlaghőmérsékletet ezeknek az átlagából kellett számolnom a modell futtatásához.

Magának a LAI-nak a mérése egy Decagon AccuPAR LP-80 sugárzásmérő készülékkel történt. A műszer a fotoszintetikusan aktív sugárzási tartományban (PAR) képes mérni. A LAI-t a fény elnyeléséből, különböző magassági rétegeken való gyengüléséből a mérésekből közvetlenül számolja egy mikroprocesszor segítségével. A készülék kézzel hordozható (súlya alig haladja meg az 1,2 kg-ot), egy 86,5 cm hosszúságú szondát tartalmaz, amin 80 db PAR sugárzást mérő szonda helyezkedik el, így egyszerre akár több mérés is végezhető a segítségével. A készüléket körülbelül egy-két évente szükséges kalibrálni. A LAI mérésénél a lombzat vagy levélzet alatti és feletti (vagyis szakaszosan vizsgált) PAR sugárzásmennyiségen kívül a készülék figyelembe veszi a nap állását (dátumból, időből és a levelek eloszlásából származtatja) és a levelek szögét is. Több vizsgálat esetén képes kiszámolni a LAI területi átlagát is, valamint a változás karakterisztikáit is képes mutatni a lombzaton vagy levélzeten keresztül. Bővebb leírás a készülékről:

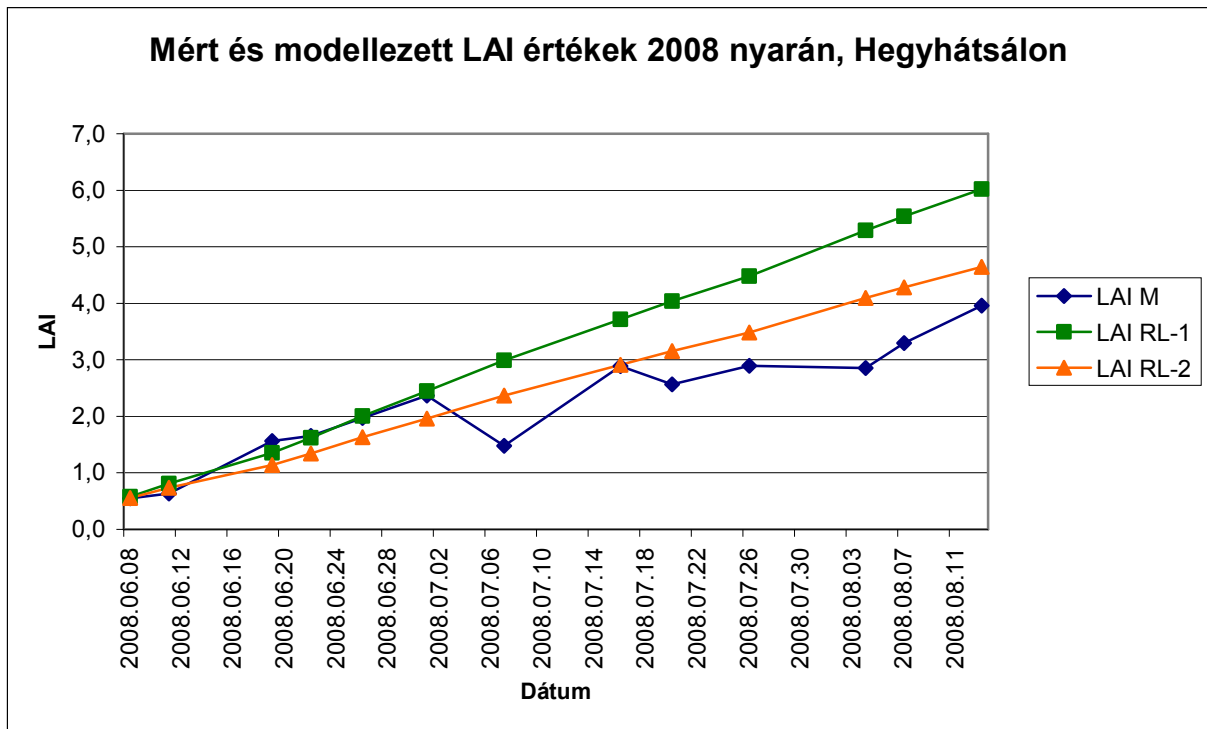
www.decagon.com/literature/manuals/LPman12.pdf

A 8. és 9. ábrán két időszakra ábrázoltam a Hegyhátsál környékén napi hat mérés alapján átlagolt LAI mérési eredményeket (LAI M). Mérés csak azokon a napokon történt, ahol a függvény menetében pontok látszanak. A modell által becsült eredményeket is csak ezekre a napokra rajzoltam fel. Fontos, hogy 2008.08.18-án a helyszínen a fűvet levágták, ezért csökkent le a LAI értéke a 9. ábra elején a 8. ábra végéhez viszonyítva.

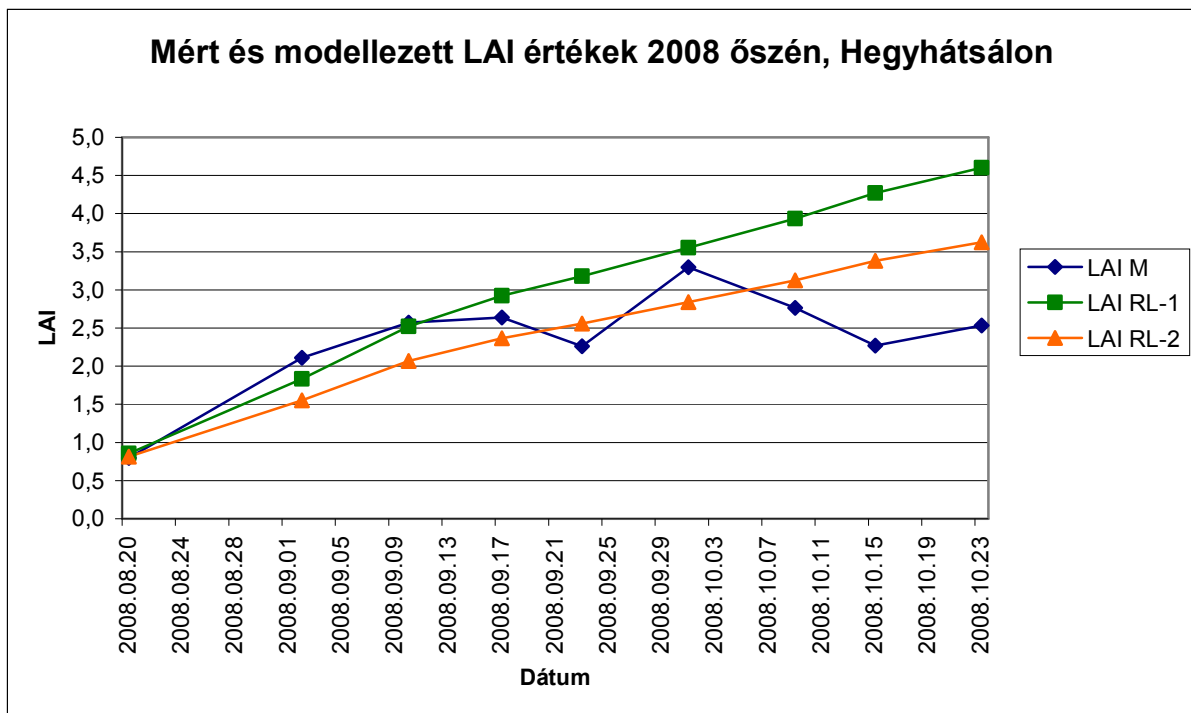
Szintén ábrázoltam a területre kétféle módszerrel illesztett Rosset–Lambert modell (LAI RL-1, LAI RL-2) által becsült eredményeket. Azért illesztettem a modellt két különböző módon, hogy jobban szemléltetni tudjam annak előnyeit és hátrányait.

Mivel szemmel látható, hogy mindkét mért adatsor első körülbelül húsz-harminc napja meredeken növekvő tendenciákat mutat, és csak utána kezd a meredekség hirtelen csökkenni, ezért először úgy illesztettem mindkét esetben az eredeti modellt, hogy az első körülbelül egy hónapos időszakban illeszkedjen rá a kapott függvény a legjobban a mérési eredményekre. Ez az egy hónapos időszak azért is szerencsés, mert az eredeti modellt is (bár ott tavasszal) a növekedés kezdetétől a 4-es LAI eléréséig körülbelül egy hónapos időszakra illesztették. Mivel egy területen a meredekségi szorzó értékát állandónak tekintjük (Lambert et al., 1999), ezért ugyanazt az értéket használtam mindkét ábra esetében. Ha az illesztésnek ezt a módját választom, a meredekségi szorzó optimális értéke 0,004. A Rosset–Lambert modellnek ezt a futtatása a LAI RL-1 jelű függvény mutatja az ábrákon.

Másodszorra úgy illesztettem a modellt, hogy a teljes időszakot vettem figyelembe. Ez az eredeti modellhez hasonlóan szintén körülbelül a 4-es LAI elérését jelenti (a 9. ábrán csak 3-as LAI), de az ehhez szükséges időszak mindkét esetben (8. és 9. ábra) már nagyjából két hónap volt. Mivel az eredeti modellt is a 4-es LAI eléréséig futtatták, így most ezekre a teljes időszakokra kapott meredekségi szorzó értéket tekintem referenciának. Ennek az értéke az előzőnél kisebb: 0,003. Ezt jelöli a LAI RL-2.



8. ábra: A eredeti Rosset–Lambert modell eredménye Hegyhátsál területére nyári időszakra. A rövidítések magyarázatát lásd a szövegben.



9. ábra: Az eredeti Rosset–Lambert modell eredménye Hegyhátsál területére nyárvégi és őszi időszakra. A rövidítések magyarázatát lásd a szövegben.

A mért eredményekből (LAI M) szemmel látható, hogy a pozitív hőmérsékleti átlagokat „figyelmen kívül hagyva” a LAI értéke egy idő után 4 körüli maximumnál stabilizálódik. A LAI növekvés mértéke jóval nagyobb kis LAI esetén, itt viszonylag követi az eredeti modellt. Becsléseim alapján körülbelül a növekvés mértéke a 2 körüli LAI értéket meghaladva kezd folyamatosan csökkenni a területen, vagyis körülbelül a LAI maximumának a felénél. A csökkenés pontos mértéke nehezen becsülhető, ezért a LAI-val arányosnak tekintetem.

Az ábrákon látható függvényekben a modell (LAI F) 4-et nem meghaladható LAI maximummal számol, valamint a maximum felét meghaladó LAI esetén (vagyis 2-es LAI felett) kezd csökkenni a növekvés mértéke. Ennek az értéke a LAI értékétől, nem pedig az időtől függ.

Az eredeti modellben az előző napi LAI értékhez mindig a következő napi átlaghőmérséklet és a meredekségi szorzó szorzatával változik. A maximális LAI feléig eljutva itt is így van. Ezután a csökkenés olyan módon történik, hogy a következő napi átlaghőmérséklet a meredekségi szorzón kívül még egy számmal megszorozódik. Ennek az értékét megkapjuk, ha a maximális LAI-ból az adott napi LAI-t kivonjuk, és elosztjuk a maximális LAI felével. Így függvényünkben a maximális LAI körüli értéknél a változás is csak nagyon kicsi lehet, viszont a maximális LAI értékének a felénél még mindig hasonló a változás, mint régen volt, összességében a csökkenés folyamatos. A meredekségi szorzó többszörös próbálkozás után 0,004 értéknél illeszkedett legjobban a területre.

Mindez képletekkel kifejezve a könnyebb megértés érdekében alább olvasható.

Az eredeti Rosset–Lambert modell a (7)-es képlet alapján:

$$LAI_{n+1} = LAI_n + m T_n \quad (8)$$

ahol LAI_n az n-edik nap LAI-ja, T_n az n-edik nap átlaghőmérséklete és m a meredekségi szorzó (jelen esetben 0,004).

Továbbfejlesztett modell:

A maximális LAI feléig:

$$LAI_{n+1} = LAI_n + m T_n$$

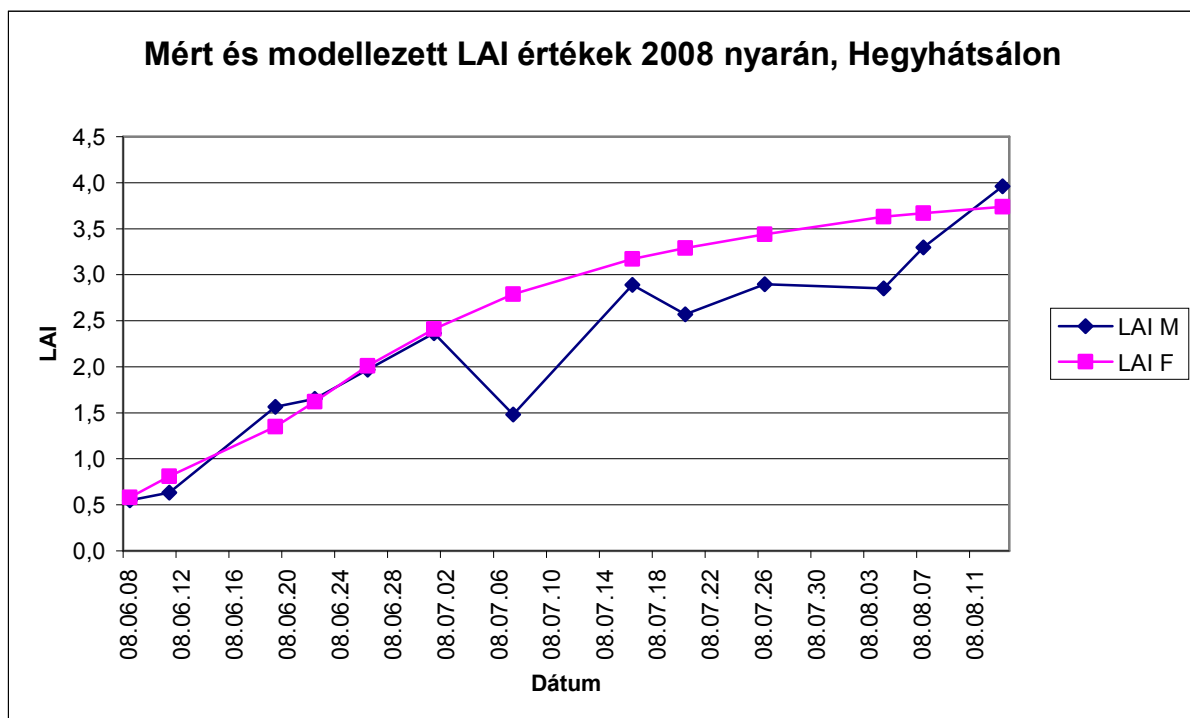
A maximális LAI értékének a felét meghaladva:

$$LAI_{n+1} = LAI_n + s m T_n \quad (9)$$

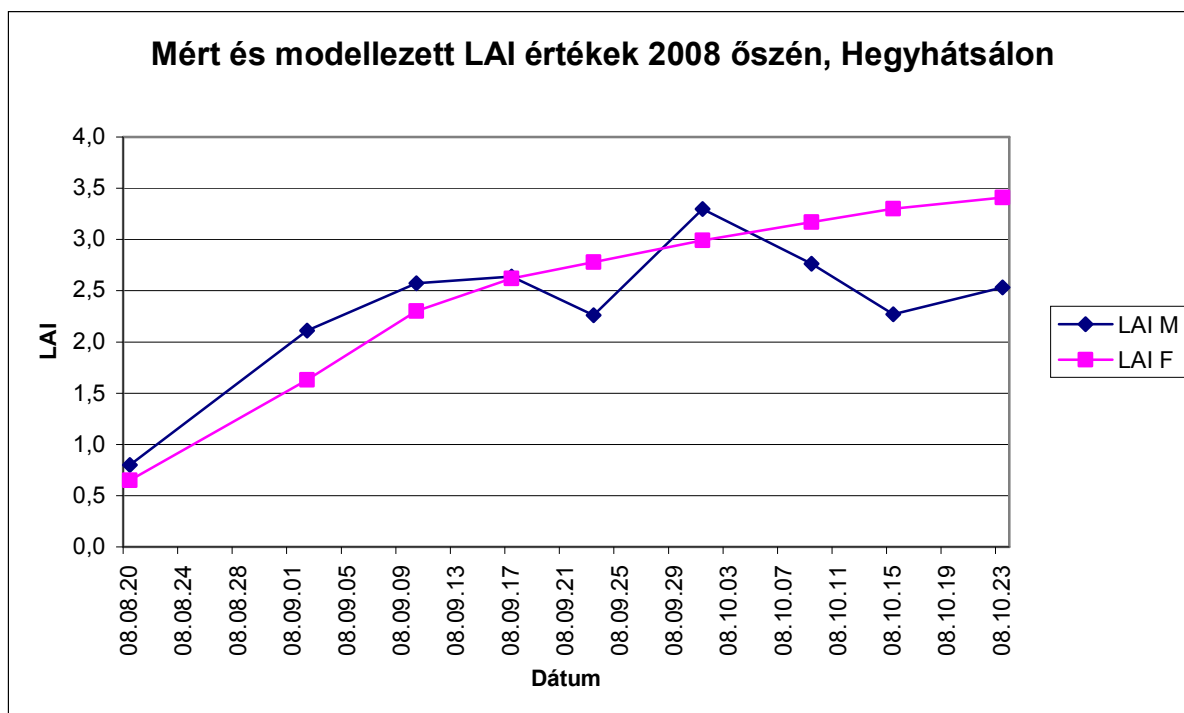
$$\text{ahol } s = (LAI_{\max} - LAI_n) / (LAI_{\max} / 2)$$

Az egyenletekben LAI_{\max} a területen maximálisan lehetséges LAI.

A 10. és 11. ábrán a 8. és 9. ábrán már bemutatott két időszakra ábrázoltam a Hegyhátsál környéki átlagolt LAI mérési eredményeket (LAI M), valamint az előbbieken definiált továbbfejlesztett Rosset–Lambert modell futtatását (LAI F).



10. ábra: A továbbfejlesztett Rosset–Lambert modell eredménye Hegyhátsál területére, nyári időszakra. A rövidítések magyarázatát lásd a szövegben.



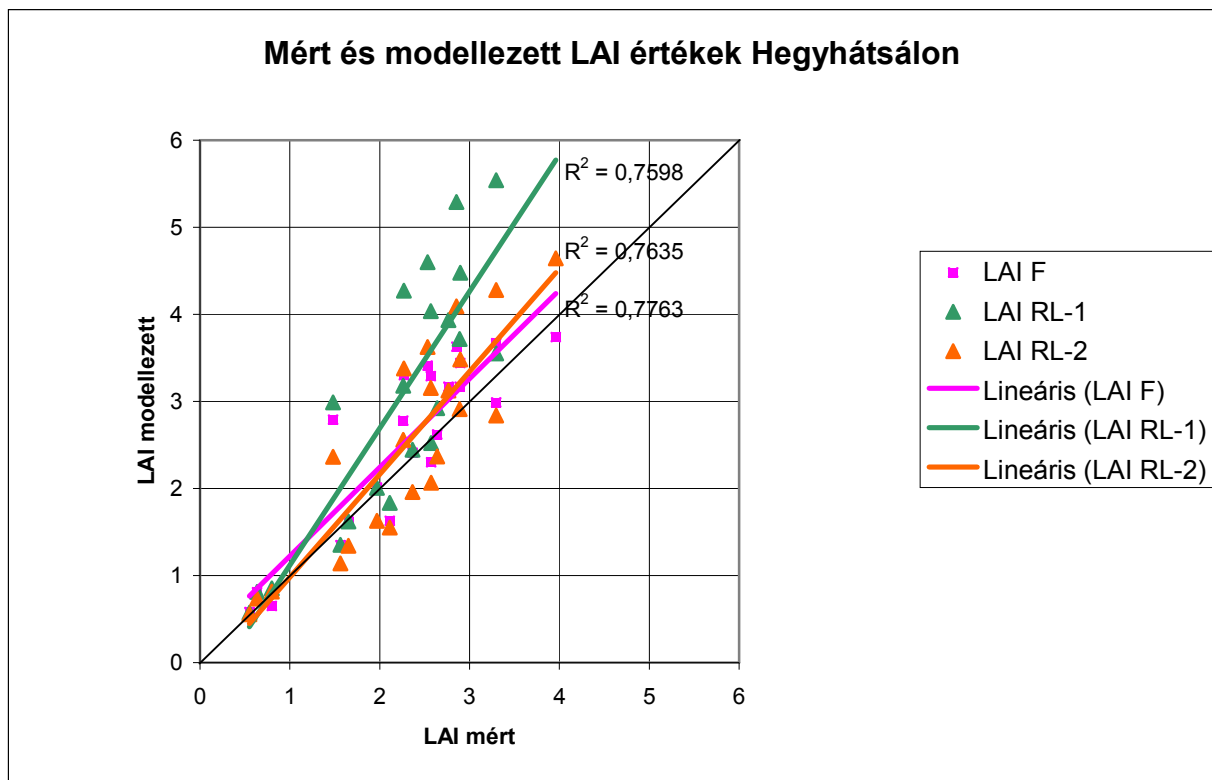
11. ábra: A továbbfejlesztett Rosset–Lambert modell eredménye Hegyhátsál területére nyárvégi és őszi időszakra. A rövidítések magyarázatát lásd a szövegben.

Látható az ábrákon, hogy a továbbfejlesztett modell jobban reprezentálja a levélfelületi index valós megváltozásait. Az eredeti Rosset–Lambert modell ugyanezen 0,004-es meredekségi szorzó érték használatával (vagyis a LAI RL-1) ilyen hosszúságú időszakokra nagyobb LAI értéket adna az időszakok végére.

Jelen esetben 2008. augusztus 13-án pontosan 6-os LAI értéket becsülne ez a modell (LAI RL-1), ami több mint 2-vel nagyobb a mért (LAI M) és a fejlesztett modell (LAI F) alapján készült érték. 2008. október 23-án pedig a lehetséges 4-es LAI maximumot bár kevéssel meghaladó 4,6-ot becsülne, ami viszont még így is eggyel nagyobb, mint az új modellünk becslése, és 2-vel nagyobb, mint a mért érték. Ezek az értékek leolvashatók a 8., 9., 10. és 11. ábrákról is a LAI M, a LAI RL-1 és a LAI F függvények alapján.

De nem csak az időszakok végén való eltérések fontosak. Hogy a modellek átlagosan mennyire térnek el a mérési eredményektől, mennyire követik a mérések tendenciáját, még jobban szemlélteti a 12. ábra.

A 12. ábra egy szkatterplot, mely az összes méréshez (mindkét időszak, melyen a modellek futottak) tartozó modellezett eredményeket, valamint az eredményekre illesztett lineáris trendeket mutatja.



12. ábra: A mérésekhez tartozó modellezett eredmények Hegyhátsál területén. A rövidítések magyarázatát lásd a szövegben.

A 12. ábrán látható, hogy a kétféle módon futtatott eredeti Rosset–Lambert modellnél (LAI RL-1, LAI RL-2) az általam továbbfejlesztett modell (LAI F) jobban rásimul a 45 fokos egyenesre, vagyis ez követi a legjobban a mért tendenciákat. Viszont jelen esetben még ez a modell is szisztematikusan felül becsüli az eredeti értékeket.

Összességében a fejlesztett modell eredményei biztatóak. A jövőben egyre jobban képesek leszünk a LAI-t meteorológiai vagy egyéb környezeti változók segítségével modellezni. Azonban megjegyzendő, hogy az itt leírt fejlesztett modell alkalmazása egyelőre nem ajánlott más területre: még a terület karakterisztikáinak pontos megismerésével is csak többszörös tesztelés után lehetséges! Jelen dolgozat célja az eredeti és a továbbfejlesztett modell gondolatmenetének bemutatása volt.

7. Összefoglalás

A növényzet szerepe a felszín-légkör rendszerben kiemelt jelentőségű. Ennek a tulajdonságait az egyik legáltalánosabban jellemző fenometria mérték a levélfelületi index.

Szakedolgozatomban bemutattam a levélfelületi index (LAI) fogalmát, valamint rámutattam, hogy a LAI a környezeti tényezőkkel és meteorológiai állapotjelzőkkel szoros kapcsolatban álló komplex változó. Ez előny, mert ezért rendkívül széles a felhasználási lehetőségei, de hátrány is, mert megismerése annál bonyolultabb.

Dolgozatomban részletesen ismertettem a levélfelületi index mérési eljárásait. Ezek az eljárások rendkívül bonyolultak, drágák vagy hosszadalmasak, valamint gyakran még a legnagyobb körültekintéssel végezve is pontatlanok. Ennél azonban nagyobb probléma, hogy világviszonylatban a mérések száma kevés, a mérések eloszlása egyenetlen, az index mérését és modellezését kevés nemzetközi egyezmény szabályozza.

A dolgozatomban következő fejezeteiben a levélfelületi indexet becsülő modellekkel foglalkoztam. Az indexet bonyolult modellezni, ezért a modellek nem levezetés eredményeként adódnak, hanem olyan empirikus képletekből, amelyek a legjobban lefedik a valóságot. Ezért az index modellezését minden esetben mérési adatsorokhoz kell kalibrálni és validálni, ha van rá mód.

Részletesen két modell működését mutattam be. Nussbaum modellje a gabona LAI-jának becslésére ad meg függvényt (Nussbaum et al., 2003), Rosset és Lambert modellje pedig a gyep növekedését vizsgálja (Lambert et al., 1999). Mivel ez utóbbi modell az előbbivel ellentétben nem pusztán az év napjainak, hanem meteorológiai változó függvényében határoz meg LAI-t, rövid időtávon pontosabb, hosszú időszakra viszont pontatlanabb becslést ad.

A következőkben sikeresen továbbfejlesztettem a Rosset–Lambert modellt, hogy hosszabb időszakokra is viszonylag pontos becslést lehessen vele végezni. A modell számításait Hegyhátsál területén gyep felett végzett mérésekkel vettem össze.

További terveim közé tartozik, hogy még több paraméter (pl.: csapadékmennyiség, talajnedvesség) segítségével tovább pontosítom a modelleket. A továbbfejlesztés alapvető célja, hogy Magyarország területére minél részletesebb tér- és időbeli bontásban meghatározható legyen a levélfelületi index értéke. Ehhez jó alapul szolgál a különböző mérési módszerek és modellezési eljárások megismerése.

Köszönetnyilvánítás

Kiemelten hálás vagyok a témavezetőimnek, dr. Mészáros Róbertnek és dr. Barcza Zoltánnak, akiknek a támogatása és odaadó munkája nélkül nem születhetett volna meg a szakdolgozatom.

Köszönöm Tóth Istvánnak (Nádasd) a hegyhátsági LAI mérésekben való közreműködését.

Irodalomjegyzék

Barcza, Z., Haszpra, L., Kondo, H., Saigusa, N., Yamamoto, S. and Bartholy, J., 2003: Carbon exchange of grass in Hungary. *Tellus*, 55B: 187–196.

Barnes, W. L., Xiong, X., Salomonson, V. V., 2003: Status of Terra MODIS and Aqua MODIS. *Advances in Space Research* 32, 2099–2106.

Borak, J. S., Jasinski, M. F., 2008: Effective interpolation of incomplete satellite-derived leaf-area index time series for the continental United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, in press. doi:10.1016/j.agrformet.2008.08.017

Breuer, L., Eckhardt, K., Frede, H-G., 2003: Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling* 169, 237–293.

Huh, O. K., DiRosa, D., 1981: Analysis and interpretation of TIROS-N AVHRR infrared imagery, Western Gulf of Mexico. *Remote Sensing of Environment* 11. 371–383.

Huzsvai, L., Rajkai, K., Szász, G., 2004: Az agroökológia modellezéstechnikája. Debrecen, Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum

Lambert, R., Peeters, A., Toussaint, B., 1999: LAI evolution of a perennial ryegrass crop estimated from the sum of temperatures in spring time. *Agricultural and Forest Meteorology* 97, 1–8.

Mészáros, R., Zsély, I.Gy., Szinyei, D., Vincze, Cs., Lagzi, I., 2009: Sensitivity analysis of an ozone deposition model. *Atmospheric Environment* 43. 663–672.

Nussbaum, S., Remund, J., Rihm, B., Mieglist, K., Gurtzl J., Fuhrer, J., 2003: High-resolution spatial analysis of stomatal ozone uptake in arable crops and pastures. *Environment International* 29, 385–392.

Peckham, S. D., Ahl, D. E., Serbin, S. P., Gower, S. T., 2008: Fire-induced changes in green-up and leaf maturity of the Canadian boreal forest. *Remote Sensing of Environment* 112, 3594–3603.

Scurlock, J. M. O., Asner, G. P., Gower, S. T., 2001: Worldwide Historical Estimates and Bibliography of Leaf Area Index, 1932–2000. ORNL Technical Memorandum TM-2001/268, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.

Sutton, M. A., Milford, C., Nemitz, E., Theobald, M. R., Hargreaves, K. J., Fowler, D., Schjørring, J. K., Mattsson, M. E., Husted, S., Erisman, J. W., Otjes, R., Hensen, A., Mosquera, J., de Bulk, P., Jongejon, P., Mols, H., Cellier, P., Loubet, B., David, M., Roche, R., Durand, B., Laville, P., Neftel, A., Blatter, A., Hermann, B., Jones, S. K., Riedo, M., Horváth, L., Weidinger, T., Mészáros, R., Raso, J., Rajkai, K., Gallagher, M., Dorsey, J., Flynn, M., Lehmann, B., Burkhardt, J., Dämmgen, U., 2000: Braunschweig Integrated Experiment – Intermediate Data. CD version.

Ujvári, F., Járó, Z., Ujvariné, J. É., 2001: A biomassza mennyisége, megoszlása és változatossága a nemzetközi lucfenyő származási kísérletben (IUFRO 1964/68). Erdészeti kutatások 2000-2001, 90. 49–64.

Unger, J., Sümegey, Z., 2002: Környezeti klimatológia (Szeged, JATEPress) 56–78. oldal.

Unger, J., Gál, T., Kovács, P., 2006: A városi felszín és hősziget kapcsolata Szegeden. Légekör, 51.3. 2–8

A dolgozatban felhasznált Internetes hivatkozások listája

<http://www.decagon.com/literature/manuals/LPman12.pdf>

<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/directbrod/index.php>

<http://eca.knmi.nl>

http://www.agiweb.org/pubs/globalgis/AVHRR/avhrr_sensor.html

http://en.wikipedia.org/wiki/Hemispherical_photography