

Szakmai Zárójelentés

„A földhasználat változásainak hatása az éghajlat múltbeli alakulására” című 48958 számú OTKA-kutatásról (2005 X. – 2009. IX.)

ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás első szakaszában lezártuk azt az egyszerű sugárzási modellezésen alapuló számítás-sorozatot, amely során megyénként értékeltük ki a Tisza magyarországi síkvidéki vízgyűjtő területével nagyjából egybeeső hat megyére végzett számításokat. Megállapítottuk, hogy az 50 év (1951-2000) alatt átlagosan $0,6 \text{ Wm}^{-2}$ -es csökkenés detektálható a légkör külső határán visszavert rövidhullámú sugárzási energiában. Más szóval, a felszín-légkör rendszerben ennyivel több energia marad benn, azaz ennyivel többet kell (magasabb hőmérsékleten) hosszuhullámú kisugárzásként, vagy más formában leadnia a talaj-légkör oszlopnak. Ez a változás a hat Kelet-magyarországi megyében $0,3$ és $1,0 \text{ Wm}^{-2}$ közé esik, ám a becslést nehezíti, hogy az 1970-es évtized elején 2-2 megye között terület-átadás történt, ami kimutatható ugrásokat okozott a számított energiamérlegben is.

A második szakaszban a földhasználat 1959 és 1999 közötti változásának hatásait immár az egész országra vizsgáltuk a KSH megyei földhasználati adatainak megyén belüli véletlenszerű hozzárendelésével. Az OMSZ akkori operatív viharjelzésében is használt MM5 modellt $6 \times 6 \text{ km}$ -es felbontással kiválasztott napokon futattuk úgy, hogy a hazánk időjárását jellemző 13 Péczy-féle makroszinoptikus típus mindegyikére történjen egy-egy 60 órás futtatás. Ily módon az MM5 integrálását 13 kezdeti időpontból 3-3 földhasználati eloszlással (1959, 1979 és 1999) kombinálva, összesen 39 darab, egyenként 60 órás futtatást végeztünk. A megváltozásokat ezután az egyes típusoknak az április-szeptemberi tenyészidőszakban 1961-1990 közötti relatív gyakoriságával súlyoztuk, ún. rétegzett mintavételt megvalósítva. Az egyes cirkulációs típusokban a megváltozások előjel és nagyságrend szerint azonosak voltak. A korábbi, energetikai számításokon alapuló várakozásunknak megfelelően, a földhasználat változásai az MM5-modell determinisztikus egyenletein keresztül is módosították a hőmérsékleti, relatív nedvesség- és a csapadék-viszonyok értékeit. A legnagyobb összesített különbség a *legmagasabb nappali hőmérséklet*nél mutatkozott. Az 1959 és 1999 közötti hazai földhasználat-változások okozta melegedés júniusban és júliusban $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$, a nyári félév átlagában pedig $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, de egyes időjárási helyzetekben és egyes pontokban meghaladta a $0,5$ Celsius fokot. Az éjszakai „hatás-szünet” miatt, a *napi középhőmérsékletben* ez a változás már csak $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Az ország keleti felén, ahol a mezőgazdasági művelés nagyobb arányú volt, mint a Dunántúlon, a melegedés is nagyobb. A *relatív nedvességben* (a tényleges és a telítési párányomás arányában) kialakult, $-0,7 \text{ } \%$ -os csökkenés főleg a hőmérséklet emelkedésével magyarázható. E megállapítást a hőmérséklet- és a nedvességváltozások hasonló területi eloszlása is alátámasztja. Más szóval, a földhasználat a párolgáson keresztül kevésbé befolyásolta az alsó rétegek nedveség-készletét, amint ezt a korábbi, egyszerűbb számítások is előrevetítették. Összességében a lehullott *csapadék* területi átlagaiban a földhasználat nem okozott lényegi változást, egy-egy csapadékgazdag időjárási helyzetben lokálisan kialakult néhányszor tíz mm-es csapadék többlet, illetve hiány is. Ez arra utal, hogy a felszínt borító növényzet típusának bizonyos instabil légköri állapotok kialakulásakor jelentős hatása lehet a *csapadék intenzitására* is.

Munkánk harmadik szakaszában is az MM5 modellt alkalmaztuk, de néhány ponton lényegesen előre lépve: (i.) Számításaink a felhasználható térképi információkhoz igazodva, immár száz évet, a teljes XX. századot fogták át. (ii.) Tényleges és részletes területi bemenő adatokat használtunk a korábbi véletlenszerű térbeli hozzárendelés eloszlás helyett. (iii.) Az MM5 modell felbontását $6 \times 6 \text{ km}$ -ről $2,5 \times 2,5 \text{ km}$ -re sűrítettük. A tényleges földhasználat érdekében négyféle forrásból a kutatáshoz kapcsolódva kellett a felszínhasználati térképeket megszerkeszteni, majd az MM5 rácshálózatára vonatkoztatni. Ennek kapcsán szemrevételeztük a földhasználat 150 éves (1853-2009) országos megoszlásának arányait is. Ez segít elhelyezni a számításaink első és a második fázisában (XX. század második fele) illetve a harmadik fázisban (XX. század eleje és vége között) regisztrált változásokat abban a nagy ívű tendenciában, aminek a lényege a szántóterület kezdeti gyors növekedése a gyepek és a művelésből kivont területek rovására, majd e folyamat megfordulását a XX. század második felében. A harmadik fázis számításai megerősítették, hogy a földhasználat XX. század eleje és vége közötti változásai is befolyásolták kisebb mértékben a hőmérséklet és a légnedvesség alakulását. A napi középhőmérséklet országos átlagban $0,14 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal emelkedett, a harmatpont – főként a melegedés hatására – $0,17 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal csökkent. A konkrét földhasználati térképezésnek köszönhetően lokálisan kimutatható volt a főváros erőteljes terjeszkedésének illetve a Tisza-tó új vízfelületének a hatása a hőmérsékletre és a harmatpontra. Budapest délkeleti részein száz év alatt egyes helyeken $1 \text{ }^\circ\text{C}$ -ot meghaladó mértékben emelkedett a levegő napi középhőmérséklete. A csapadék országos átlagára és területi eloszlására a földhasználat XX. századi különbségei nem voltak jelentős hatással, ám a részletesebb és pontosabb számítások is megerősítették, hogy egy-egy nagy csapadéku szinoptikus helyzetben a földhasználat különbségei lokálisan több tíz mm-rel módosíthatják a két nap alatt lehulló csapadék mennyiségét.

A fentiek alapján megállapíthatjuk, hogy más éghajlati kényszerek mellett a felszínhasználat változásait is érdemes számításba venni a múlt éghajlatának magyarázatánál és valószínűleg a jövőre vonatkozó forgatókönyvekben is. Emellett rámutattunk, hogy a nowcasting-rendszer fejlesztésénél is érdemes a felszínborítottságot pontosabban figyelembe venni, elsősorban a konvektív felhő- és csapadékképződés előrejelzése érdekében.

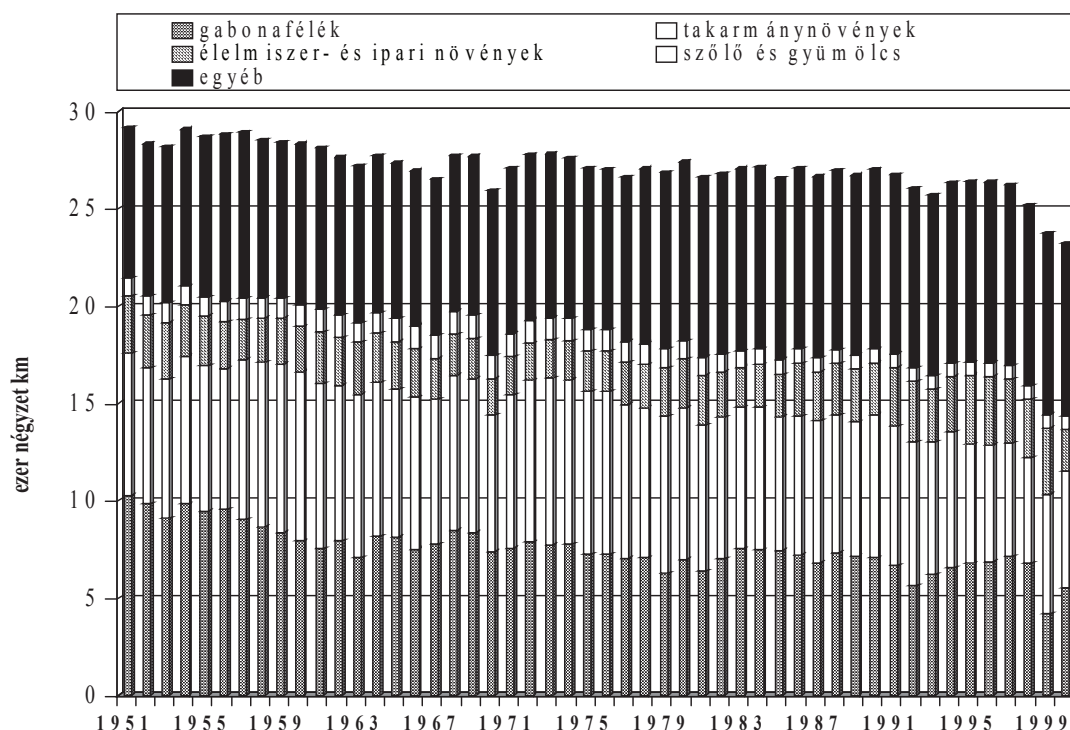
KUTATÁSI EREDMÉNYEK

1. Energetikai előtanulmányok

1.1 A földhasználat változásainak parametrizálása

A magyarországi földhasználat változásait a Statisztikai Hivatal nyilvántartja, megyei bontásban közreadja, illetve – megrendelésre – ún. község-soros bontásban is hozzáférhetővé teszi. Először egy vertikális sugárzásátviteli modell keretei között csupán hat alföldi megyére vizsgáltunk. Ez az első számítás végigkísérte az 1951 és 2000 közé eső évek tenyészidőszakait, és megállapítja, hogy a változások közel egyenletesek voltak.

Elsőként tehát a Központi Statisztikai Hivatal évkönyvei (1951-2000), valamint a Történeti Statisztikai Kiadványok (1971-1979) alapján meghatároztuk a különböző mezőgazdasági növények részesedését a teljes vetésterületből, valamint minden egyes megye teljes területéből az 1951-2000 közötti időszakra vonatkozóan (1.1 ábra). A vizsgált térség hat megyét foglal magába: Borsod-Abaúj-Zemplén, Szabolcs-Szatmár-Bereg, Hajdú-Bihar, Jász-Nagykun-Szolnok, Békés és Csongrád megyét. Ezek alapján a mezőgazdasági növények részesedése a megye teljes területéből Hajdú-Biharban a legkisebb (0,71), míg Csongrád és Jász-Nagykun-Szolnok megyékben a legnagyobb (0,80). Következésképp, a kiválasztott régió (35 700 km²) teljes területének mintegy háromnegyed része tartozik a vizsgálat körébe. A mezőgazdasági célú földhasználat a vizsgált régióban határozott, csökkenő trendet mutat. Ezt a változást a számításokban úgy korrigáltuk, hogy minden becslést csak az ismert földhasználatú területekre vonatkoztattunk. Így az alábbi energetikai számításokban megművelt terület változása nem játszik szerepet.



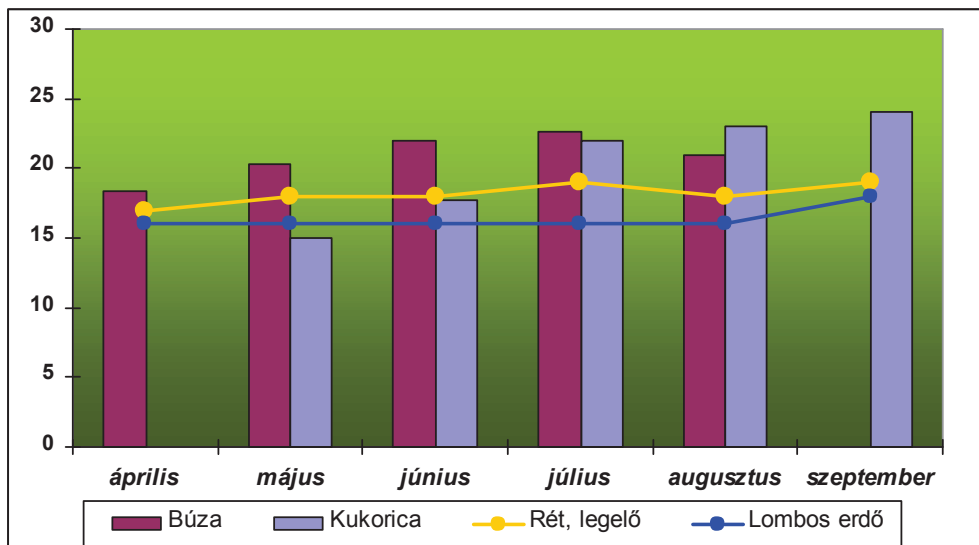
1.1 ábra Az egyes növénycsoportok összes vetésterülete a vizsgált 6 megyében, Kelet-Magyarországon, 1951-2000

Az egyes csoportokat az alábbi növények alkották:

- kalászosok: búza, rozs, árpa, rizs;
- takarmánynövények: kukorica, lucerna, vöröshere, silókukorica, zab, takarmányrépa;
- élelmiszer- és ipari növények: cukorrépa, dohány, napraforgó, burgonya, rostkender;
- szőlő és gyümölcs;
- valamint egyéb: erdő és gyep.

Természetesen a továbbiakban nem az 5 növénycsoporttal dolgoztunk, hanem külön-külön az egyes növényekkel, amikre az albedó-értékekhez jutottunk. Megjegyezzük, hogy korábban a földhasználatnak a párolgásra gyakorolt hatásokat is vizsgáltuk (Mika et al., 2001), azonban e változás a teljes területre jelentéktelennek bizonyult, ezért az OTKA-kutatás első, energetikai szakaszában e hatással nem foglalkoztunk.

A földhasználat változásának figyelembe vétele a felszínalbedóban. Egy terület energiamérlegének alakulásában meghatározó a felszínalbedó szerepe. Hazánk albedó-térképeinek elkészítése során Dávid (1985) szintetizálta a hosszabb-rövidebb mérésekre támaszkodó, növényenként és fenofázisonként megállapított szakirodalmi felszínalbedó értékeket. A fenofázisok időbeli különbségei alapján hazánk területe — minden növényre — termőkörzetekre osztható. E körzetekre Dávid a szakirodalmi adatokból növényenként és dekádanként egy-egy éghajlatilag átlagos felszínalbedót állapított meg. E megfontolások után 19 növénytípusra állt rendelkezésünkre meggyenként százalékos arányban Kelet-Magyarország illetve az ország teljes felszínborítottsága.



1.2. ábra Néhány fontos növény fényvisszaverő képessége (albedója) havonta, a beérkező sugárzás %-ában. (A legtöbb felszín albedóját tíznaponta, változó értékkel vettük figyelembe.)

A földhasználat ingadozásának hatását valamely A mennyiségre – jelen szakaszban a felszínalbedóra – a következőképpen vettük számításba. Tegyük fel, hogy egy adott t évben minden figyelembe vett növény (területhasznosítási mód) a vizsgált térségben $T^i(t)$ területet foglal el. A továbbiakban az albedó meghatározásánál mindig az eredeti, összevonás nélküli felszínfajták területeivel súlyozunk. Az összes ilyen terület ekkor

$$T_m(t) = \sum_i T^i(t), \quad i = 1, 2, \dots \quad (7)$$

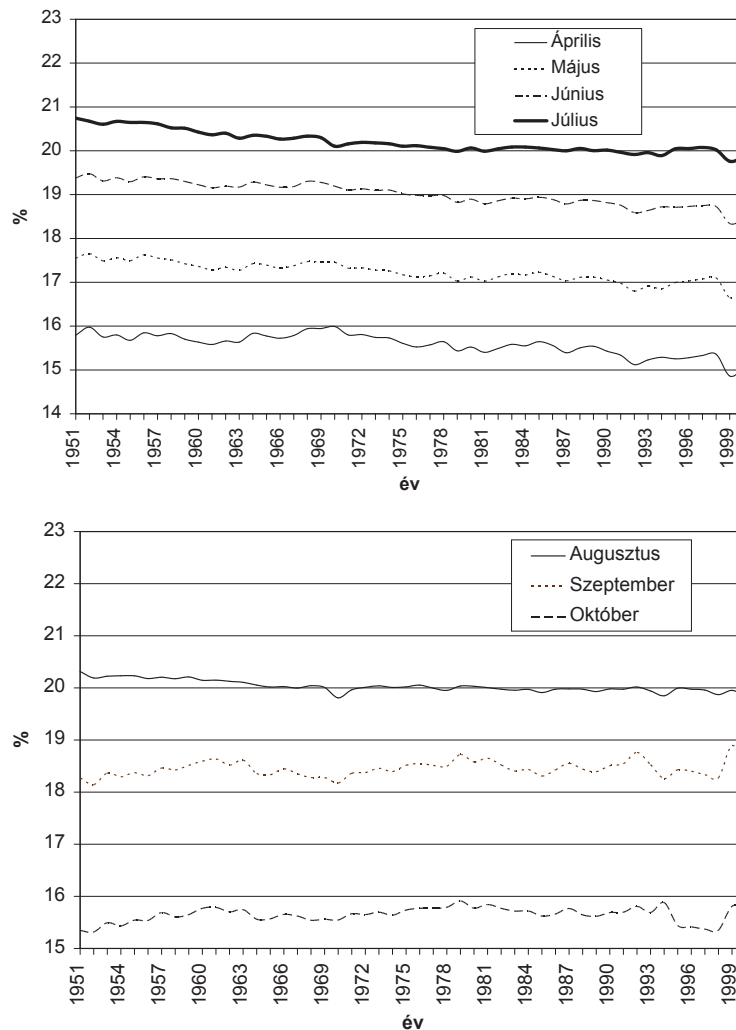
A következőkben keressük valamilyen $A(t)$ mennyiség területi átlagos ingadozását, amely minden figyelembe vett területhasználatnál más $A_i(t)$ értéket vehet fel. Képezzük ezután az $A(t)$ -nek a figyelembe vett $T_m(t)$ területre vonatkozó átlagát, $A_m(t)$ -t., amely így az

$$A_m(t) = \frac{1}{T_m(t)} \sum_i T^i(t) \cdot A_i(t), \quad i = 1, 2, \dots \quad (8)$$

alakot ölti. Minden további számításunknak ez a területekkel súlyozott átlag lesz az alapja.

1.2 A földhasználat változásainak hatása a felszín-légkör rendszer energiamérlegére

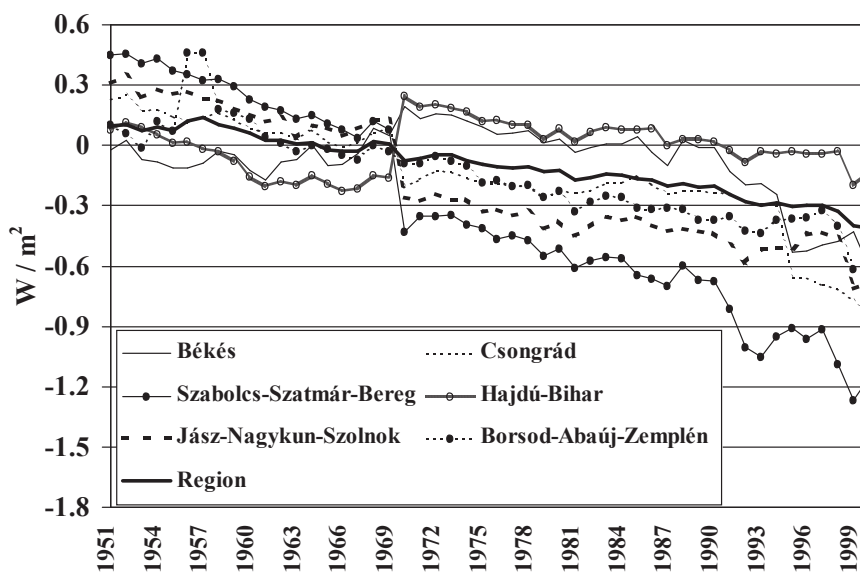
Elsőként a felszínalbedó változásait mutatja meg a hat alföldi megye terének átlagában. Csak az áprilistól októberig terjedő vegetációs időszakot vizsgáljuk, mivel a növények albedója közötti különbség szinte kizárólag csak ebben az időszakban jelentkezik. Az 1.3 ábra tanúsága szerint a vegetációs periódus első felében a felszínalbedó egyértelműen csökkent, majd augusztusi stagnálás után az utolsó két hónapban csekély emelkedést mutat. Más szóval, az időszak nagyobb részén a viszonylag sötétebb növényállományok részesedése növekedett, amelyek nagyobb zöldtömege általában sűrűbb fedettséget biztosít.



1.3 ábra A felszínalbedó havi értékeinek alakulása a vizsgált térségben (1951-1999)
a.) április-július; b.) augusztus-október.

A földhasználat változásai következtében az energiamérlegben előidézett változást nemcsak a felszínre, hanem a teljes felszín-légkör rendszerre is meghatároztuk. Ebből a célból egy ún. sugárzási-konvektív modellel végzett korábbi számítást használtunk föl (Mika et al., 1992). A rendszeralbedónak a felszínalbedótól való függése - hazánk légköri feltételei mellett - csaknem tökéletes lineáris kapcsolatot mutat. A rendszeralbedó e számítások szerint a 0,40 - 0,45 közé eső szorzóval követi felszínalbedó változásait a vizsgált hét hónapban.

A felszínalbedó változásainak hatása végső soron a rendszeralbedót is módosítja, ami végülis növeli a felszín-légkör rendszer energia-mérlegét, más szóval csökkenti az azt elhagyó rövidhullámú energiát. Az 1.4 ábra tanúsága szerint a hat megye átlagában mintegy $0,6 \text{ Wm}^{-2}$. Ezen belül azonban jelentős eltérések is tapasztalhatók (megyénként $0,3 - 1,0 \text{ Wm}^{-2}$ között), bár ennek pontos megállapítását nehezíti az egyes területek 1970 után történt adminisztratív átszervezése. (Az átszervezés a térség egészének energiaháztartását természetesen nem érintette.)



1.4 ábra A földhasználat dokumentált változásainak hatása a felszín-légkör rendszer rövidhullámú energia-visszaverésére áprilistól októberig. A zérus szint megválasztása az értékek 1851-1980 közötti átlaga alapján történt. A negatív érték nagyobb energia-bevételt jelent! (Az 1970 körüli ugrások egyes térségek megyék közötti átcsoportosításának a következményei.)

Ez az 50 év alatt végbement változás jelentős energia-tétel és összemérhető több olyan változással, amit ugyancsak a sugárzási modellben számítottunk ki és ennek nyomán az 1.1 táblázatban mutatunk be. A különféle hatásokat összevetve azt látjuk, hogy a felszínhatás hasonló nagyságrendű, mint néhány olyan kényszer, illetve kisebb változásokhoz tartozó visszacsatolás, ami a vizsgált fél évszázadban tendenciaként vagy epizód-szerűen ugyancsak fellépett.

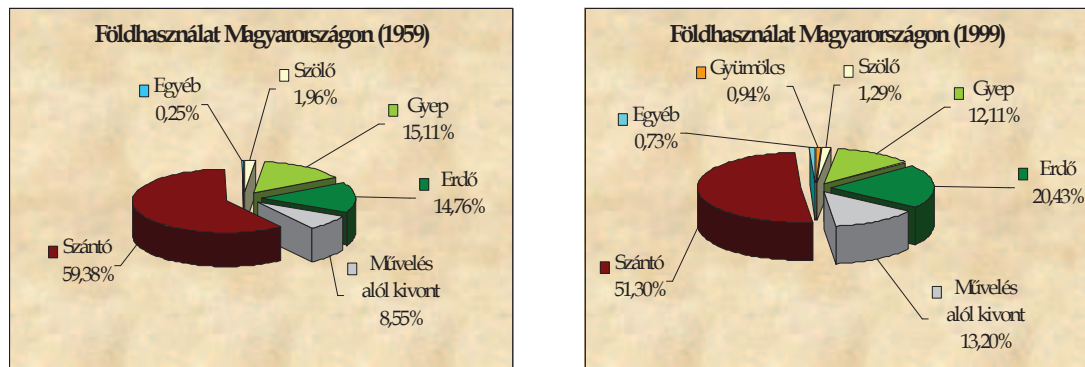
1.1 táblázat A földhasználatban kelet-Magyarországon kimutatott változások felszín-légkör rendszer sugárzási mérlegre gyakorolt hatásának összehasonlítása néhány éghajlati kényszerrel illetve visszacsatolás hatásával a nyári félévben. (A viszonyított értékek: Mika et al., 1993)

Éghajlati kényszer illetve visszacsatolás (nyári félév)	Változás (W/m^{-2})
Változások a földhasználatban 1951-2000	+ 0,6
CO ₂ -koncentráció változása: 330→370 ppm	+ 0,71
Napállandó ingadozás: $\pm 0,1 \%$	$\pm 0,24$
Sűrű vulkáni felhő a sztratoszférában: $\Delta\tau = 0,1$	- 0,42
0,2 K helyi melegedés hatása a hosszuhullámú mérlegre	- 0,54

2. Megyei adatsorokból számított földhasználati változások éghajlati hatásai

2.1 A földhasználat bemenő adatai az MM5 modell számára

Míg a fenti, sugárzási számításhoz elegendő volt a megyénkénti felbontás, sőt azt is integráltuk a modell területére, addig az MM5 modell 6 km-es bontásban igényli a bemenő adatokat. A megyei bontásban kapott eltéréseket ezért véletlenszerűen szétkentük a rácpontok között úgy, hogy az adott megyéhez tartozó rácpontok átlagában teljesüljenek a megyei arányok. Mivel az ország területének kb. negyven százalékát kitevő, s a nagyarányú mezőgazdasági művelési arány mellett az átlagosnál gyorsabban változó kelet-magyarországi területekre a földhasználati arányok viszonylag sima időbeli lefutást mutatnak, az MM5-ben csak három évre, 1959-re, 1979-re és 1999-re kiszámított földhasználati arányokkal számoltunk. Ezen arányok az első és utolsó időszak összevetésében a 2.1 ábrán láthatók.



2.1 ábra A magyarországi földhasználat alaptípusainak, valamint ezek bővebb részletezésének összehasonlítása (1959, 1999)

2.2 Az MM5 mezoléptékű dinamikai modell felhasználása

A felszínhasználat esetleges hatásait az NCAR és a Pennsylvania Egyetem által kifejlesztett, MM5 modell 6x6 km-es felbontású változatában vizsgáltuk. Az MM5 széles körben használt, kiterjedt nemzetközi referenciával rendelkező modell, tudományos és előrejelzési szempontból egyaránt kipróbált programcsomag. Lehetőség van az ún. nesting technika alkalmazására: a modell tartományán belül eltérő rácsfelbontású és fizikájú beskatulyázott modellek futtatására. E lehetőséggel élve tudnánk az eredetileg 6 km-es rácshálózatot fizikai értelemben is sűríteni. Az ebben a fejezetben bemutatott számításokhoz a futtatások még 6x6 km-es felbontásban történtek, a sűrítést a következő, 3. fejezetben leírt számításoknál valósítottuk meg.

Az MM5 nem hidrosztatikus közelítésben, pillanatnyi légköri állapotok szimulálására képes finom térbeli felbontással. Az adott esetben a feladathoz illeszkedést a rácpontoknak a vonal menti forráshoz igazodó megválasztásával biztosítottuk. A számításokhoz az oldalsó határfeltételeket az ECMWF valós mezők analízisén alapuló operatív háttér-modellje szolgáltatta. A modell alsó határfeltételei eleve interaktívak: talaj almodell is van, a vízhőmérséklet pedig előírható. A modell az OTKA-kutatás időszakának nagy részében az OMSZ nowcasting rendszerének is alapvető eszköze volt. A forráskódot az OMSZ 2001-ben adaptálta, és elsősorban a felhőfizikai folyamatok terén továbbfejlesztette. A modell részletes leírása pedig megtalálható, és letölthető az NCAR honlapjáról: www.mmm.ucar.edu/mm5.

A földhasználat változásainak hatását évtizedeken keresztül kellene nyomon követnünk, ám az MM5 – bármely más mezoléptékű modellhez hasonlóan – nem értelmezhető ilyen hosszú időskálán, mert nem tartalmazza a globális éghajlati rendszer azon komponenseit, elsősorban a világoceánt, amelyek a lassú folyamatokat valójában kormányozzák. A futtatást konkrét kiinduló állapotokból tudjuk végrehajtani, korlátozott (esetünkben 60 órás) integrálási idővel.

Ahhoz, hogy ezek a futások együttesen reprezentálják az éghajlatunkat, ún. rétegzett mintavételt kellett alkalmaznunk, ahol a rétegzés alapja a Péczely-féle makroszinoptikus típusrendszer volt (Péczely, 1983). Az eljárás lényege tehát, hogy mind a 13 Péczely-típusra elvégezzük a számítást (itt egyszeresen, a következő fejezet számításainál már két különböző kiindulási helyzetből) és a kapott eredményeket súlyozzuk az illető cirkulációs típus tényleges gyakoriságával az április-október időszakban. A kiválasztásnál ügyeltünk arra, hogy olyan napokat válasszunk, amelyet legalább két napon át ugyanaz a Péczely-típus határoz meg. Az így kiválasztott napok kezdeti állapotaival és oldalsó határfeltételeivel futtattuk a modellt. A futási időpontok kiválasztásának fontos szempontja volt még az is, hogy az időpontok az áprilistól szeptemberig tartó (a növényzet változásaival egybeeső) időszakot fedjék le egyenletesen.

Ily módon az MM5 integrálását 13 kezdeti időpontból 3-3 földhasználati eloszlással kombinálva, e kísérletsorozatban 39 darab, egyenként 60 órás futtatást végeztünk. Az MM5-öt olyan kiválasztott napok tényleges kezdeti állapotával és oldalsó határfeltételeivel futtattuk a fenti három alsó határfeltétel mellett, amelyek mindegyike legalább két napon át egyértelműen reprezentál egy-egy Péczely-féle makroszinoptikus típust. A kezdeti állapotot az ECMWF előrejelző modellje számára készült operatív analízisből-, a peremfeltételeket pedig az ECMWF modell Bracknell-i futása nyomán társítottuk az MM5 modellhez.

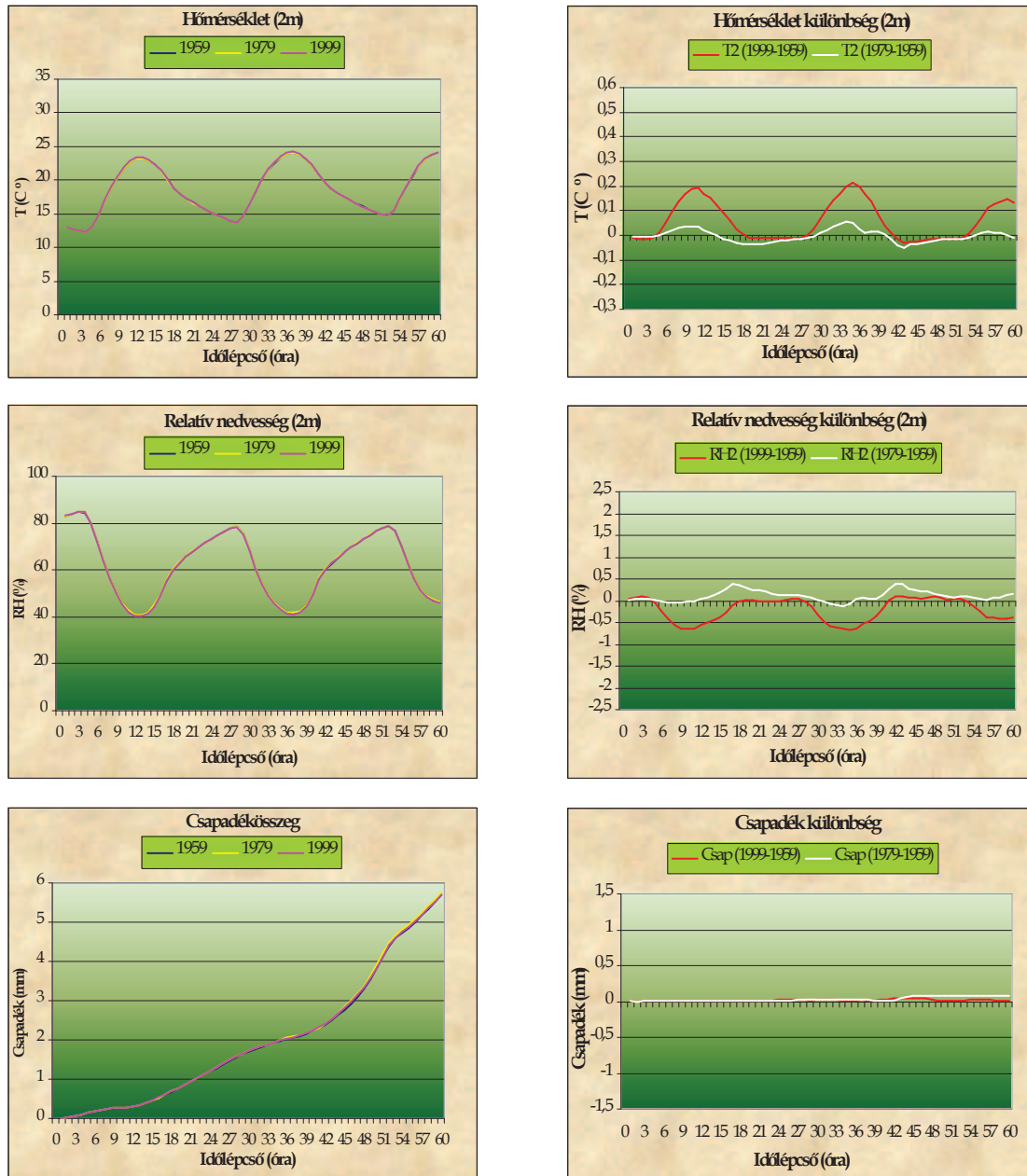
Az eredmények országos összegzését három meteorológiai változóra, a hőmérsékletre, a relatív nedvességre és a csapadékra végeztük el. Megvizsgáltuk emellett az országrészek közötti területi eltéréseket, azaz összevetettük egymással a Dunántúlon és az Alföldön szimulált változások mértékét is.

2.3 Eredmények

A korábbi, energetikai számításoknak megfelelően, a földhasználat változásai az MM5 modell determinisztikus egyenletei szerint is módosították az adott időszak éghajlatát. A legszámottevőbb hőmérséklet különbség (2.2 ábra) a napi maximum hőmérsékletben jelentkezik. Ekkor a vizsgált 1959 és 1999 között végbement magyarországi földhasználat változás által kiváltott melegedés egyes időjárási helyzetekben és egyes pontokban meghaladta a 0,5 Celsius fokot, de a vizsgált április-szeptember időszak országos éghajlati átlagában is kimutatható 0,2 Celsius fokos (a napi középhőmérsékletben 0,1 °C-os) hőmérséklet-emelkedés. Az a tapasztalat, hogy a nappali maximumhőmérséklet változott a leginkább, megfelel annak, hogy az albedóhatás energetikailag a legmagasabb napállás mellett a legerősebb.

Nem ilyen egyszerű a hajnali minimumhőmérséklet enyhe csökkenésének magyarázata, ami nem függ össze közvetlenül az albedó alakulásával. E kicsiny változásoknak talán köze lehet a földhasználat-változás hatására bekövetkezett párologtató képesség kismértékű növekedéséhez, amely így több hőt képes elvonni a talaj közeli levegőtől. Az így kiváltott kis mértékű hőmérséklet csökkenés csak éjjel jelenhet meg, ugyanis nappal elnyomja az albedó-csökkenés okozta nagyobb melegedés.

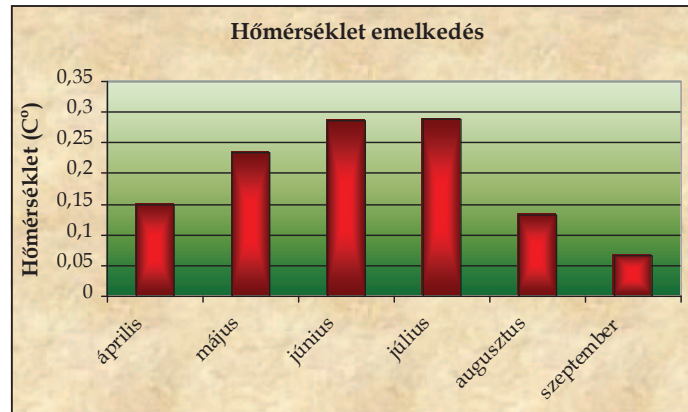
A *relatív nedvesség*ben bekövetkezett csekély, átlagosan 0,7 %-os csökkenés főleg a hőmérséklet emelkedésével magyarázható, amit tükröz e változások területi eloszlása is (l. később). A Magnus-Tetens formulából ugyanis következik, hogy a magasabb hőmérsékletű levegő több nedvességet képes gőz halmazállapotban, telítés nélkül elraktározni, azaz melegebb levegőben – azonos mennyiségű nedvesség esetén – alacsonyabb a relatív nedvesség.



2.2 ábra A 13 helyzet meteorológiai paramétereinek rétegzett mintavétel utáni országos klímaátlaga a vizsgált esztendőkre (1959, 1979, 1999), valamint az 1999-es és 1979-es év eltérése 1959-től; (a 12., 36., 60. óra helyi idő szerint 14 órának felel meg)

Bár összességében a lehullott *csapadék* területi átlagaiban a földhasználat nem okozott lényegi változást, egy-egy csapadékos időjárási helyzetben lokálisan kialakult több 10 mm-es csapadék-eltérés is. Ez arra utal, hogy a növényzet típusának bizonyos instabil légköri állapotok kialakulásakor jelentős hatása lehet a *csapadék intenzitására* is. (lásd szintén később).

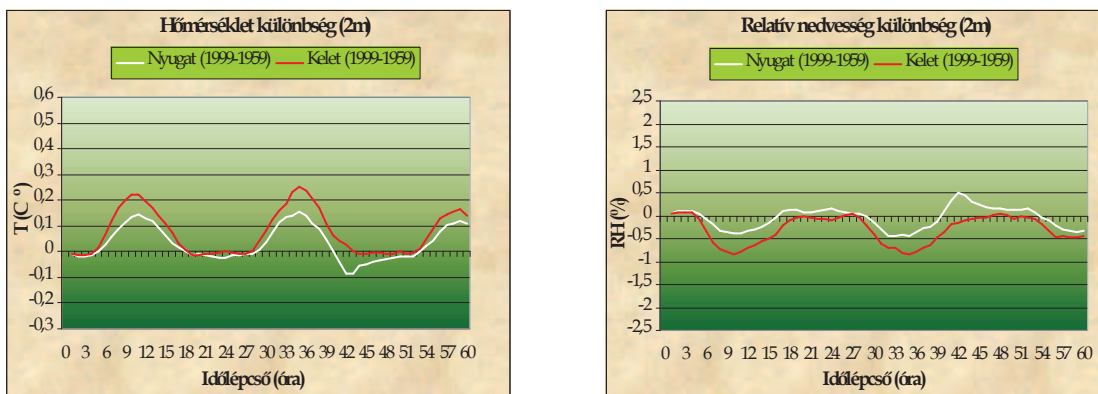
A hőmérsékletváltozás függését a besugárzástól nem csak a napi menetnél, hanem a földhasználat hatásának éves ciklusánál is nyomon követhetjük (2.3 ábra). Jól látható, hogy a földhasználat-változás hatása a hőmérsékletre, függ a nappalok hosszától is, hiszen áprilistól, júniusig – amikor a nappalok egyre hosszabbak lesznek – nő a melegedés mértéke, majd júliusban megtorpan, augusztusban hirtelen visszaesik, s a vizsgált 6 hónap alatt a földhasználat-változás szeptemberben okozza a legkisebb melegedést.



2.3 ábra: A 40 év alatt (1999 és 1959 között) végbement földhasználat-változás miatti emelkedés a napi maximumhőmérsékletben

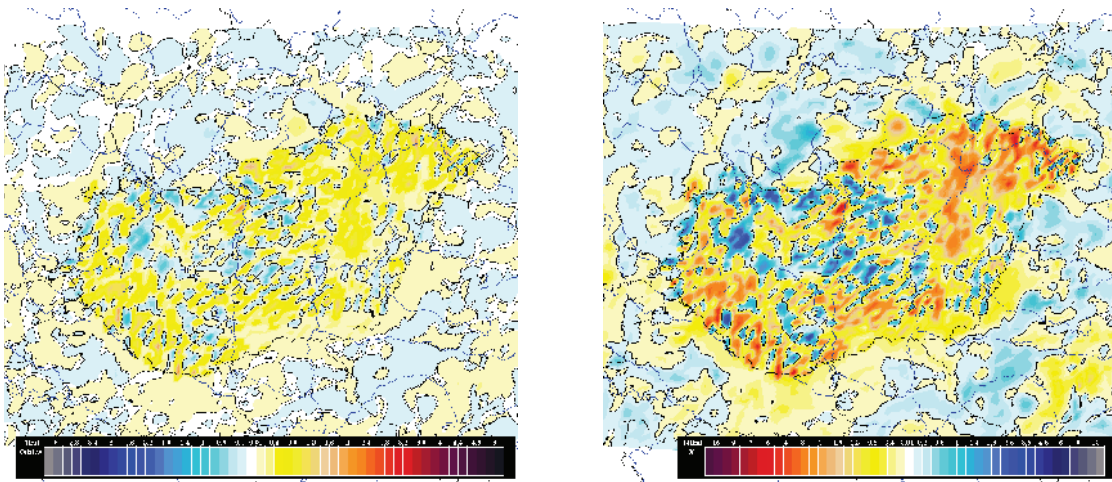
A következő két grafikonon (2.4 ábra) látható, hogy a változás mértékében kelet-nyugat vonatkozásban jelentős az eltérés. A keleti országrészben a maximumhőmérséklet átlagos emelkedése meghaladja a 0,25 °C-ot, addig a nyugati országrészben a változás csak 0,16 °C volt.

A relatív nedvesség alakulásában is hasonló különbségek fedezhetőek fel az országrészek között (2.4 ábra), mint a hőmérsékletnél, csak éppen ellenkező előjellel, azaz a keleti országrészben nagyobb mértékben csökkent a nedvesség (-0,84 %-kal), mint a nyugatiban (-0,44 %). Ezek a területi különbségek Magyarország tájainak más-más mértékű földhasználat-változásával magyarázhatók: összességében a keleti országrészben a felhasznált adatsorok tanúsága szerint lényegesen nagyobb földhasználat-változás történt a vizsgált 40 esztendő során, mint az ország nyugati felében.



2.4 ábra Az 1959 és 1999 között bekövetkezett földhasználat-változás által okozott éghajlati különbségek területi összehasonlítása (a 12., 36., 60. óra helyi idő szerint 14 órának felel meg). A felosztásnál, egész Pest megyét a keleti országrészhez soroltuk, míg máshol választóvonalnak a Duna vonalát tekintettük.

Az eddigiekben sima, területi átlagokkal jellemeztük a földhasználat változásait. A következő három ábrához kapcsolódva azonban két olyan vonatkozást kell bemutatnunk, ami térben elosztva jelentkezik. Elsőként megmutatjuk, milyen a 13 helyzet rétegzett mintavétel szerinti átlagos eloszlása a hőmérséklet és a relatív nedvesség megváltozásainak (2.5 ábra). Látható, hogy mindkét mező erősen foltos, ezen belül gyakori ellentétes előjelű változásokkal. Ezekben nem a konkrét számérték a lényeges, hiszen a megyei különbségeket véletlenszerűen osztottuk el, csak a megyei átlagok megfelelő reprezentálásra ügyelve. A két országrész között integráltan jelentkező eltérés ugyanakkor ezen a térképen is megmutatkozik. Az ábra azt is érzékelteti, hogy bár a hazai földhasználati változások hatásai erősebbek hazánk területén, mint az országhatárokon kívül (ahol semmilyen hasonló módosítást nem eszközöltünk az határfeltételi adatokon), azért nem elhanyagolható a határokon túlra áterjedő hatás sem. Ebből logikusan az is következik, hogy amikor a földhasználat, mint antropogén hatás magyarországi hatásait vizsgáljuk, szükség lenne a szomszédos mezőgazdasági területeken végbemenő változások ismeretére is.

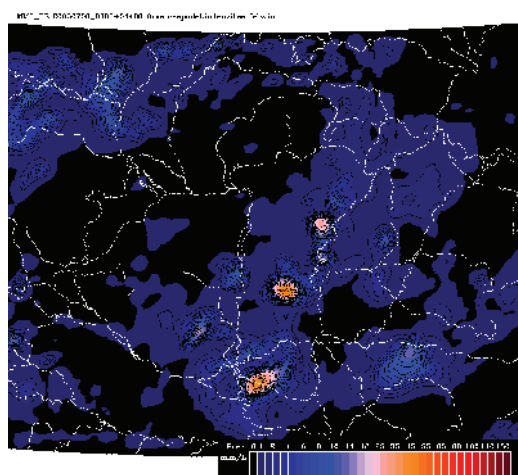


2.5 ábra: Az 1959-1999 közötti földhasználat-átalakulás által okozott hőmérséklet- (bal oldali ábra), valamint relatív nedvesség-változás (jobb oldali ábra)

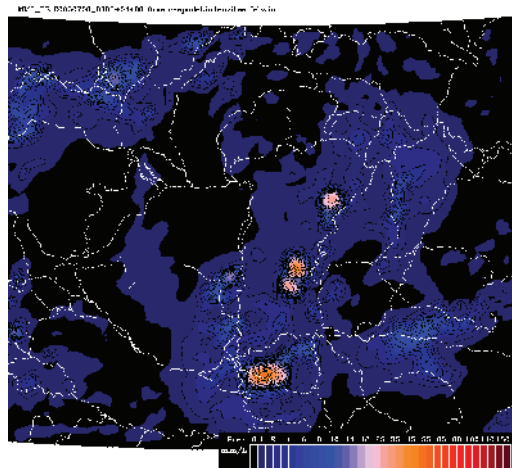
Mint láttuk, a különböző alsó határfeltételekkel futtatott csapadékösszegek országos átlagában nincs lényeges változás. Mégis, a 2.6 és a 2.7 ábrán (a következő oldalon) be tudunk mutatni két olyan helyzetet, amikor lokálisan mégis fontos szerepe volt annak, hogy a futtatás melyik földhasználati eloszlás mellett történt. Ez a konkrét esetben azzal magyarázható, hogy – labilis rétegződés esetén – egy-egy zivatar kialakulási folyamatát jelentéktelennek tűnő hatások is elindíthatják, illetve módosíthatják, ahhoz hasonlóan, ahogy ezt a puska ravasza, angolul „trigger”-e teszi.

Mindkét fenti modellezési feladatsorból az következik, hogy földhasználat dokumentált változásai az elmúlt fél évszázad során kimutatható sugárzási hatással voltak az éghajlatra az albedó változásain keresztül. A földhasználat pontos figyelembe vétele és a változások nyomon követése tehát az időjárás előrejelzése szempontjából is fontos tennivaló!

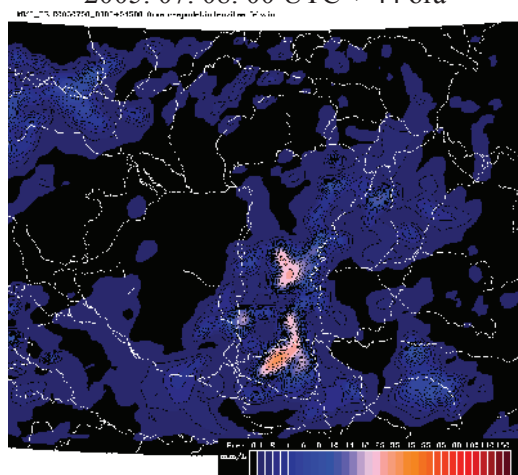
A következő, harmadik fázisban az eddigi számításokat két vonatkozásban haladtuk meg: (i) Tényleges és részletes területi bemenő adatokat használtunk a (tényleges elrendezést nem ismerve) randomizált eloszlás helyett. (ii) Az MM5 modell felbontását 6x6 km-ről 2,5 x 2,5 km-re javítottuk. Emellett a számítás – a felhasználható térképi információhoz igazodva – száz évet, a teljes XX. századot fogta át.



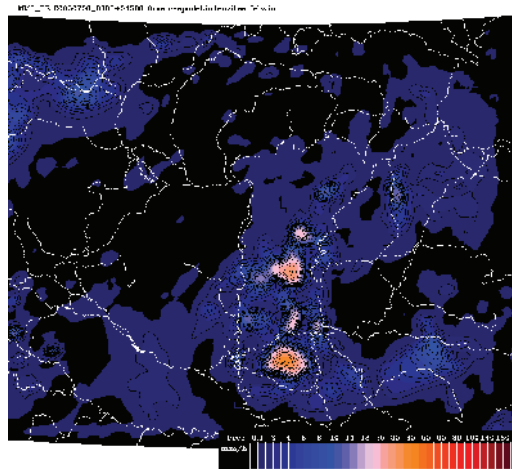
2005. 07. 08. 00 UTC + 44 óra



2005. 07. 08. 00 UTC + 44 óra

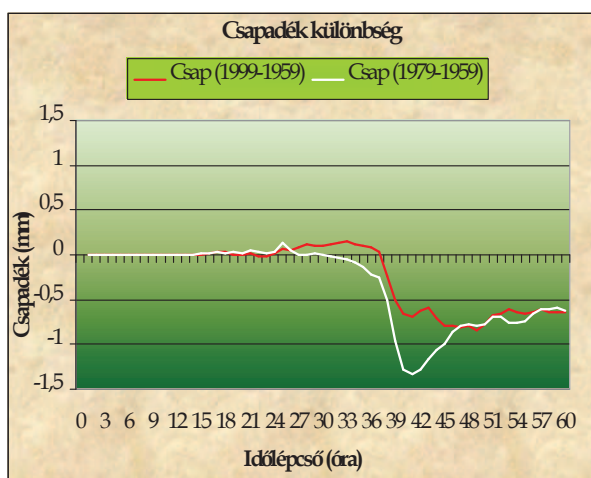


2005. 07. 08. 00 UTC + 45 óra
1959



2005. 07. 08. 00 UTC + 45 óra
1999

2.6 ábra A földhasználat-változás hatása a csapadékintenzitására (2005. 07. 08.) A bal illetve a jobb oldali csapadékintenzitás térképek csak a felszínhasználat változásai miatt eltérő albedo és párolgási együttható értékekben különböznek egymástól.



2.7 ábra A 2005. augusztus 15-én 00 UTC-t követő 60 óra országos csapadékhozama az 1999-hez, illetve 1979-hez tartozó földhasználat mellett, az 1959. év hatásához képest.

3. Részletes térképekből számított földhasználati változások éghajlati hatásai

3.1 A XX. századi felszínborítás rekonstruálása

Vizsgálataink ezen harmadik fázisában a XX. század elejének („századforduló”) és végének („ezredforduló”) részletes területi bontású modellezése volt a célunk, úgy, hogy közben igyekeztünk jellemezni a közben eltelt évtizedeket is. Ehhez a földhasználatot az alábbi négy különböző forrás alapján rekonstruáltuk.

A 3. katonai felmérés származtatott térképszelvényeinek vektorizálását az ELTE Térképészeti Intézete Klinghammer István vezetésével korábban elvégezte, s annak eredményeit Zentai László bocsátotta rendelkezésünkre. Az e térképről nyert információkat kiegészítettük a Bedő-féle erdőtérkép (*Bedő*, 1896) adataival, illetve a KSH községsoros földhasználati adataival 1895-ből és 1913-ból (*KSH*, 2010). Az országos földhasználati statisztikai adatsorok segítségével a XX. századi főbb felszínborítás-változásokat nyomon tudtuk követni. A jelen felszínborításról a CORINE 2000-es adatbázisa (*CORINE*, 2000) szolgáltatta a részletes térképes információkat. Tehát összesen 3 féle térképes adatbázisból volt lehetőségünk a múltbéli és jelenlegi felszínborítást országos szinten rekonstruálni, valamint a változásokat számszerűsíteni.

A 3. katonai felmérés származtatott térképszelvényeit (1:200000) az ELTE CorelDrawban már korábban vektorizálta. Az eredeti szelvények 1910 körül készültek. Munkánk során tehát e vektorizált szelvények tájékozását, összeillesztését, EOVS koordináta rendszerbe transzformálását, a különböző felszínborítási kategóriák automatikus felismerését, az egyes poligonok területeinek kiszámítását, valamint az így nyert adatok kiértékelését kellett elvégezni, hogy aztán az MM5 felszínborítási adatbázisába az innen nyert információkat beviessük.

A Bedő-féle 1:360 000-es erdőtérképet raszteres formátumban Timár Gábor (*ELTE, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék*) bocsátotta rendelkezésünkre. A mai magyarországi határokon belül a térképen ábrázolt erdőfoltok vektorizálása nyomán további plusz információt nyerhetünk az erdőterületek elterjedéséről, az azokban uralkodó főbb fafajokról is.

A CORINE 1:100000-es műholdképek alapján készült felszínborítási adatbázisai az interneten hozzáférhetőek, és regisztráció után kutatási célra szabadon felhasználhatóak. Mi a kísérletünk során a 2000. évre vonatkozó adatbázissal dolgoztunk (*CORINE*, 2000).

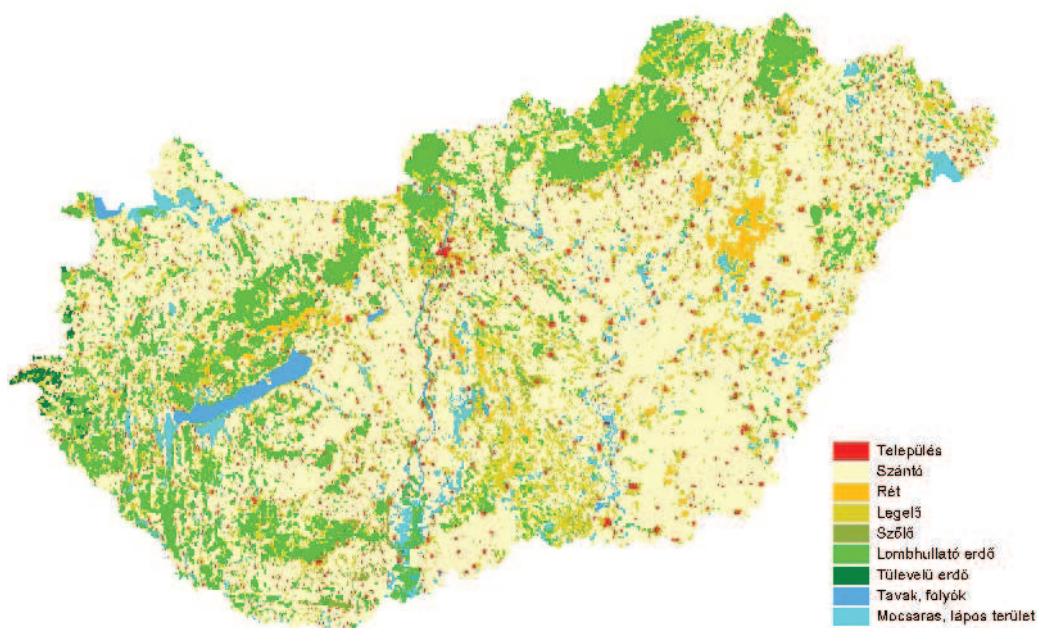
Megoldandó problémát jelentett, hogy a különböző időpontokból származó térképes források más-más kategorizálást használtak, tehát a múlt, illetve a jelenre vonatkozó felszínborítási térképek elkészítésénél szükség volt a kategóriák egységesítésére. Mivel csak az MM5 meteorológiai modell kategóriához voltak adottak a modell futtatásához szükséges felszín-fizikai paraméterek, ezért ennek a modellnek felszínborítási kategóriáiba kellett besorolnunk a különböző térképi források felszínborítási kategóriáit is.

A Bedő-féle erdőtérképet raszteres formátumban először megfelelő illesztőpontok segítségével EOVS koordináta rendszerbe transzformáltuk. Ezután a trianoni Magyarország területére eső erdőterületeket poligonokkal lehatároltuk, és az eredeti térképen szereplő kategóriák szerint kategorizáltuk. Az így keletkezett vektoros állomány már alkalmas volt területek számítására is. Ezt a térképet, mint később látni fogjuk, csak a tűlevelű és lomblevelű erdők elkülönítésére használtuk fel. E térkép alapján a századforduló környéki erdőszűcség a jelenlegi Magyarország területére vonatkoztatva 13,9 %-os volt.

A már korábban vektorizált 3. katonai felmérés származtatott térképszelvényeiről kapott poligonos állományunk ellenőrzése után a szelvényeket egyesítettük, s az egyes poligonok területét is kiszámoltuk. Ezek alapján a mai Magyarország területén az erdősültség a szelvények készítésének időpontjában 14,1 %-os volt (tehát a statisztikai adatokban szereplő értékek alapján elvártnál kb. 1,5 %-kal, míg a Bedő féle térkép alapján nyert adatoknál mindössze 0,26 %-kal magasabb értéket kaptunk). A mocsarak kiterjedése a századfordulón országosan még 3,2 % volt, míg a tavak folyók az ország területének 2,3 %-át borították. E szelvények alapján a települések az ország területének 3,0 %-át, a szőlők 2,5 %-át fedték.

További problémát jelentett, hogy a 3. katonai felmérés származtatott térképszelvényei csak 6 kategóriát tüntetnek fel: erdő, település, szőlő, mocsár, víz, egyéb, azaz nem ad információt a tűlevelű, lombhullató erdők, illetve a szántók, gyepek előfordulásáról, holott ez utóbbi 2 kategória az erre az időpontra vonatkozó statisztikai adatok szerint jelentős arányt képviseltek. Eppen ezért a múltra vonatkozóan is megpróbáltuk a szántó és gyepterületeket szétválasztani, valamint a tűlevelű erdőket a lomblevelűektől elkülöníteni. A *tűlevelű* erdők előfordulási helyeinek meghatározásához a Bedő-féle erdőtérképet használtuk, még hozzá úgy, hogy összemetsztük a Bedő-féle erdőtérkép alapján nyert tűlevelű erdőket határoló poligonokat a 3. katonai felmérés származtatott szelvényeiről nyert erdőpoligonokkal. Azon 3. katonai felmérés származtatott szelvényei után nyert erdőpoligonok, amelyek fedésben voltak a Bedő-féle tűlevelű poligonokkal *tűlevelű* kategóriát kaptak, amelyek nem, azok *lomblevelű*űt. Így az erdők esetén a századfordulóra két kategóriát tudtunk meghatározni: *lomblevelű* illetve *tűlevelű* erdő. A *gyep* kategória létrehozása a századfordulóra vonatkozóan több lépcsőben történt:

Először megvizsgáltuk, hogy a századforduló környéki községsoros adatok szerint országosan kb. mekkora lehetett a gyepek aránya (1895-ben 22,1%, 1913-ban 18,09%, tehát a századfordulón 20 % körül lehetett). Ezek után a CORINE 2000-es kategóriái közül meghatároztuk azokat a kategóriákat, amelyek kb. 100 évvel korábban (is) *gyepek lehetek* (ilyenek például: rét, természetes gyepek, komplex művelési szerkezet, átmeneti erdős cserjés terület, stb; összesen az ország területének 18,28%-a).



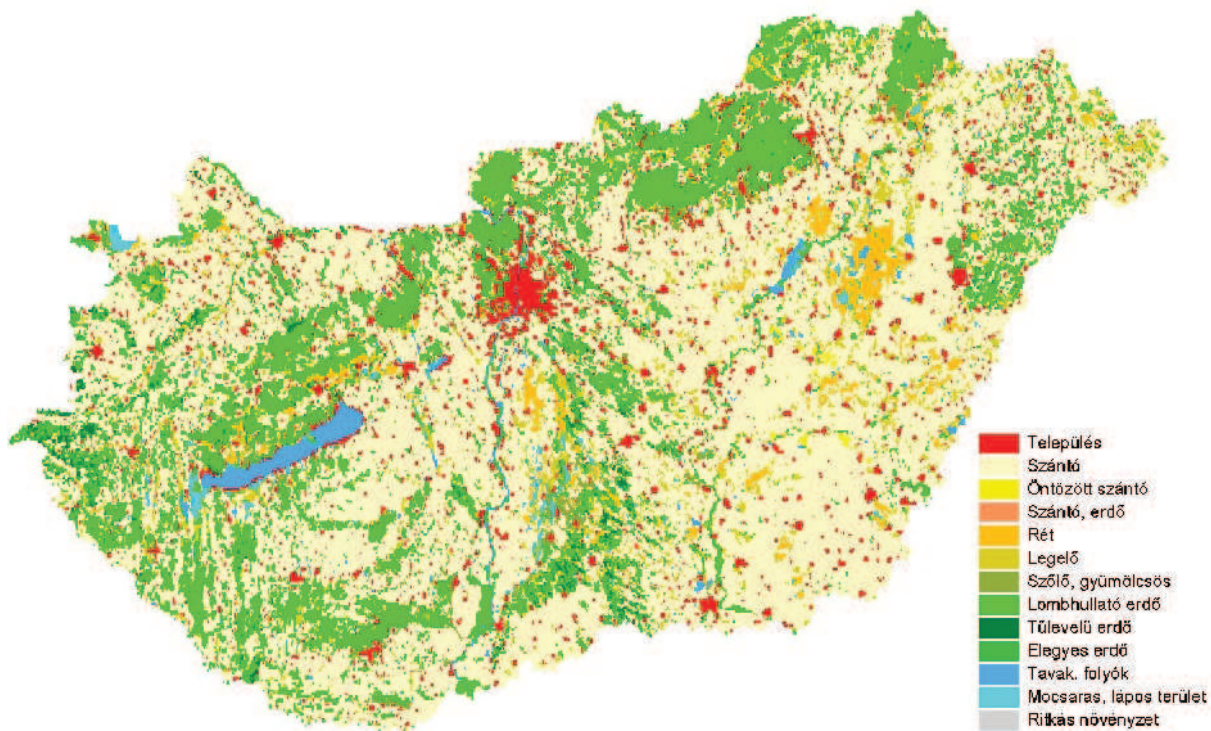
3.1 ábra A földhasználat rekonstruált képe 1900-ban az MM5-ben is használt kategóriákban. (szerző: Drüsler Áron, a jelen OTKA kutatáshoz kapcsolódóan)

Ezek után e kategóriák poligonjait egyesítettük, és *gyep*ek *lehetek* kategóriába soroltuk. E kategória poligonjait kivontuk a katonai felmérés erdő, illetve település kategóriáinak poligonjaiból. Ennek következtében az erdők eredeti 14,1%-os elterjedése a statisztikai adatoknak jobban megfelelő 12,5 %-ra csökkent, a települések területi aránya pedig 3,0%-ról 2,43%-ra. Az így módosított katonai felmérés poligonjait kivontuk a *gyep*ek *lehetek* kategória poligonjaiból, hogy ne legyen területi átfedés, így a végleges *gyep* kategória területi aránya a századfordulóra vonatkozóan országosan 16,0 %-os lett. E lépések után az országhoz tartozó, de a meghatározott 7 kategória egyikébe sem sorolható poligonok lettek a *szántó* területek.

Így nyolc kategóriát nyertünk, amelyek a területi arányuk szerinti sorrendben a következők: szántó (61,0 %), gyep (16,0 %; rét + legelő), lomblevelű erdő(12,2%), mocsaras, lápos terület (3,2 %), szőlő, gyümölcsös (2,5%, e térkép esetén ez mind szőlő), település (2,4 %), tavak, folyók (2,3%), tűlevelű erdő (0,3 %). A fenti lépések után nyert térképet a fenti 3.1 ábra mutatja.

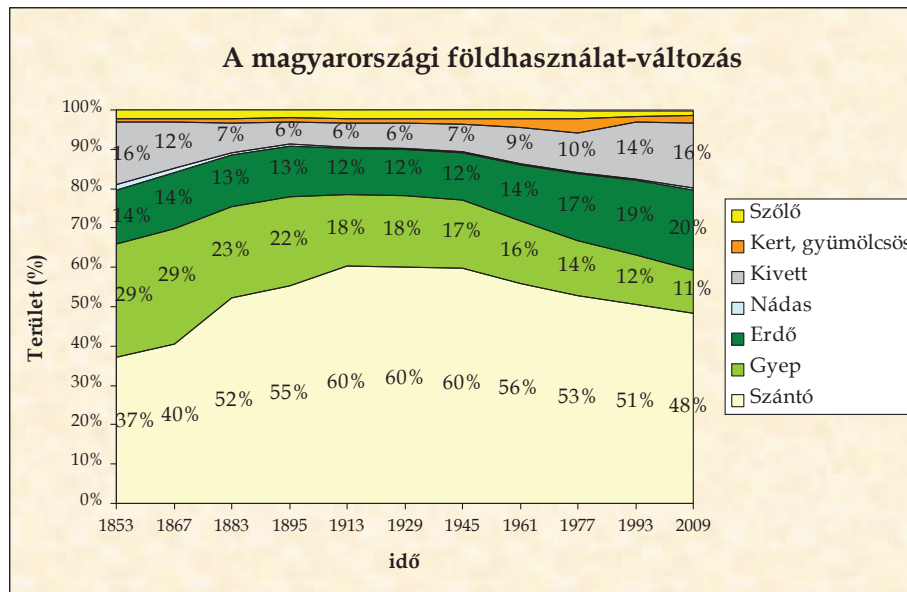
A következő lépés az ezredfordulóra (a 2000. évre) vonatkozó földhasználati térképek előállítása és az MM5-modell kategóriáinak megfeleltetése volt. Míg a századfordulóra vonatkozó adatbázisnál bizonyos fontos felszínborítási kategóriák hiánya és pótlása jelentett megoldandó feladatot, a CORINE 2000-es adatbázisa esetén a Magyarországra eső kategóriák számának összevonását kellett véghezvinni. A CORINE kategóriákat tehát be kellett sorolni az MM5 modell által kínált kategóriákba.

Mindezek után a fontosabb kategóriák területi aránya az „ezredfordulóra” vonatkozóan a következő lett: szántó (56,8 %; szántó + öntözött szántó), gyep (9,6 %; rét + legelő + ritkás növényzet), lomblevelű erdő (18,3 %), település (5,7 %), szőlő, gyümölcsös (2,2 %), tavak, folyók (1,9 %), elegyes (1,7 %), szántóval, erdővel vegyesen borított terület (1,8 %), mocsaras, lápos terület (1,1 %), tűlevelű erdő (1,1 %). Ezek területi eloszlását a 3.2 ábra szemlélteti.



3.2 ábra A földhasználat rekonstruált képe 1900-ban az MM5-ben is használt kategóriákban. (szerző: Drüszler Áron, a jelen OTKA kutatáshoz kapcsolódóan)

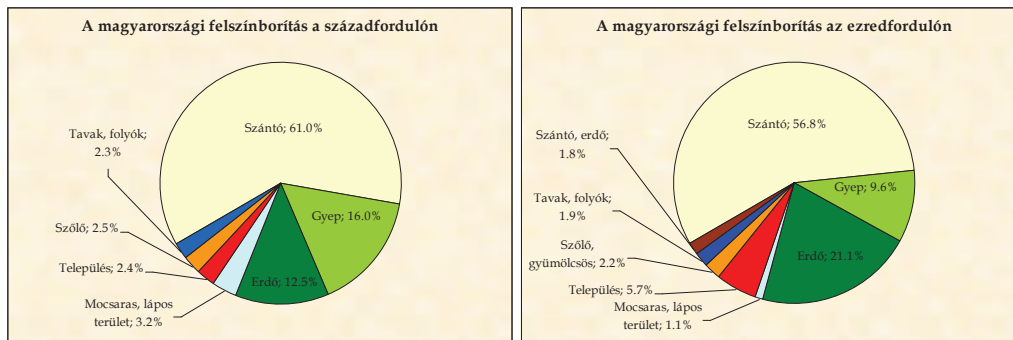
Magyarországra vonatkozóan 1913-tól kezdve 2-3 évenként, majd 1925-től évenként készültek községsoros statisztikai adatfelvételek a földhasználat területi megoszlására vonatkozóan. Az 1913 előtti időszakban csak 1853-ban, 1867-ben, 1883-ban, valamint 1895-ben készült községsoros statisztikai felmérés a földhasználatról. Ezek a statisztikai adatsorok is fontos információkat szolgáltatnak a felszínborítás változásainak folyamatáról. A községsoros statisztikai adatokból származtatott országos statisztikai adatok mindegyikéhez a Központi Statisztikai Hivatal honlapján keresztül férhettünk hozzá. E felvételi időpontok közül 6 esetén (1895., 1913., 1935., 1962., 1971., 1984) nem csak a származtatott országos, hanem a megyei adatok is rendelkezésünkre álltak. Ezek alapján 1853 és 2009 között 12-18 évenként (átlagosan 16 évenként) felmértük és a 3.3 ábrán összesítettük a földhasználat másfél évszázados változásait.



3.3 ábra A földhasználat változásai hazánk mai területén 1853 és 2009 között a KSH községsoros adatfelvételei alapján. (Adatok: Központi Statisztikai Hivatal, 2010.)

A 3.3 ábrából megállapítható, hogy a 20. század elejéig a szántó területek országosan növekedtek az erdő, illetve gyep területek rovására, majd az 1910-es évektől az 1940-es évek közepéig (a II. világháború végéig) nem történt számottevő változás a különböző kategóriák százalékos előfordulásában. Ennek oka leginkább az egymást követő két világháborúban, valamint a kettő közötti gazdasági világválságban keresendő. A statisztikai adatok szerint a szántók területi aránya először 1913-ban haladta meg a 60 %-ot, s inntől kezdve az 1940-es évek végéig néhány tized százalékkal végig e felett maradt. Ekkor azonban elkezdődött a szántó területek folyamatos csökkenése, s a statisztikai adatok szerint 2000-re már csak az ország területének 48,37 %-án voltak szántók. Ugyancsak a stagnálás volt jellemző a 20. század első évtizedeiben a többi földhasználati kategóriára is, egyedül a gyepek kiterjedése csökkent kis mértékben ezen időszak alatt is. Bár a trianoni döntés következtében fellépő országos fahiány enyhítésére már 1923-ban törvényt fogadtak el az Alföld fásításáról, 1938-ig csak 7 ezer hektárral nőtt az Alföldi erdőterület, és e téren országosan sem volt jelentős a változás. Csak az 1950-es években kezdődött el (a napjainkig is tartó) szántó, illetve gyep területek lassú csökkenése, és ezzel egy időben a művelés alól kivett, illetve az erdős területek növekedése.

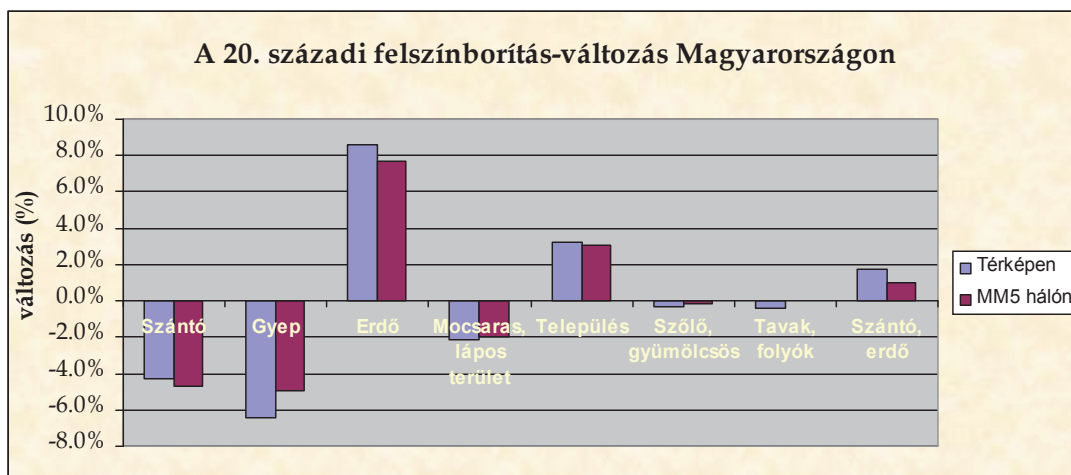
Amennyiben a századfordulóra, illetve ezredfordulóra feldolgozott térképeket hasonlítjuk össze (3.4 ábra), akkor feltűnik a települések területének nagymértékű növekedése, különösen a nagyobb városaink környékén. A száz esztendő alatt a hazai települések kiterjedése az ország területének 2,4 %-áról 5,7 %-ára nőtt!



3.4 ábra A földhasználatnak a projektben rekonstruált változásai hazánk mai területén 1900 („századforduló”) és 2000 („ezredforduló”) között négyféle adatforrás alapján.

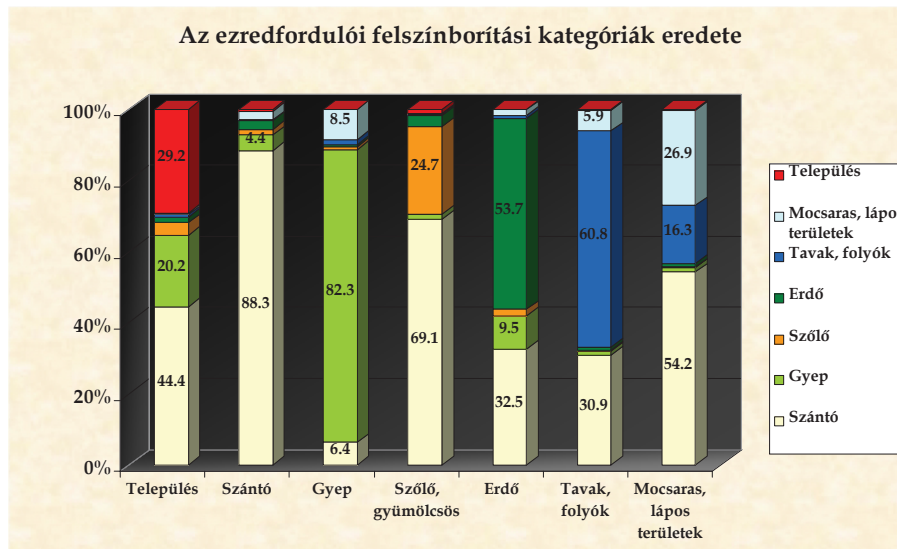
Térképeink tanúsága szerint a magyarországi erdősültség a század eleji 12,5 %-ról az ezredfordulóra 21,1 %-ra nőtt. A fenti változások javarészt a szántó, illetve gyep területek rovására mentek végbe, így országosan mindkét kategória aránya csökkent a feldolgozott térképi források szerint, előbbi területi aránya 61%-ról 56,8%-ra, utóbbié 16%-ról 9,5%-ra. Ugyanakkor, térképeink adatai szerint alig volt kimutatható változás a szőlő, gyümölcsös kategóriában.

Az MM5 a felszínborítási információkat földrajzi koordináta rendszerben tárolja, ezért először földrajzi koordináta rendszerben hoztuk létre a modell felszínborítási adatbázisának megfelelő 30 ívmásodperces rácshálót, amit ezek után EOV-be transzformáltunk. A rácsháló rácspontjainak átlagos területe 58,53 ha volt. Mindezek után minden egyes rácsponthoz hozzárendeltük az adott rácsponton belül legnagyobb területi hányaddal rendelkező felszínborítási kategóriát. Ezt elvégeztük mind a századfordulóra, mind az ezredfordulóra vonatkozó térképek esetén is. Így minden egyes rácsponthoz két felszínborítási kategória tartozik, egy a századfordulóra, egy pedig az ezredfordulóra vonatkozóan. Ebből a közelítésből kifolyólag a futtatások során valamelyest torzulnak az előző pontban ismertetett felszínborítás változásait tükröző százalékos arányok. A rácsponti és az eredeti arányok változását mutatja a 3.5 ábra.



3.5 ábra A felszínborítás százalékos változásai 1900 és 2000 között az eredeti térképeken, illetve az MM5 2,5 x 2,5 km-es rácshálózatán.

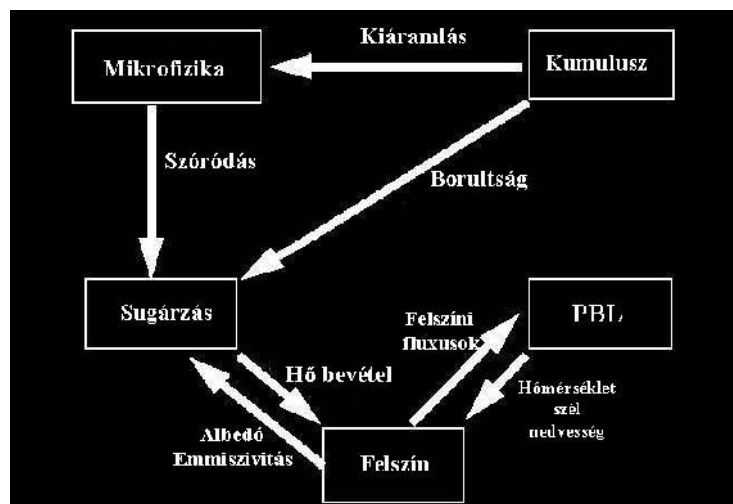
Összességében a rácshálóval történő „lekérdezés” alapján valamelyest csökkent a változások nagysága. A rácsponti lekérdezés arra is lehetőséget nyújt, hogy megállapítsuk, az ezredfordulót jellemző egyes felszínborítások melyik felszínfajtaból milyen arányban alakultak át (vagy maradtak változatlanok) 100 év elteltével. A 3.6 ábra mindezt relatív arányokban mutatja be.



3.6 ábra A felszínborítási formák százalékos eredete 2000-re az 1900-as állapotból kiindulva. Példa a magyarázatra: Az ábra jobbról harmadik oszlopa szerint a 2000-ben erdőként azonosítható rácspontok 32,5 %-a 1900-ban még szántó, 9,5 %-a gyep, stb. volt.

3.2 Az MM5 futtatása és a rétegzett mintavétel

Kísérleteink során az MM5 modellt 2,5 x 2,5 km-es felbontásban futtattuk, ezért a kumulusz parametrizációs eljárást nem kellett használnunk. A kezdeti feltételeket az ECMWF előrejelző modell operatív analíziséből kaptuk, míg a peremfeltételeket ugyanennek a modellnek az előrejelzéséből 3 óránként vettük, majd a köztes időpontokra lineárisan interpoláltunk. Az MM5 a csapadék-fizika, a planetáris határreteg (PBL), a felszíni folyamatok, valamint a sugárzási folyamatok leírása esetén számos parametrizációs eljárást kínál. A futtatások során *Mlawer et al.* (1997) gyors hosszúhullámú sugárzási sémáját használtuk, míg a mikrofizikai folyamatokat *Reisner et al.* (1998) 5 kategóriájú, kevert-fázisú sémája írta le, amely képes figyelembe venni a graupel képződését is. A planetáris határretegben lejátszódó folyamatokat az ETA sémával (*Janjic*, 1994) közelítettük, amely nagy részletességgel számol turbulens kinetikus energiát, valamint helyi átkeveredést. A felszíni folyamatok leírására a NOAA LSM hidrológiai modellt választottuk. Az egyes „almodellek” közötti kapcsolatokat a 3.7 ábra szemlélteti.



3.7 ábra Az MM5 modell egyes parametrizációi közötti kölcsönhatások vázlatos áttekintése.

A rendelkezésre álló számítási, illetve adattárolási kapacitás még az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) szuperszámítógépén sem tette lehetővé, hogy tetszőleges számú „előrejelzést” készítsünk, ezért a futtatásokhoz olyan valós időjárási helyzeteket választottunk ki, amelyek együttesen reprezentálják a hazai Péczy-féle cirkulációs típusokat (Péczy, 1983). Ez az osztályozás – a felszíni légnyomásból kiindulva a ciklonok és az anticiklonok hazánkhoz viszonyított helyzete alapján – 13 típust definiál. Az OMSZ munkatársai a 00 UTC-s szinoptikus térképek alapján minden egyes napot besorolnak valamelyik Péczy-féle típusba. Mi is ebből a kódsorozatból választottuk ki a napokat a 2. fejezethez hasonló, rétegzett mintavételhez. De a kiválasztott napok az előző fejezetben alkalmazottakhoz képest teljesen újak voltak úgy, hogy mind a 13 típusból pontosan kettő essen egy-egy típusba, s abban is maradjon a vizsgált két napon keresztül. A vegetációs időszakból egyenletesen kiválasztott napok, illetve e típusoknak a rétegzésben képviselt gyakorisági súlyai a 3.1 táblázatban láthatók.

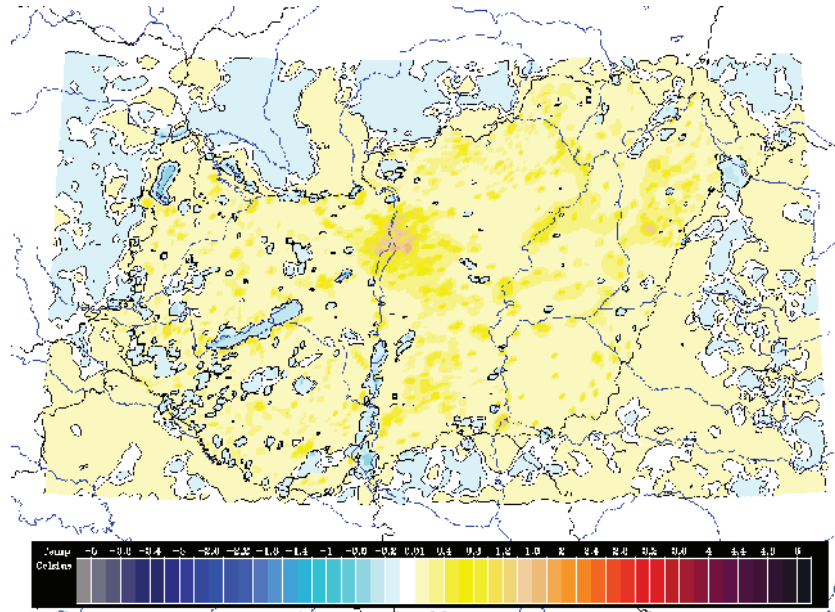
A futtatások során a 48 órás időintervallum minden órájában kaptunk információt a meteorológiai változokról, s így ezen adatok alapján kerülhetett sor a három kiválasztott paraméter (2 m-es hőmérséklet, 2 m-es harmatpont, csapadék) óránkénti kiértékelésére. Ezeket – az időjárási helyzettől is függő eredményeket – ez után úgy általánosítottuk múltbéli éghajlati változásokká, hogy azokat megszoroztuk annak a cirkulációs típusnak a relatív gyakoriságával.

3.1 táblázat: A Péczy-féle cirkulációs típusok (Péczy, 1983), gyakoriságuk (április – szeptemberig tartó időszakban) és a kiválasztott futtatási időpontok

Típus	Gyakoriság	Futtatási időszak
Típusok északi irányból érkező vezetőáramlással:		
((mCc)) Időjárásunkat ciklon hátoldala (esetleg hidegfrontja) alakítja	8,77 %	2006. 08. 28. 00 UTC + 48 óra 2007. 07. 05. 00 UTC + 48 óra
((AB)) Időjárásunkat a Brit-szigetek (vagy az Északi tenger) fölött elhelyezkedő anticiklon alakítja	7,97 %	2006. 07. 13. 00 UTC + 48 óra 2007. 04. 09. 00 UTC + 48 óra
((CMc)) Időjárásunkat mediterrán ciklon hátoldala (esetleg hidegfrontja) alakítja	3,40 %	2006. 04. 10. 00 UTC + 48 óra 2007. 08. 09. 00 UTC + 48 óra
Típusok déli irányból érkező vezetőáramlással:		
((mCw)) Időjárásunkat ciklon előoldala (esetleg melegfrontja) alakítja.	8,90 %	2006. 06. 18. 00 UTC + 48 óra 2007. 08. 20. 00 UTC + 48 óra
((Ae)) Időjárásunkat tőlünk keletre elhelyezkedő anticiklon alakítja	9,12 %	2006. 07. 05. 00 UTC + 48 óra 2007. 09. 29. 00 UTC + 48 óra
((CMw)) Időjárásunkat mediterrán ciklon előoldala (esetleg melegfrontja) alakítja	6,42 %	2006. 04. 05. 00 UTC + 48 óra 2007. 05. 04. 00 UTC + 48 óra
Típusok nyugati irányból érkező vezetőáramlással:		
((zC)) Időjárásunkat tőlünk északra elhelyezkedő ciklon zonális áramlása alakítja	3,48 %	2006. 05. 19. 00 UTC + 48 óra 2007. 05. 08. 00 UTC + 48 óra
((Aw)) Időjárásunkat tőlünk nyugatra elhelyezkedő anticiklon alakítja	17,75 %	2006. 08. 21. 00 UTC + 48 óra 2007. 06. 29. 00 UTC + 48 óra
((As)) Időjárásunkat tőlünk délre elhelyezkedő anticiklon zonális áramlása alakítja	3,55 %	2006. 09. 02. 00 UTC + 48 óra 2007. 07. 13. 00 UTC + 48 óra
Típusok keleti irányból érkező vezetőáramlással:		
((An)) Időjárásunkat tőlünk északra elhelyezkedő anticiklon alakítja	12,62 %	2006. 06. 29. 00 UTC + 48 óra 2007. 06. 04. 00 UTC + 48 óra
((AF)) Időjárásunkat a Skandináv félsziget fölött elhelyezkedő anticiklon alakítja	4,47 %	2006. 06. 09. 00 UTC + 48 óra 2007. 04. 14. 00 UTC + 48 óra
A Kárpát-medence felett centrális helyzetű típusok:		
((A)) Időjárásunkat Magyarország fölött elhelyezkedő anticiklon alakítja	10,67 %	2006. 09. 10. 00 UTC + 48 óra 2007. 09. 20. 00 UTC + 48 óra
((C)) Időjárásunkat Magyarország fölött elhelyezkedő ciklon alakítja	2,90 %	2006. 05. 30. 00 UTC + 48 óra 2007. 08. 11. 00 UTC + 48 óra

3.3 EREDMÉNYEK

A *napi átlaghőmérséklet* változásának területi eloszlását szemlélteti a 3.8 ábra. Erről a térképről is egyértelműen látszik, hogy a felszínborítás változás következtében az ország majdnem teljes területén melegedés mutatható ki (sárga), csak kisebb térségek vannak, ahol a felszínborítás a XX. század során úgy változott, hogy következtében lokálisan hőmérsékletcsökkenés adódott (kék), vagy nem volt kimutatható változás (fehér).

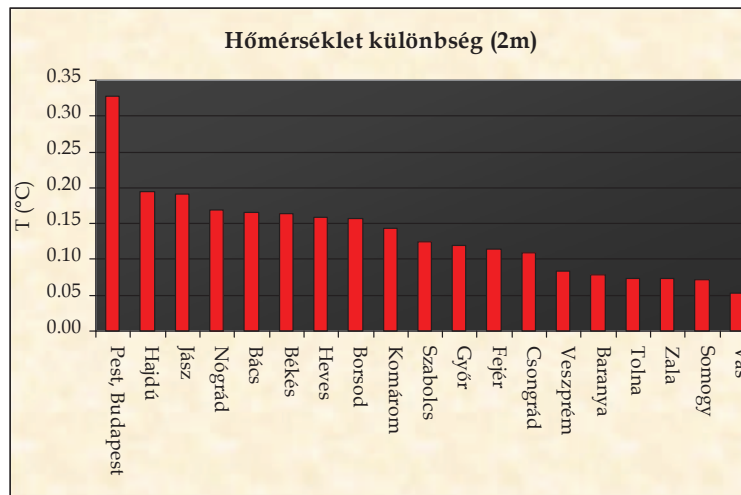


3.8 ábra A napi középhőmérséklet megváltozásának térképe a földhasználat 1900-as évi állapotáról a 2000-es évre bekövetkezett részletes változásai hatására, rétegzett mintavétel alapján. A számítások az MM5 modell egyenleteinek 2,5 x 2,5 km-es horizontális rácshálózaton való 48 órás integrálással készültek.

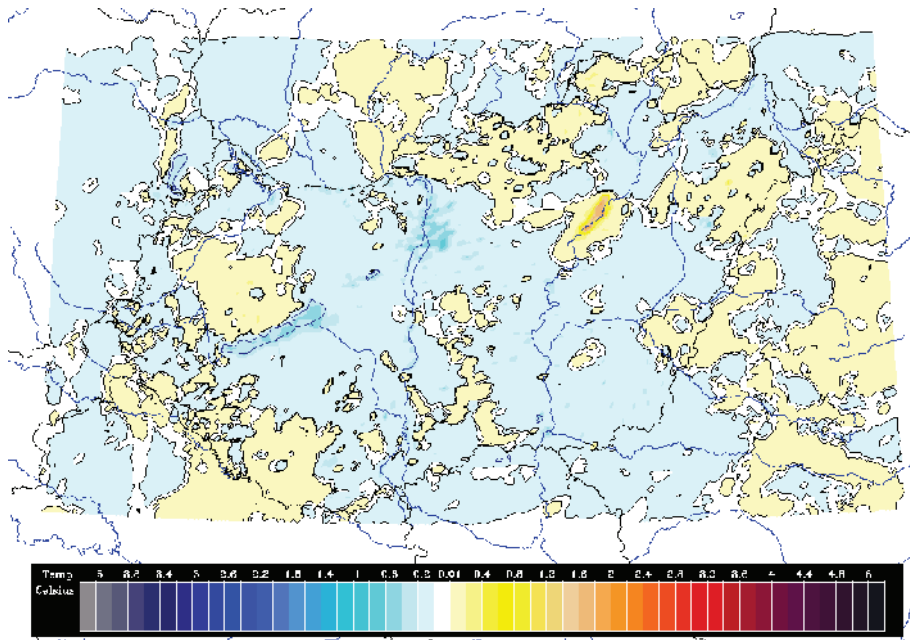
Annak ellenére, hogy a modellfuttatások során az alsó határfeltételt csak Magyarország határain belül módosítottuk, az országhatárokon kívülre eső futtatási területen is voltak kimutatható kisebb hőmérsékletváltozások, ezek azonban sehol sem haladták meg a ± 0.2 °C-t. Országos átlagban a napi középhőmérséklet a száz év alatt 0,14 °C-kal emelkedett. A felszínborítás változás esetén elsősorban lokális hőmérsékletmódosító hatással kell számolni, jelentős hatást a hőmérsékletre inkább csak a változás közvetlen közelében lehet kimutatni. Országos éghajlati melegítő hatásról is elsősorban azért beszélhetünk, mert a felszínborítás változásai az ország területén szinte mindenütt egy irányba mutattak, és jelentős területet érintettek.

A XX. századi felszínborítás-változás napi átlaghőmérsékletre gyakorolt hatását megyénkénti bontásban a 3.9 ábra szemlélteti. Megfigyelhető, hogy 8 megye hőmérséklete emelkedett az országos átlagnál jobban (ami 0,14 °C), és e megyék mindegyike a Keleti országrészen található. Legnagyobb kimutatható hatása Pest megyében (Budapestet is ide számolva) volt a felszínborítás változásának: itt az MM5-ben számított napi átlaghőmérséklet emelkedés 0,33 °C-os volt. Ezen belül, Budapest egyes délkeleti kerületeiben a melegedés meghaladja az 1 °C-ot.

Az ország 19 megyéjéből hat megyében nem érte el a számított hőmérséklet emelkedés mértéke a +0.1 °C-ot sem (3.9 ábra). Ezek a megyék kivétel nélkül mind dunántúli megyék, ahol kisebb a szántóterület aránya és e megyék mindegyikében (Veszprém megyét leszámítva) a települések terjedése a XX. század során jóval az adott megye területének 2 %-a alatt maradt.



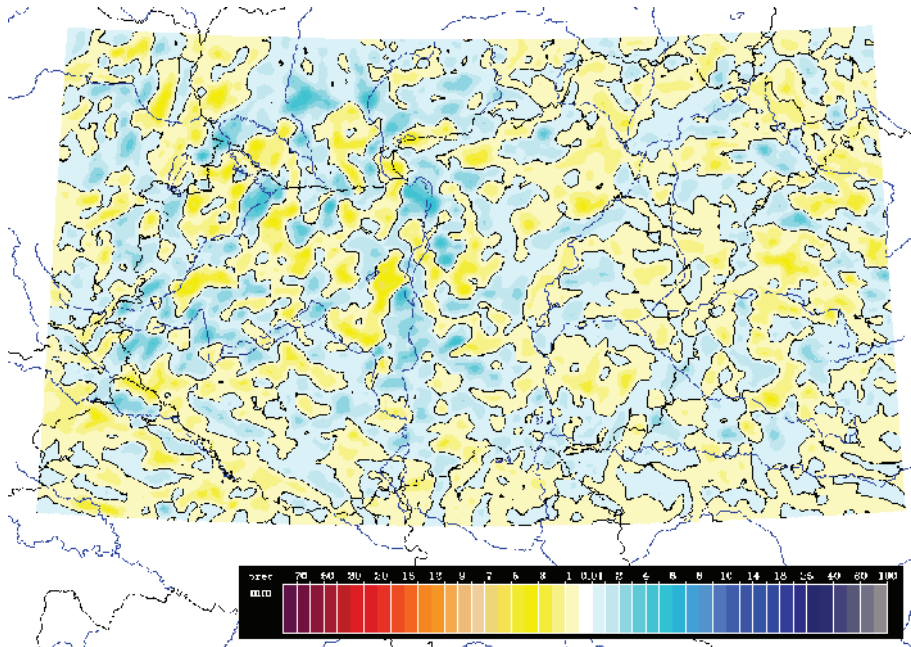
3.9 ábra A napi középhőmérséklet megváltozása megyei átlagban a XX. század vége és vége közötti földhasználati változások hatására.



3.10 ábra A levegő telítettségét jelző harmatpont (adott vízgőzmennyiség kicsapódását okozó hőmérséklet) változása a XX. század eleje és vége közötti földhasználati változások hatására.

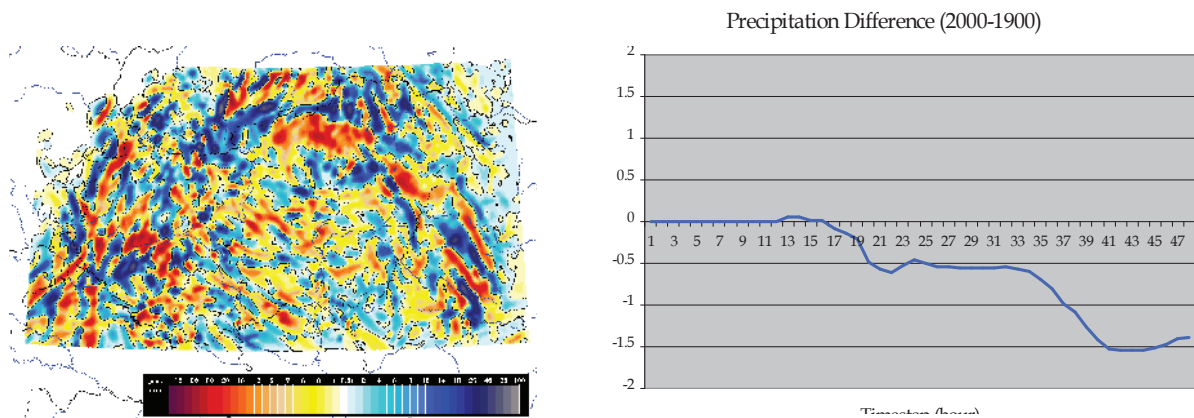
A felszínborítás változás hatása megmutatkozik 2 méteres modellszint *harmatpont*jának napi átlagos változásának területi eloszlásában is (3.10 ábra). Látható, hogy a változás iránya kevésbé egyértelmű, mint ahogy az a 2 méteres hőmérséklet esetén volt: most jelentős kiterjedésű kék (csökkenő harmatpontú) illetve sárga színű (növekvő harmatpontú) területek is vannak. A vízgőz-bevitel emeli, a léghőmérséklet emelkedése önmagában csökkenti a harmatpontot. Országos átlagban a harmatpont 0,17 °C-kal csökkent, ami jelzi, hogy e kis változást döntően a hőmérséklet emelkedése okozza. Határozott harmatpont emelkedés mutatkozik ugyanakkor a Tisza tó környékén az új tófelületnek köszönhetően. A harmatpont csökkenése elsősorban a főváros környékén jelentős, vagyis ott, ahol a legnagyobb a hőmérséklet emelkedése.

A csapadék különbség területi eloszlásának vizsgálatakor nem lehet olyan térséget találni, ahol összefüggés teremthető a felszínborítás megváltozása és a csapadék megváltozása között. A 3.11 ábráról leginkább az a következtetés vonható le, hogy bár az egyes időjárási helyzetekben van szerepe a felszínborításnak a csapadék intenzitására és eloszlásra, azonban a kísérleteink során lefuttatott kevés csapadékos időjárási helyzetből még nem lehet olyan következtetést levonni, hogy a hatás pontosan hol, és miként érvényesül.



3.11 ábra A 48 órás csapadékösszeg változásai a XX. század eleje és vége közötti földhasználati változások hatására.

Végül megmutatjuk, hogy egyes kritikus napokon a csapadék értékeiben ebben a kísérletben is tapasztaltunk változásokat a földhasználati különbségek hatására (3.12 ábra). A földhasználat pontos megadásának prognosztikai jelentőségét bizonyítja, hogy egyes pontokon ± 40 mm/48 óra is lehet a különbség aszerint, hogy az 1900-as vagy a 2000-es év felszínborítottságával futtattuk-e az MM5-öt az adott ciklonális helyzetben. A különbségnek az országos csapadékösszegre is volt 1,5 mm/48 óra mértékű (csökkentő) hatása.



3.12 ábra : A csapadék 48 órás összegének (mm/48 óra) térbeli különbségei (balra) és az országos átlag időbeli lefutása (jobbra) a földhasználat 2000. évi és 1900. évi rendje közötti különbség hatására egy középpontjával hazánk fölött elhelyezkedő ciklonban 2007 augusztus 11-én 00 UTC-től kezdődően. A legnagyobb különbségek elérték a ± 40 mm/48 óra értéket!

Diszkusszió

Munkánk lényegét és eredményeit a fentiekben (és az Összefoglalóban) ismertettük. E pontban három vonatkozásra térünk ki:

- (i.) Lehet-e torzító hatása a végkövetkeztetéseinkre annak, hogy nem végeztünk évszázados integrálást, hanem csak rétegzett mintás, statisztikai mintavételezést?
 - (ii.) Változhatnak-e földhasználat szerepére levont mennyiségi következtetéseink, ha sikerülne figyelembe vennünk a vegetáció önszabályozó mechanizmusait is?
 - (iii.) Lehet-e torzító hatása annak, hogy a földhasználat változásait izoláltan, a többi globális külső hatástól és belső változástól (pl. felhőzet) függetlenül végeztük?
 - (iv.) Volna-e mód ilyen részletes számításokra a XX. század előtti időszakokra nézve?
- (i.) A második számítási fázis adatainak elemzésekor kimutattuk, hogy a legmagasabb nappali hőmérséklet változása a két szeptemberi napot kivéve (amikor a napállás és a vegetációs aktivitás alacsony szintje dominált) országos átlagban minden napon meghaladta legalább a 0,1 Celsius fokot, a relatív nedvesség változása pedig a -0,5 %-ot. Ha tehát torzít is valamennyire a rétegzett mintavétel a tényleges klimatikus átlagképzéshez képest (amit a gépidő korlátok, és a kellő felbontású kezdeti és határfeltételek hiánya miatt nem is tudnánk végrehajtani), a fenti becslések nagyságrendje akkor sem lehet hibás.
- (ii.) Számításainkban a növénytakaró valamennyi fizikai jellemzőjét egy-egy átlagszámmal jellemeztük, amelyek legfeljebb a növény-egyed fejlődését, az ún. fenofázist vették figyelembe. Például, az erdők albedóját is differenciálatlanul, a fajtaválasztéktól, az ökológiai állapottól és az életkortól függetlenül tudtuk csak meghatározni. Ugyanakkor, az éghajlat hosszabb anomáliái és változásai módosíthatják a növénytakaró hő- és vízmérlegét (valamint érdességét) meghatározó növényi jellemzőket. Itt elsősorban a vízellátottság hatásaira gondolhatunk, hiszen a vízhiányos növény sokkal világosabb színű és persze kevesebbet párolog, stb. Például egy mély gyökereivel normál élettani jeleket mutató erdőt a száraz körülmények között vegetáló haszonnövényre váltás jóval erősebb hatást is kifejthet magára az éghajlatra annál, mint amire az átlagos szakirodalmi paraméterekből következtettünk. A növény-éghajlat visszacsatolás mértéke egyike a legnehezebben kezelhető- és legkevésbé ismert az éghajlati visszacsatolásoknak. Ilyen értelemben, a klímaváltozás más kereszt hatásainak is lehet szerepe (l. a következő pontban).
- (iii.) A külső tényezők közül az üvegházgázok teljesen más hullámhosszon fejtik ki a hatásukat. A vulkánosság az időben ritka nagy magasságra kilövellő- és szulfátban gazdag kitörések setén is csak 1-3 évig csökkentik a napsugárzást. A naptevékenység 11 éves ingadozásának mértéke 0,1 % alatti, az évszázados ciklus még ennél is kisebb (IPCC, 2007), így rövidhullámon egyedül a troposzférikus aeroszolok mennyisége okozhat kereszthatást a legfontosabb földhasználati változás, az albedó-hatással. De az aeroszol-hatás is legfeljebb egy százalékos nagyságrendben befolyásolja a légkör átbecsátását, ami aligha több az eljárás más hibaforrásai, pl. a rétegzett mintavétel okozta bizonytalanságnál. Ugyanígy, egy korábbi számítás (Mika, 1988) szerint az április-szeptember időszakban legfeljebb 10 %-kal nőtt a napfénytartam (kb. ennyivel csökkent a nappali felhőzet). Vagyis a felhőzetcsökkenés párhuzamos hatásait is figyelembe véve, a klímaváltozás okozta kereszthatások legfeljebb ennyivel emelhetik a kapott számszerű becsléseket.
- (iv.) A kutatás során azt is vizsgáltuk, hogy milyen hosszban tudnánk az időben visszamenni a XIX. században, vagy még korábbra. Meg kellett állapítanunk, hogy bár nagyszámú minőségi megállapítás olvasható a szakirodalomban, amit például Dömsödi (2006) is részletesen összefoglalt, viszonylag rövid, illetve szporadikus az az időszak, amivel a megvalósított szimulációknál korábbi idősakra mehetnénk vissza. Az első megbízható térképi forrásnak a II. József korából (1782-1785) származó 1. katonai felmérés tekinthető, ám

ez csak egyetlen időszak, amit a 2. felmérés a 19. század elején, végül a 3. felmérés követett újabb száz évvel később, 1910 körül. Sajnos az első két térkép országos feldolgozása (térinformatikai szoftverrel történő vektorizálása, kategorizálása, és az egyes poligonok területének kiszámítása) még nem történt meg. Ha ezt valaki elvégzi, akkor a kutatás során alkalmazott modellezési metodikával (mezoléptékű időjárás-modellezés + rétegzett mintavétel) további, bő egy évszázaddal korábbi állapotra is becsülni tudjuk a földhasználat történelmi léptékű változásainak hatását Magyarország éghajlatára.

Hivatkozások:

3. Katonai Felmérés (1910): A Monarchia III. katonai felmérésének származtatott térképei: A Magyar Királyság 1:200000 méretarányú közigazgatási térképe
- Bedő Albert (1896): A magyar állam összes erdőségeinek átnézeti térképe az egyes községek határában uralkodó főfánemek kitüntetésével. Bp. 1896.
- CORINE, 2000: Corine land cover 2000 (CLC2000) seamless vector database, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-seamless-vector-database>
- Dávid, A., 1985, Az albedó területi eloszlásának meghatározását célzó előzetes kutatások. OMSZ Beszámolók, 1983, Budapest, 81-98.
- Dömsödi J. 2006: Földhasználat; Dialóg Campus Kiadó, Budapest
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., et al (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. Mon. Wea. Rev., **122**, 927–945.
- Központi Statisztikai Hivatal évkönyvei (1951-2000),
- KSH, 2010: A Központi Statisztikai Hivatal nyilvános hozzáférésű, magyar nyelvű honlapja http://portal.ksh.hu/pls/ksh/docs/hun/agrar/html/tab1_3_1.html (2010. aug. 5-i állapot)
- Mika J., Kovács E. és Bozó L., 1993: A légköri aeroszol-tartalom antropogén és természetes vál-tozásának hatása a sugárzási mérlegre a Kárpát-medencében. OMSZ Beszámolók, 1989, 81-89
- Mika J., Kovács E. és Dávid A., 1992: A növényzet és a talaj állapotának hatása a felszín-légkör rendszer albedójára. OMSZ Beszámolók, 1988, 165-173
- Mika, J., 1988: A globális felmelegedés regionális sajátosságai a Kárpát-medencében. Időjárás 92, 178-189
- Mika, J., Horváth Sz. and Makra L., 2001: Impact of documented land use changes on the surface albedo and evapotranspiration in a plain watershed. Phys. Chem. of the Earth v. 26, 601-605
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated model for the longwave. J. Geophys. Res., **102**, 16,663-16,682.
- Péczely Gy., 1983: Magyarország makroszinoptikus helyzeteinek katalógusa (1881-1983). OMSZ Kiseb-b Kiadv. 53., Budapest
- Reisner J., R. M. Rasmussen, R. T. Bruintjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 124, 1071-1107
- Történelmi Statisztikai Kiadványok, 1988: Földterület községsoros adatok 1895-1984. KSH. Bp.