

REGIONÁLIS MODELLBECSLÉSEKkel ELŐÁLLÍTOTT ÉGHAJLATVÁLTOZÁSI FORGATÓKÖNYVEK A KÁRPÁT-MEDENCE TÉRSÉGÉRE

T-049824 számú OTKA pályázat

ZÁRÓJELENTÉS 2002-2009

Tartalomjegyzék

1. A Kárpát-medence klímájának rekonstruálása a Réthly-dokumentumok digitalizált adatbázisa alapján
2. Magyarország éghajlati extrémumainak elemzése extrém indexek felhasználásával -- Hőmérséklet
3. Magyarország éghajlati extrémumainak elemzése extrém indexek felhasználásával – Csapadék
4. Szinoptikus-klimatológiai elemzések
5. Globális éghajlati modellek eredményeinek dinamikus leskálázása a Kárpát-medence térségére
6. Regionális skálájú dinamikus modelladaptáció (PRECIS) a Kárpát-medence térségére

1. A Kárpát-medence klímájának rekonstruálása a Réthly-dokumentumok digitalizált adatbázisa alapján

A jövőre vonatkozó éghajlati előrejelzések minőségének előfeltétele, hogy mind pontosabban ismerjük, értékeljük az elmúlt időszakok éghajlatát, azok tendenciáit, s az ingadozások amplitúdóját. A Kárpát-medencére vonatkozó, s e cikkben bemutatott kutatás célja a Réthly-gyűjtemény alapján a történeti feljegyzésekből nyerhető éghajlati információk elemzése, különös figyelmet fordítva az éghajlati szélsőségek gyakoriságának tendenciáira. A vizsgálat az 1900-as évvel zárul, hiszen az ezt követő időszakokról már szabványos állomásokon mért adatsorok állnak rendelkezésre. Az elkészült teljes elemzésből csupán néhány eredményt mutatunk be itt, a részletes analízis publikációja folyamatban van.

Az IPCC Harmadik Helyzetértékelő Jelentése (2001) szerint a globális éghajlatváltozás regionális hatásai a szélsőségek intenzívebbé válását, s gyakoribb előfordulását jelzik előre. Ugyanezt valószínűsíti a WMO 2003. július 2-án az extrém éghajlati események gyakoribbá válásáról kiadott közleménye. Annak érdekében, hogy egy adott régióra az elkövetkező évtizedek, illetve a XXI. század éghajlati szélsőségeire becslést adhassunk, első lépésként meg kell ismernünk az ott eddig előfordult extrém klímaesemények tendenciáit, s a múltban feljegyzett szélsőséges éghajlati jelenségeket. Mivel a kiterjedt rendszeres műszeres mérések csupán egy-másfél évszázadra tekintenek vissza, így a hosszabb időskálájú folyamatok feltárásához a nem meteorológiai méréseken alapuló történeti források feldolgozása is szükséges. Ehhez kiindulásul szolgált Réthly Antal „Időjárás események és elemi csapások Magyarországon” című gyűjteménye (Réthly, 1962; 1970; Réthly és Simon, 1998; 1999). E négykötetes műben a szerző a közel 50 éves kutatómunka során összegyűjtött időjárás eseményekhez kapcsolódó információkat rendszerezte, kronológiailag

rendezte és adta közre. A történelmi Magyarország területéről származó feljegyzések lehetővé teszik, hogy szinte a teljes Kárpát-medence térségéről klímátörténeti információkhoz jussunk. A történelmi feljegyzések legnagyobb hányada naplórészlet, valamint uradalmi számtartók beszámolóí, elszámolásai. A kötetben nem csak közvetlenül az időjárásra vonatkozó információkat találunk, hanem különböző természeti csapásokról szóló feljegyzéseket is, pl.: járványok, áradás, sáskajárás. A négy részben kiadott mű első kötete az I. évszázadtól 1700-ig, a második 1701-től 1800-ig, a harmadik és negyedik kötet pedig 1801-től 1900-ig tartalmaznak feljegyzéseket. Időben előre haladva természetesen egyre több adat áll rendelkezésre. A négy kötetnyi több ezer oldalas információ-tömeg rendszerezésének, feldolgozásának érdekében kódrendszert vezettünk be, melyet a következő alfejezetben ismertetünk.

1.1. A Kárpát-medence múltbeli klímájának kódolása a Réthly-gyűjtemény alapján

A Réthly-kötetekben lejegyzett információk egy-egy konkrét múltbeli éghajlati esemény helyszínére, időpontjára, időtartamára vonatkoznak. A több évtizedes, évszázados skálán az időjárási paraméterek tendenciájára vagy egyes jelenségek gyakoriságára vonatkozó vizsgálatokra ebben a formában a Réthly-gyűjtemény semmiképpen nem alkalmas. Bármely legapróbb kérdésre adandó válaszhoz a teljes történelmi gyűjtemény újbóli átolvasása szükséges. A jelenlegi informatikai lehetőségeket figyelembe véve és kihasználva azokat elengedhetetlennek tűnik a szöveges információk egységes rendszerben történő kódolása. E folyamat eredményeképpen létrehozott kódolt adattömeg részletes elemzést tesz lehetővé. A rendelkezésre álló adatbáziskezelő programok segítségével gyors válasz nyerhető bármely egyváltozós és komplex éghajlati kérdésre.

1.1. táblázat: A Réthly-féle történelmi dokumentumok gyűjteményét osztályozó kódrendszer

HŐMÉRSEKLET			CSAPADÉK			SZÉL		
Meleg	10	Meleg	Nedvesség viszoznyok	40	Eső	Erősség	80	Szél
	11	Nagy meleg		41	Nagy eső		81	Nagy szél
	12	Forróság		42	Nagy esőzések		82	Szélvihar
	13	Enyhe		43	Felhőszakadás		83	Forgószél
	14	Meleg év		44	Vihar		84	Tornádó
Hideg	15	Forró nyár		45	Jégeső	Hőm. feltétel	85	Hideg szél
	20	Hideg		46	Zápor		86	Fagyos szél
	21	Nagy hideg		47	Havaseső		87	Meleg szél
	22	Hűvös		48	Ónos eső		88	Forró szél
	23	Fagy		49	Nedves	Irány	90	Északi szél
	24	Hideg év		74	Csapadékos tél		91	Erős északi szél
	25	Hűvös nyár		75	Csapadékos tavasz		92	Déli szél
	26	Szigorú hideg tél		76	Csapadékos nyár		93	Erős déli szél
	27	Hosszú tél		77	Csapadékos ősz		94	Nyugati szél
				78	Nedves év	95	Keleti szél	
			Hó	50	Havazás			
				51	Nagy hó			
		52		Hófúvás				
		53		Hóvihar				
			54	Hóban gazdag tél				
		Árvizek	60	Áradás, árvíz				
			61	Duna árvize				
			62	Tisza árvize				
			63	Dráva árvize				
			64	Száva árvize				
			65	Rajna árvize				
		Szárász	66	Szárászág				
			67	Szárász év				
		Egyéb	70	Köd				
			71	Dér				
			72	Zivatar				
			73	Villám				

A létrehozott adatbázisban helyet kapott a klimatikus esemény időpontja, időtartama, földrajzi helye, valamint a klimatikus esemény jellegét, intenzitását jellemző kód (pl.: csapadék esetén mennyisége és halmazállapota, szél esetén erőssége és iránya). Az 1.1. táblázatban bemutatjuk a történeti dokumentumok hőmérsékletre, csapadéokra és szélre vonatkozó kódhozrendelését. A meteorológiai elemenkénti osztályozás többszintű, a hőmérséklet, csapadék, szél főosztályok mellett alosztályok jelennek meg: (i) a hőmérsékletnél a meleg és hideg alosztályok alá rendre 6 illetve 8 altípus tartozik; (ii) a csapadéknál öt alosztályt definiáltunk: a nedvességi viszonyok, hó, árvizek, szárazság, egyéb csapadékhöz kapcsolódó események alapján rendre 15, 5, 6, 2, 4 altípussal; (iii) a szélnél három alosztályban (erősség, hőmérsékleti feltételek, irány kiemelésével) 5, 4 illetve 6 altípust különítettünk el.

A különböző meteorológiai elemekre vonatkozó történeti dokumentumok, s az események feljegyzési gyakorisága jelentősen eltér egymástól: a hőmérséklettel kapcsolatosan 3820 dokumentum, a csapadéokra vonatkozóan 10046 feljegyzés, a széllel kapcsolatban pedig 1321 írott forrás állt rendelkezésre.

1.2. táblázat: Példa a történelmi dokumentumok alapján létrehozott kódtáblázatra

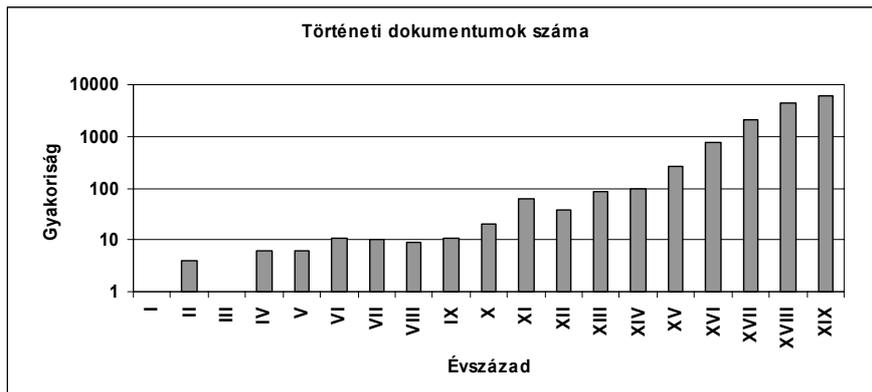
Meteorológiai elem	Kezdési év	Kezdési hónap	Befejezési év	Befejezési hónap	Település	Földrajzi szélesség (É)	Földrajzi hosszúság (K)	Régió	Esemény	Megjegyzés	Következmény
2	1267	0	1268	0	319	47,5	19,1	22	61	0	0
2	1346	0	0	0	15	46,2	21,3	24	67	0	0
3	1526	11	0	0	224	49,0	20,7	44	82	0	0
2	1561	0	0	0	361	47,7	16,6	12	67	0	17
1	1684	2	0	0	409	47,2	20,2	23	21	0	55
2	1718	6	0	0	56	47,5	19,0	15	66	0	70
2	1812	13	0	0	77	47,5	21,6	25	45	2	0
1	1821	2	1821	3	56	47,5	19,0	15	20	0	0
2	1833	5	0	0	197	46,7	23,6	33	40	2	0
1	1866	5	0	0	454	47,8	19,1	21	23	1	14;23

Az 1.2. táblázatban példákat látunk a kódolás menetére, s közvetlenül követhetjük néhány történelmi éghajlati eseménynek a megfelelő alosztályokba való besorolását. A táblázat első sora például az 1267/68-as dunai árvízről szóló feljegyzést rögzíti Pest körzetében (az 1.2. táblázatban e sort szürke háttérrel kiemeltük). Részletezve:

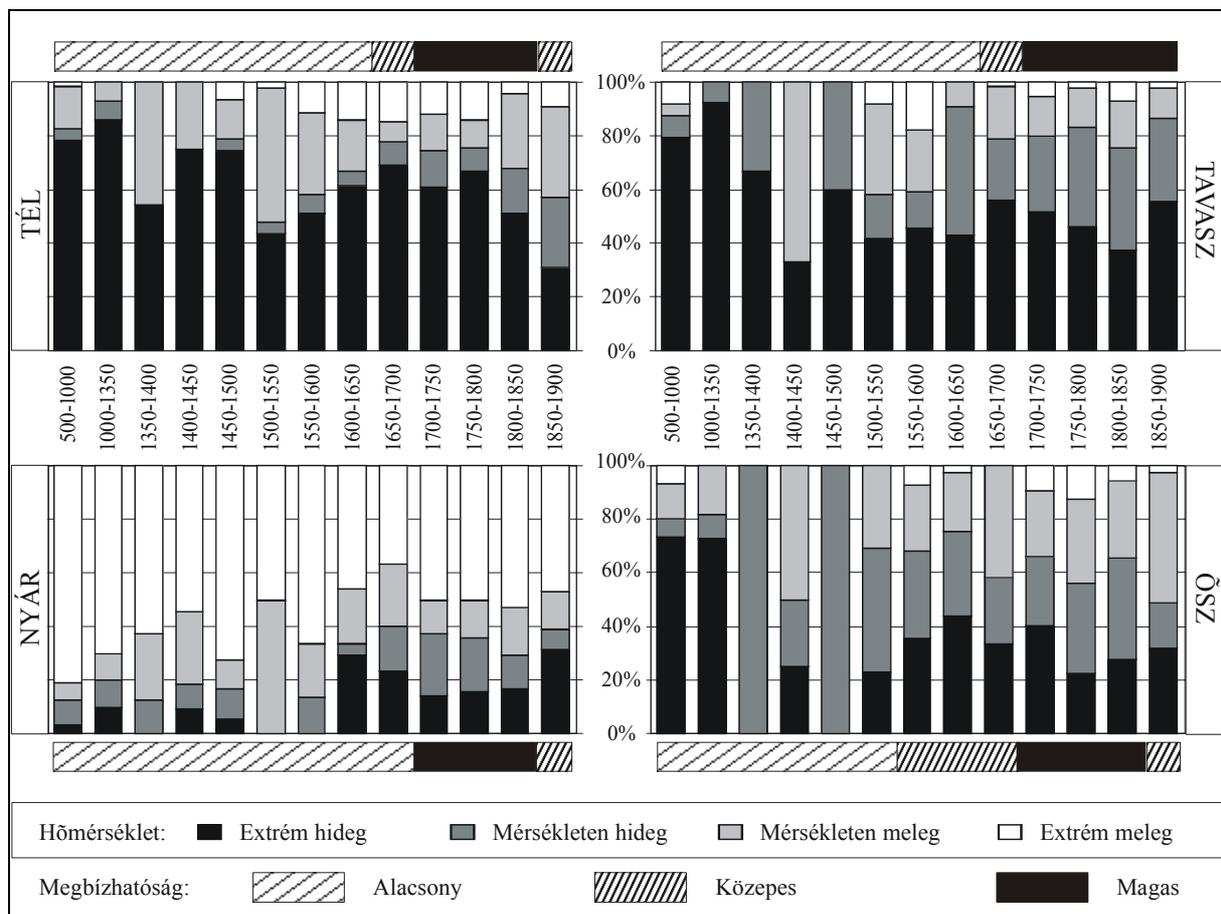
- Az 1. oszlopban az éghajlati esemény által érintett meteorológiai elem kódosztálya szerepel (a fenti példában 2-es kód: csapadék).
- A 2-3. illetve 4-5. oszlopokban a jelzett szélsőség kezdő és befejező éve/hónapja szerepel (példánkban 1267-1268-as évek).
- A 6-9. oszlopok a földrajzi beazonosítást szolgálják, a település sorszámát (319-es kód: Pest), földrajzi szélességét (47,5°É) és hosszúságát (19,1°K), valamint a régió kódját (22-es kód: Nyugat-Alföld-i régió) tartalmazzák.
- A 10. oszlop az I. táblázatban bemutatott eseménykódot (61: Duna árvize), míg a 11. oszlop a Megjegyzés rovatot jelöli (az utóbbinál lehetőség van az esemény intenzitásának jelzésére). Végül a 12. oszlop tartalmazza az éghajlati történés következményének kódját (pl.: nagy csapadéknak egy lehetséges következménye az árvíz, vagy nagy hidegnek a termés elfagyása, illetve éhínség, járványok).

1.2. A Kárpát-medence klímájának múltja, éghajlati tendenciák, idősorrekonstrukció

Az írásos anyagok kódolásával előállt egy számítógéppel jól kezelhető adatbázis, mely alapján az elmúlt másfél évezred éghajlatáról vonhatunk le következtetéseket. A feljegyzések térbeni és időbeni sűrűsége jelentős változékonyságot mutat. Az első évezred történelmi dokumentumai főleg nagyobb árvizekről, szárazságokról, éhínségről, feketehimlő-járványról számolnak be, mely események nem egy-egy településhez kötődnek, hanem nagy térségekhez, hosszabb időintervallumokhoz. Ebben az időszakban a feljegyzések átlagos száma évszázadonként nem haladja meg a 10-et (1.1. ábra). Az első ezredfordulót követő időszakban az információk száma és területi sűrűsége jelentős növekedésnek indul, s a dokumentumok száma fokozatosan egy, kettő, majd közel három nagyságrenddel megnő.



1.1. ábra: A történelmi források időbeni gyakoriság növekedése (logaritmus-skálán ábrázolva)

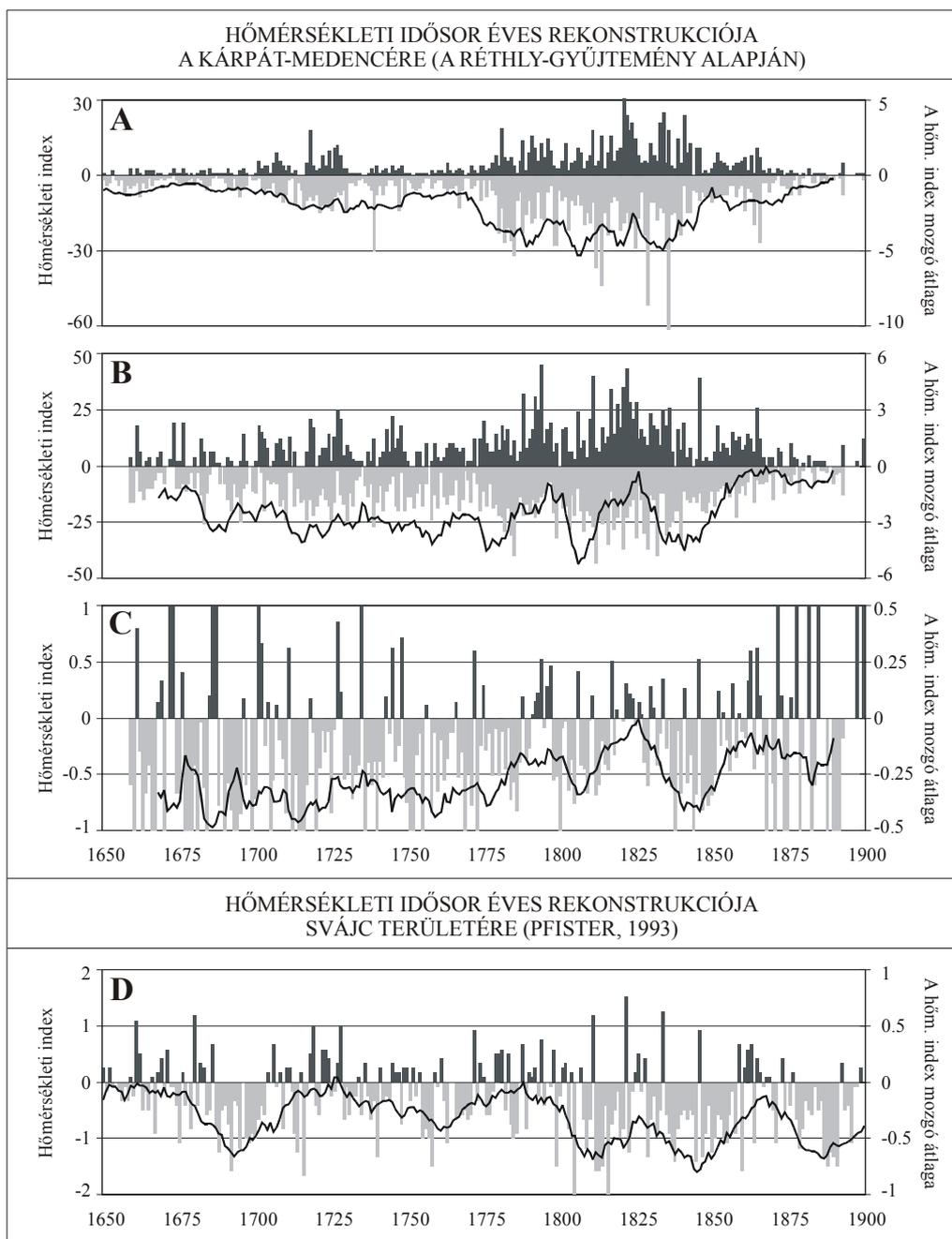


1.2. ábra: A történelmi források alapján készített extrém és mérsékelt hőmérsékleti viszonyok 50 évenkénti relatív gyakorisága a négy évszakra

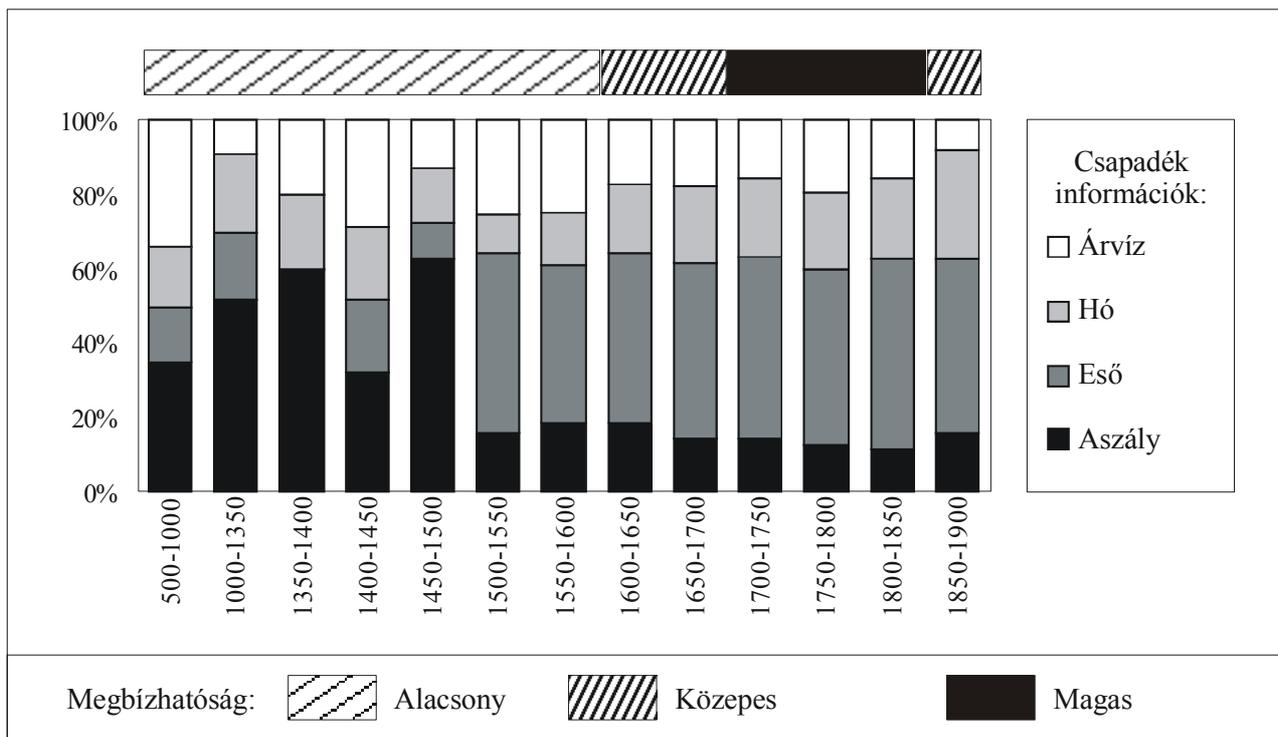
Külön-külön vizsgáltuk a hőmérsékletre, a csapadékra, és a szélre vonatkozó információkat. A hőmérséklet 14 alosztályát besoroltuk az extrém hideg, mérsékelt hideg, mérsékelt meleg, s extrém meleg kategóriákba, s ezek gyakorisági eloszlásait mutatjuk be az 1.2. ábrán az 500-1900 közötti időszakban. Évszakonként rendre összesen 1797 (december-január-február), 1050 (március-április-május), 751 (június-július-augusztus), 571 (szeptember-október-november) feljegyzésből indulhattunk ki. A nagyon ingadozó gyakorisági értékek miatt külön értelmeztük az adott időintervallum megbízhatóságát, melyet három kategóriával jellemeztünk: alacsony, közepes, és magas. Az 1.2. ábra legalsó, jelmagyarázat sorában feltüntetett megbízhatósági index definíciója során az 50 éves időszakok átlagát (m) és szórásértékét (s) felhasználva különítettük el az alacsony ($<m-0,3\cdot s$), közepes ($m-0,3\cdot s$ és $m+0,3\cdot s$ közötti), magas ($>m+0,3\cdot s$), kategóriákat. A három színárnyalattal jelölt megbízhatósági indexek idősorait az évszakai diagrammok alá illetve fölé helyezett szalagos formában jelenítjük meg. Az ábráról leolvasható a hőmérsékleti szélsőségek jelentős évszakai függősége. Télen az extrém hideg feljegyzések dominálnak (általában több mint az összinformáció fele tartalmaz ilyeneket), az átmeneti évszakok is hasonló eloszlást mutatnak, csak itt az extrém hidegek mellé a mérsékelt hideg eseményekről szóló feljegyzések is nagyobb gyakorisággal zárkoznak fel. A nyár teljesen eltér a többi évszaktól, mivel ekkor az extrém meleg éghajlati állapotokat leíró dokumentumok adják az összinformáció több mint felét. Az 1500-as évek meleg epizódja jól kivehető mind a négy évszakban, bár ezek a nyári időszakban jelentkeznek a legintenzívebben. A kis jégkorszak után, a XVIII. században induló felmelegedés a történeti feljegyzések gyakorisági adatai alapján a téli évszakban tűnik a legerősebbnek.

A teljes Kárpát-medencére összegezzük a hőmérséklethez kapcsolódó feljegyzések időrendi információit az 1.3. ábra diagramjai segítségével. A vizsgálatot az 1650-1900-as időszakra végeztük el, s a nagyon kis számú feljegyzést tartalmazó 1650 előtti időszakot itt elhagytuk. Az 1.3. ábra A, B és C része az adatsor rekonstrukciós kísérleti szakaszait és végeredményét ábrázolja, egy ún. éves hőmérsékleti index bevezetésével. Az A idősor a hideg és meleg klímaállapotot jelentő gyakorisági értékeket mutatja be hisztogram formájában (a pozitív és negatív értékek rendre a meleg illetve hideg éghajlatra utalnak), a folytonos vonal a simított 20 éves mozgó átlagokat jelöli. A B részben az intenzitással (-3 és +3 közötti értékkel) súlyozott meleg/hideg éghajlati események gyakoriságait láthatjuk a pozitív/negatív irányban ábrázolt hisztogramokon, továbbá a simított idősoron a 20 éves mozgó átlagokat ábrázoltuk. Az intenzitással súlyozott éves hőmérsékleti indexek normalizált változata látható a C részben, ugyanazzal a simítással, mint az A és B esetben. A D részben összehasonlításképpen a Pfister (1993) által Svájc területére összeállított GTI (Graduated Temperature Index, azaz súlyozott hőmérsékleti index) idősort mutatjuk be, ahol szintén (-3 és +3 közötti) súlytényezőt alkalmaztak. Ezt a svájci idősort ún. proxy adatokkal és műszeres mérésekkel kalibrálták, ahol a referencia időszak 1901-1960 volt. A Kárpát-medencére és Svájc területére vonatkozó hőmérsékleti index idősorok összehasonlításakor megállapíthatjuk, hogy bár a két térség távolsága miatt éves skálán általában nem találunk azonos tendenciákat, de a 20 éves mozgó átlagok jelentősebb melegedő és hűlő periódusai jó egyezést mutatnak (pl.: az 1800-10 közötti és 1840-50 közötti hideg időszakok, vagy az 1820-30 és az 1865-75 meleg időszakok).

A hőmérsékletre és a csapadékra vonatkozó történeti feljegyzéseket összehasonlítva azt tapasztaltuk, hogy az utóbbiról közel háromszor annyi feljegyzés áll rendelkezésre a Réthly gyűjteményben.



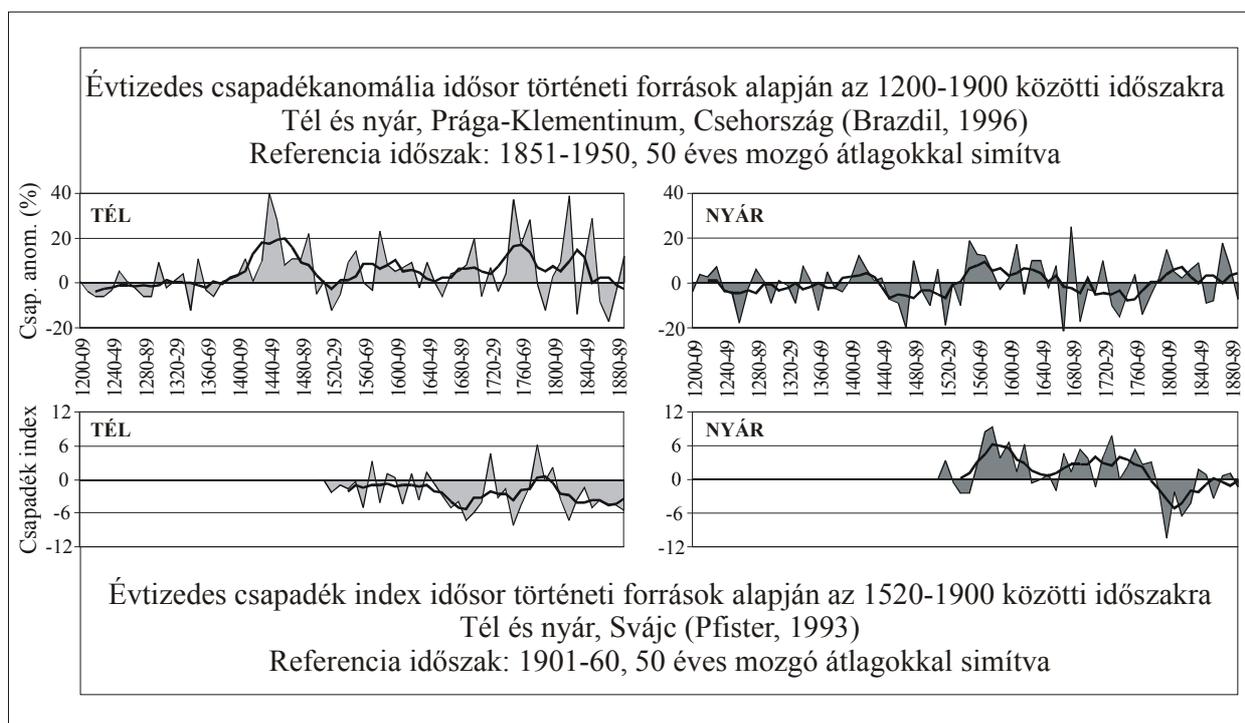
1.3. ábra: Történeti források alapján számított éves hőmérsékleti indexek, valamint a 20 éves mozgó átlagok időszora az 1650-1900-as időszakra. A: Meleg és hideg éghajlati eseményt jelentő feljegyzések gyakorisági értékei a Kárpát-medencére a Réthly-gyűjtemény alapján. B: A feljegyzett meleg és hideg éghajlati viszonyok hőmérsékleti index időszora az események intenzitásának figyelembe vételével. C: Az összes hőmérsékleti feljegyzés száma szerint normalizált hőmérsékleti index értékek. D: Hőmérsékleti index idősor Svájc területére (Pfister, 1993) – leírást ld. a szövegben



1.4. ábra: A történeti források alapján készített csapadékviszonyok 50 évenkénti relatív gyakorisága a Kárpát-medencében 500-1900 között. A megbízhatóság az adott 50 éves időszakban rendelkezésre álló összes információ mennyiségét reprezentálja.

Az 1.2. ábrán bemutatott hőmérsékleti információk elemzéséhez hasonlóan a csapadéokra vonatkozó feljegyzések időbeli vizsgálatát is elvégeztük éves illetve évszakos bontásban egyaránt. Ebben a cikkben csak a teljes évre vonatkozó elemzést mutatjuk be (1.4. ábra). A csapadék 32 alosztályából (1.1. táblázat) elhagytuk az egyéb kategóriába sorolt köd, dér, zivatar, villám információkat, s a maradékot besoroltuk a következő négy osztály egyikébe: árvíz, hó, eső, aszály. E négy fő csoport 50 évenkénti relatív gyakoriságait mutatja be a Kárpát-medence térségére az 1.4. ábra. A hőmérséklethez hasonlóan a feljegyzések időbeni egyenlőtlen eloszlása miatt a diagram első két oszlopa itt is az 500-1000 és 1000-1350 közötti időszakokat jellemzi, míg a hisztogram többi oszlopa 50 éves periódusokat fed le. Az ábráról leolvasható, hogy az 1500-as évekig az extrém események (aszályok, árvizek) dominálnak, a csapadéokra vonatkozó feljegyzések mintegy 69%-a sorolható ide, míg ezután e két kategória mindösszesen az információk mintegy 33%-át adja. Megemlítjük, hogy a történeti feljegyzések természeténél fogva valószínűleg az árvizek és aszályok túlréprezentáltak a Réthly-gyűjteményben, mivel ezek társadalmi-gazdasági hatásai nagyon erősek lehettek (éhezés, éhínség, járványok, stb.). Ugyanakkor a meteorológiai szempontból jelentős heves havazás, hosszan tartó nedves vagy szeles időszak a krónikások nézőpontjából nem tűnt annyira jelentősnek. Ennél az ábrázolásnál is megtalálhatjuk a fentebb említett három megbízhatósági kategóriát.

Néhány más történeti forrásra támaszkodó csapadék idősor rekonstrukciós kísérletet – *Brázdil* (1996) és *Pfister* (1993) – az 1.5. ábra mutat be. Az előbbi az 1200-1900-as idősokra (1851-1950 referencia periódussal), míg az utóbbi (*Pfister*, 1993) az 1520-1900-as idősokra (1901-1960 referencia periódussal) készült. Az ábrán a téli és nyári idősokra vonatkozó prágai Klementinum (Csehország) és Svájc tízévekre átlagolt csapadékindex idősorai láthatók. Még az évtizedekre átlagolt időskálán is jelentős különbségek figyelhetők meg a két rekonstruált csapadékidősor tendenciái között, mely többféle okkal magyarázható: (1) a két terület földrajzi távolságával, (2) a referencia időszakok eltéréseivel, (3) a két szerző által használt nagyon eltérő csapadék-index értelmezéssel (*Pfister et al.*, 1994).



1.5. ábra: Történeti forrásokra támaszkodó téli és nyári csapadék idősor rekonstrukciók két európai régióra (Csehországra: *Brazdil* (1996), Svájcra: *Pfister* (1993) alapján)

Összefoglalva a Réthly gyűjtemény feldolgozása során szerzett tapasztalatainkat, az 1.3. táblázatban olvashatók a klímakutatások szempontjából a történeti feljegyzések elemzésében és felhasználásában rejlő lehetőségek és korlátozó tényezők. A múlt éghajlatának vizsgálatokor a táblázatban összegzett pontok mindegyikét szem előtt kell tartanunk. Figyelembe kell vennünk, hogy a feljegyzések sora sem térben, sem időben nem tekinthető homogénnek. Mivel a történeti források dokumentációjában a lejegyzőnek lényeges szerepe van, ezért a szubjektív megítélés, valamint a szokásos viszonyoktól, az átlagostól vett eltérő éghajlati, időjárási viselkedés kiemelkedő fontosságúvá válik. Ebből adódik az extrém, szélsőséges időjárási események rendkívül jó elemezhetősége is a történelmi feljegyzések segítségével. Az általunk kidolgozott és ebben a cikkben bemutatott kódrendszer alkalmazásával jelentősen könnyebbé válik a Kárpát-medencéről rendelkezésre álló történeti forrásokból kinyerhető éghajlati információk részletes elemzése (Bartholy et al., 2004).

1.3. táblázat: A történeti feljegyzések elemzésében rejlő előnyök és hátrányok

Lehetőségek	Korlátok
<ul style="list-style-type: none"> + Éghajlati információforrás a meteorológiai mérések megkezdése előtti időszakról + A társadalmat legjobban érintő extrém eseményekről szólnak elsődlegesen ezek a feljegyzések + A meteorológiai extrém események különösen jól dokumentáltak (pl.: árvizek, viharok, stb.) + Tetszőlegesen kiválasztott időszakokra lehetséges az extrém időjárási paraméter területi összehasonlító elemzése + Idősoranalízis a kódolt adatbázison (a digitalizált adatok lehetővé teszik a felmerülő hipotézisek objektív ellenőrzését) 	<ul style="list-style-type: none"> – A vizsgálatok eredményeinek értékelésénél nagyon körültekintőnek kell lenni – Szubjektív és relatív információk (különböző források összevonásával készült a gyűjtemény, nem pedig jól definiált standard alapján) – Az adatok időben nem tekinthetők homogén eloszlásúnak – Az adatok térben sem tekinthetők homogénnek (gyakran a területek adatokkal való lefedettsége elsődlegesen a népsűrűségtől függ)

2. Magyarország éghajlati extrémumainak elemzése extrém indexek felhasználásával -- Hőmérséklet

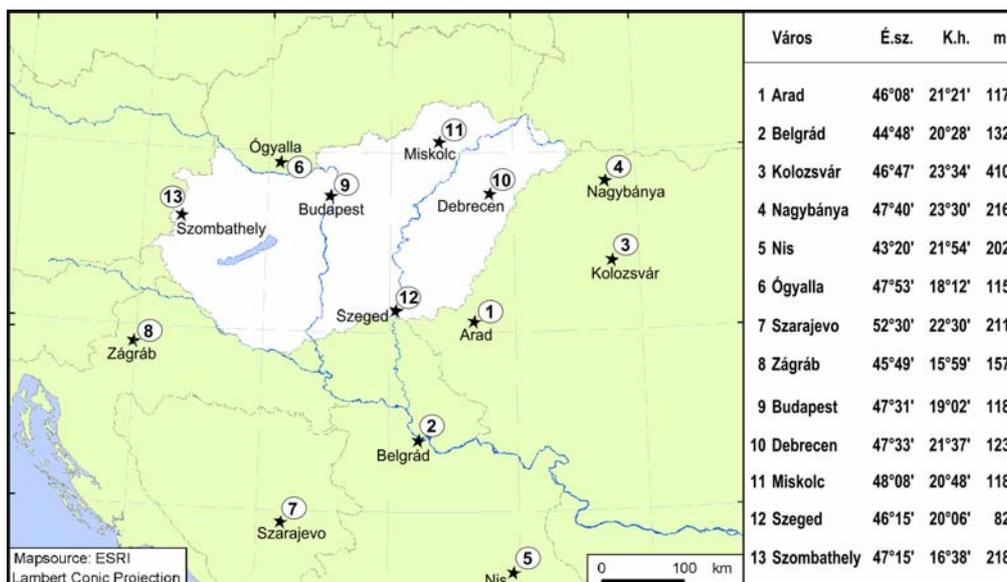
E beszámolómban a napi maximum-, minimum- és középhőmérsékletek alapján definiált extrémindexek tendenciáit elemezzük a XX. század második felére, melyhez az 1990-es évek végén nemzetközi összefogással alakult WMO-CCI/CLIVAR munkacsoport ajánlásait vettük figyelembe. A vizsgálatainkban szereplő hőmérsékleti extrémindexek a következők: éves hőmérsékleti ingás (ETR), vegetációs periódus hossza (GSL), hőhullám hossza (HWDI), hideg napok aránya (Tx10), meleg napok aránya (Tx90), hideg éjszakák aránya (Tn10), meleg éjszakák aránya (Tn90), fagyos napok száma (FD), nyári napok száma (SU), hőségnapok száma (Tx30GE), forró napok száma (Tx35GE), túl meleg éjszák száma (Tn20GT), téli napok száma (Tx0LT), zord napok száma (Tn-10LT). A Kárpát-medencére vonatkozó trendelemzések alapján a XX. század második felében eleinte (1975-ig) több hűlést mutató paramétert találunk, azonban az utolsó negyedszázadra egyértelműen a melegedés a jellemző.

2.1. Bevezetés

A XIX. század második felétől kismértékű globális melegedés figyelhető meg, mely hatására az éves felszín-közeli középhőmérséklet napjainkra $0,7^{\circ}\text{C}$ -kal emelkedett (IPCC 2001). Ennek az antropogén eredetű hőmérsékletváltozásnak már vannak kimutatható hatásai a különböző társadalmi és ökológiai rendszerekre. Az átlaghőmérsékletek eltolódásával együtt jár az időjárási szélsőségek gyakoriságváltozása, melynek hatványozott következményei lehetnek. Az 1997-ben Asheville-ben megrendezett *Éghajlati extrémumok indexei és indikátorai* című munkakonferencián (Karl et al. 1999), majd az ezt követően megalakult WMO-CCI/CLIVAR munkacsoport működése során (Peterson et al. 2002) a szakemberek a szélsőséges időjárási események jellemzésére közel harminc extrémindexet definiáltak. Így vált lehetővé az éghajlati extrémumok változékonyságának illetve tendenciáinak globális (Frich et al. 2002) és regionális (Klein Tank et al. 2002a; 2002b; Klein Tank és Können 2003) vizsgálata. Ezeket az indexeket felhasználva végeztük a hőmérsékletre vonatkozó összehasonlító elemzéseinket az egész Földre, Európára és a Kárpát-medencére (Bartholy és Pongrácz 2005a; 2006).

2.2. Adatok

E beszámolóban a napi maximum-, minimum- és középhőmérsékletek alapján definiált extrémindexek idősorainak évtizedes tendenciáit elemezzük a Kárpát-medence térségére. A vizsgálatainkhoz felhasznált 13 hazai és külföldi állomás elhelyezkedését, földrajzi paramétereit a 2.1. ábrán mutatjuk be. Az általunk összeállított adatbázisban a nyolc külföldi állomás adatsorainak forrása a szabad hozzáférésű európai idősorokat tartalmazó ECA (Klein Tank 2003) adatbázis, míg az öt hazai állomás adatsorai az Országos Meteorológiai Szolgálat Archívumából származnak. Az állomások válogatásánál két szempontot vettünk figyelembe: teljesüljön a domborzati és éghajlati homogenitási viszonyokhoz igazított relatívan egyenletes területi lefedettség, valamint a kiválasztott idősorokban lehetőleg minimális legyen az adathiány. Adatbázisunkba a napi maximum-, minimum- és középhőmérséklet idősorokat az 1961-2001 időszakra gyűjtöttük össze.



2.1. ábra. A Kárpát-medencére vonatkozó extrémindex elemzéshez használt állomások földrajzi elhelyezkedése, paraméterei

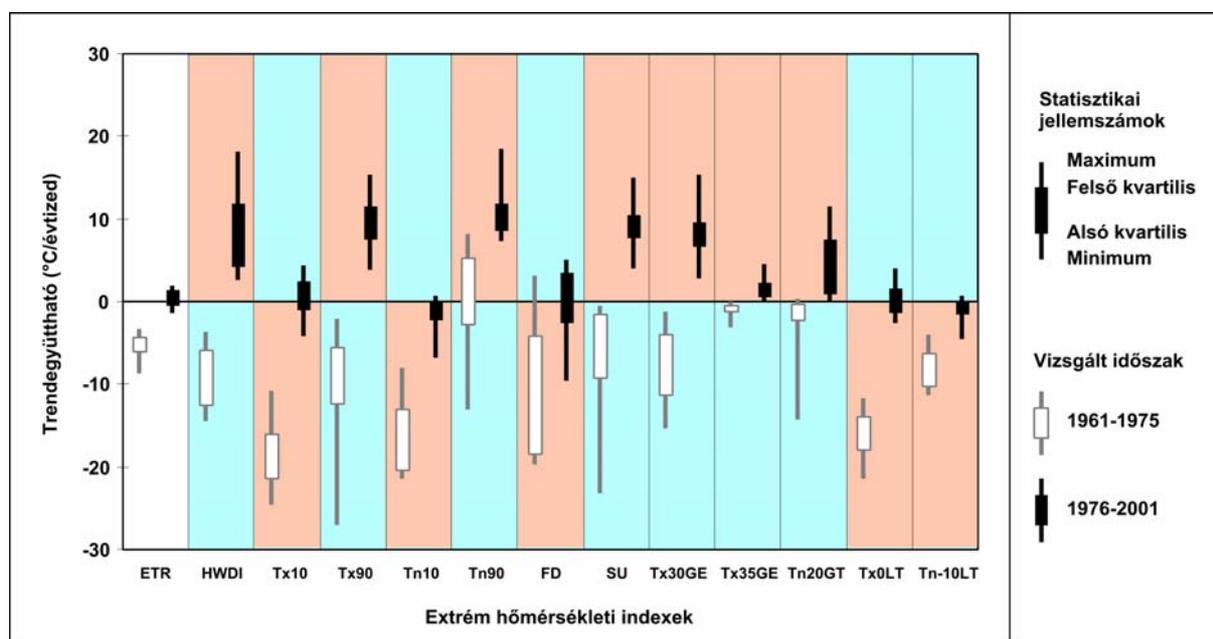
A 2.1. táblázatban foglaljuk össze a WMO-CCI/CLIVAR extrémindex munkacsoport ajánlásában szereplő fontosabb hőmérsékleti extrémindexek definícióit, melyeket elemzéseink során mi is vizsgáltunk.

2.1. táblázat. A hőmérsékleti extrémindexek definíciója, jele.

Jelölés (ECAD)	Az extrémindex definíciója
ETR	Éves hőmérsékleti ingás (az év során mért $T_{max}-T_{min}$)
GSL	Vegetációs periódus hossza (kezdet: amikor >5 napon át $T > 5^{\circ}\text{C}$, vége: amikor >5 napon át $T < 5^{\circ}\text{C}$)
HWDI	Hőhullám hossza (min. 5 egymást követő napon át $T_{max} = T_{max}^N + 5^{\circ}\text{C}$, ahol T_{max}^N az 1961-90-es normálidőszak átlagos T_{max} értéke)
Tx10	Hideg napok aránya ($T_{max} <$ az 1961-90-es normálidőszak napi maximum-hőmérsékleteinek alsó decilise)
Tx90	Meleg napok aránya ($T_{max} >$ az 1961-90-es normálidőszak napi maximum-hőmérsékleteinek felső decilise)
Tn10	Hideg éjszakák aránya ($T_{min} <$ az 1961-90-es normálidőszak napi minimum-hőmérsékleteinek alsó decilise)
Tn90	Meleg éjszakák aránya ($T_{min} >$ az 1961-90-es normálidőszak napi minimum-hőmérsékleteinek felső decilise)
FD	A fagyos napok száma ($T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$)
SU	Nyári napok száma ($T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$)
Tx30GE	Hőségnapok száma ($T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$)
Tx35GE	Forró napok száma ($T_{max} \geq 35^{\circ}\text{C}$)
Tn20GT	Túl meleg éjjelek száma ($T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$)
Tx0LT	Téli napok száma ($T_{max} < 0^{\circ}\text{C}$)
Tn-10LT	Zord napok száma ($T_{min} < -10^{\circ}\text{C}$)

2.3. A Kárpát-medencére számított hőmérsékleti extrém indexek tendenciái

Mind a középhőmérsékletek, mind az extrém hőmérsékleti paraméterek idősorait tanulmányozva (Pongrácz és Bartholy 2000) szembevetve a hetvenes évek közepétől napjainkig jelentkező erős melegedő tendencia. Ezért a hőmérsékleti extrémindexek tendencia-vizsgálatait a teljes 1961-2001-es időszakon kívül annak két részidőszakára (1961-1975, 1976-2001) is elvégeztük. Ezeket foglaljuk össze a 2.2. ábrán, ahol az állomások hőmérsékleti extrém index idősorainak évtizedes trendegyütthatóit alapján a maximális és minimális értékeket, valamint a felső és alsó kvartilis értékeit tüntetjük fel. A különböző extrémindexek esetén az eltérő előjelű trendegyütthatók is utalhatnak melegedésre. Például a hideg napok arányának csökkenése (negatív tendencia), s a hőség napok számának növekedése (pozitív tendencia) egyaránt melegedést jelez. Ezért a 2.2. ábrán rendre piros, illetve kék háttérrel jelöltük a melegedésre és a hűlésre utaló tendenciákat. Fehér háttérrel alkalmaztunk az ETR index (éves hőmérsékleti ingás) esetén, mivel itt sem a pozitív, sem a negatív trend nem utal melegedésre vagy hűlésre.

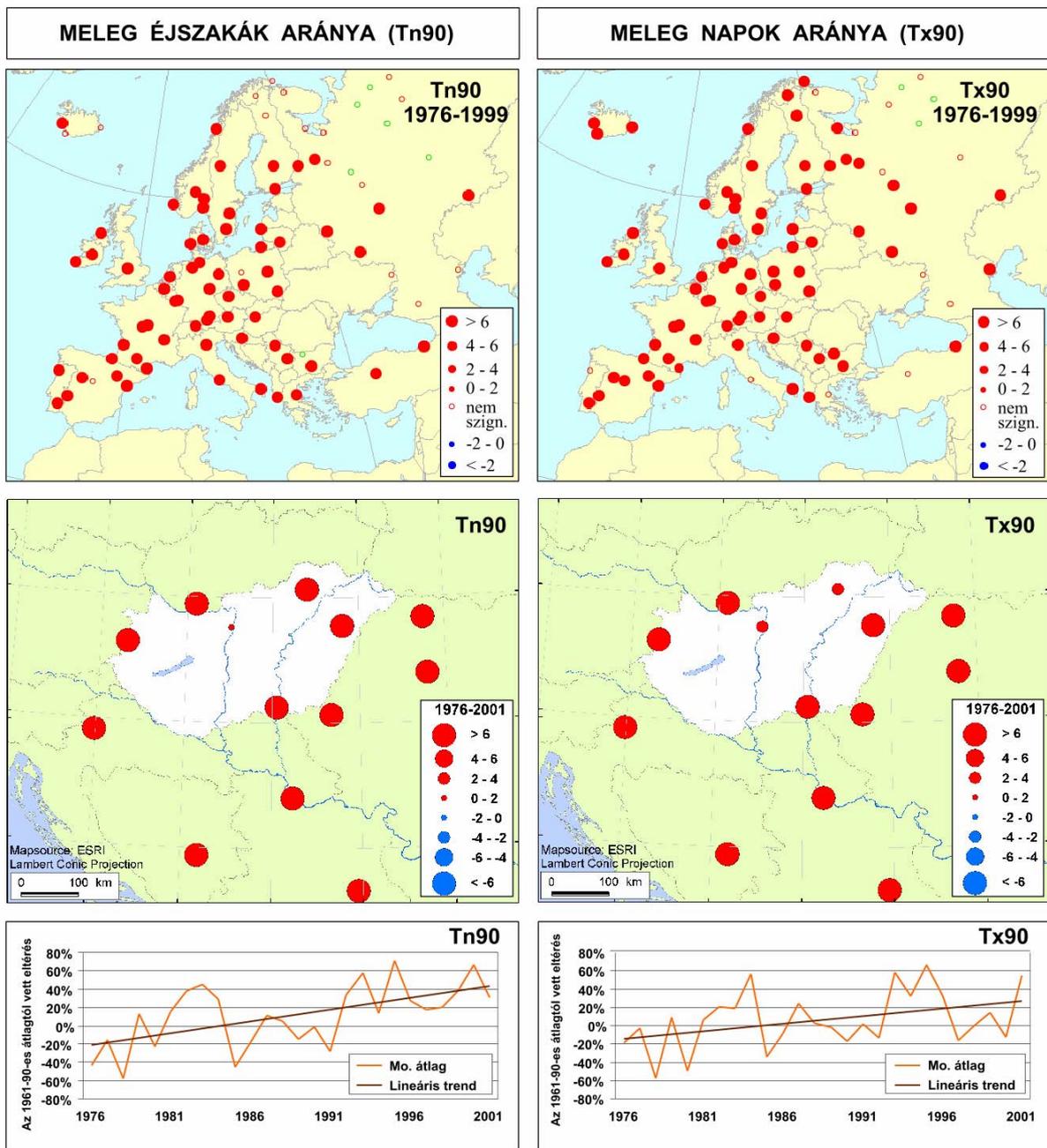


2.2. ábra. A Kárpát-medencére vonatkozó extrémindexek állomásonkénti trendegyütthatóinak eloszlása az 1961-1975 és az 1976-2001 időszakban. A piros háttérű színezés a melegedésre, míg a kék háttér a hűlésre utal.

A vizsgált extrémindexek nagy többségére a teljes negyven évet tekintve melegedésre utaló tendenciák a jellemzőek (Bartholy és Pongrácz 2006). Az extrémindexek többségénél (HWDI, Tx90, SU, Tx30GE, Tx35GE, Tn20GT) a hetvenes évek közepéig hűlésre utaló tendenciák érvényesültek, majd ezt követően napjainkig melegedést regisztrálhatunk. Regionális átlagban csupán két index esetén (Tx10, Tx0LT) jelent meg ezzel ellentétes viselkedés, vagyis az 1961-1975-ös időszakban melegedő, s az 1976-2001-es időszakban hűlő trend. Ez utóbbi hűlés mértéke azonban csekély. Négy index esetében a teljes vizsgált időszakban, s a két részidőszakban egyaránt nagyrészt melegedést jelző trendeket találtunk. Ez a Tn10 (hideg éjszakák aránya), Tn-10LT (zord napok száma), FD (fagyos napok száma) indexek esetén csökkenő tendenciát jelent, míg a Tn90 (meleg éjszakák aránya) paraméternél növekvő gyakoriságot.

Az utolsó negyedévszázad erősen melegedő szakaszát vizsgáljuk a továbbiakban. Összehasonlítjuk, s néhány extrém-index esetén térképen is megjelenítjük ezen időszak állomásonkénti tendenciáit Európára, illetve a Kárpát-medence térségére.

2.3. ábra. Az utolsó negyedszázadban a meleg éjszakák arányában (Tn90) illetve a meleg napok arányában (Tx90)

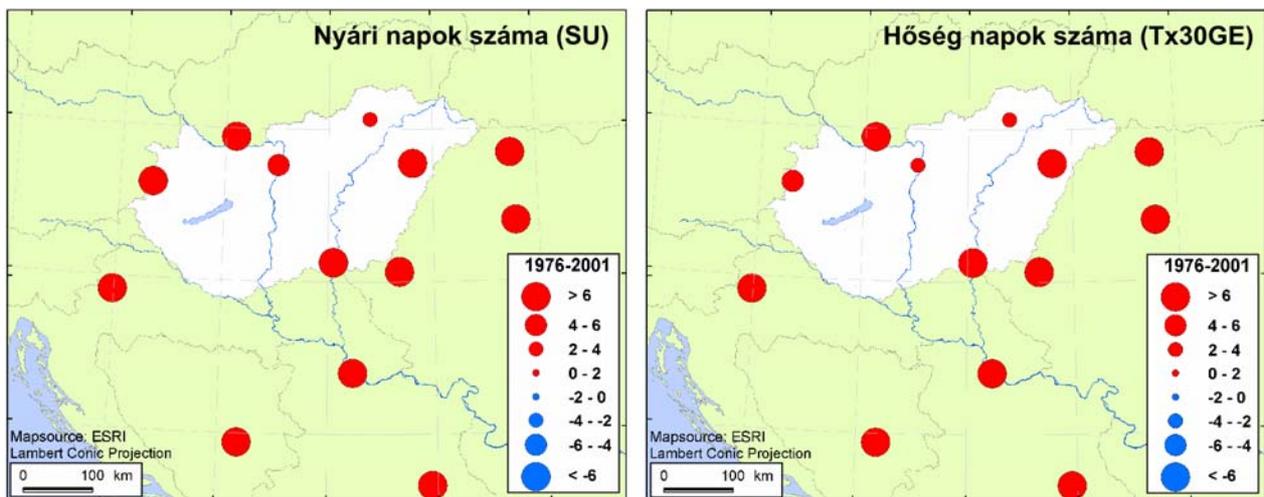


nap

k arányában (Tx90) megjelenő tendenciák Európában és a Kárpát-medencében.

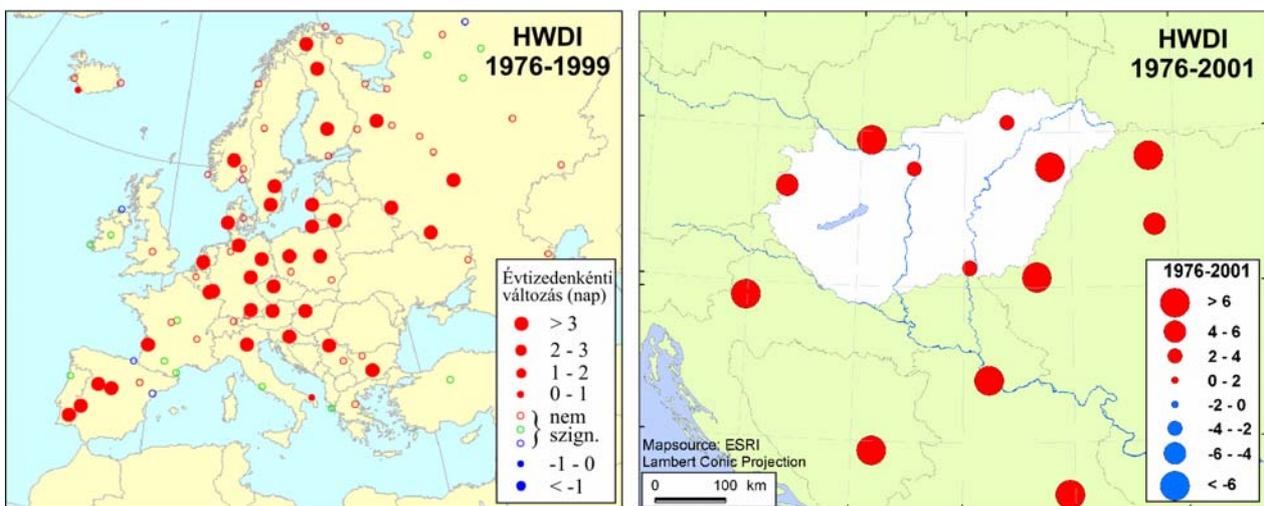
o

A meleg éjszakák (Tn90) és a meleg napok (Tx90) arányait jellemző indexek évtizedes tendenciáit jelenítettük meg Európára és a Kárpát-medencére a 2.3. ábra felső és középső részén. A Tn90 és Tx90 paraméterek ábrázolásakor a térképeken az állomásokhoz helyezett körök színe és mérete rendre a minimum- és maximumhőmérsékletek felső deciliseit meghaladó esetek tendenciáit jelölik. Látható, hogy egyik térképen sem találunk egyetlen hűlő tendenciáit mutató (azaz késsel jelzett) állomást. Az ábra alsó két grafikonja is az indexek időbeni monoton növekedését mutatja.



2.4. ábra. A nyári napok ($T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$) illetve a hőség napok ($T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) számának növekvő tendenciái a Kárpát-medencében 1976-2001 között.

A nyári időszak napi maximumhőmérsékleteinek alakulását három extrémindex követi: (1) nyári napok száma (SU: $T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$), (2) hőségnapok száma (Tx30GE: $T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$), (3) forró napok száma (Tx35GE: $T_{max} \geq 35^{\circ}\text{C}$). Ezek az indexek mind a teljes 1976-2001-es, mind az 1976-2001-es időszakban növekedő tendenciájúak, s a kezdeti 1961-1975-ös időszakban negatív trendűek (2.2. ábra). A Kárpát-medence állomásonkénti évtizedes tendenciáit térképes formában a nagyobb esetszámú SU és Tx30GE indexekre mutatjuk be a 2.4. ábrán az 1976-2001-es időszakra. Az erős növekedő tendencia (általában évtizedenként több mint 6 napos nagyságrenddel) egyik állomáson sem vitatható egyik paraméter esetén sem.



2.5. ábra. A hőhullámok hosszának (HWDI) tendenciái Európában és a Kárpát-medencében az utolsó negyedszázadban.

A növekvő évtizedes trend a 2.5. ábrán bemutatott hőhullámok hossza (HWDI) hőmérsékleti extrém-index esetén is egyértelmű. Mégis az európai térképen az eddigi paraméterekhez képest sokkal több nem szignifikáns állomás jelenik meg. A jelenség pontos magyarázata nem ismert, de feltételezhető, hogy összefügg a hőhullám időszakok definíciójával. Ugyanis míg a kontinentális területeken megfelel az átlagos napi maximum-hőmérsékletet 5°C -kal meghaladó küszöbérték, addig az óceán közeli illetve a pólushoz közeli területek kisebb napi ingása talán 5°C -nál kisebb értéket igényelne.

2.4. Konklúzió

E cikkben a Kárpát-medence hőmérsékleti extrém indexeinek összehasonlító elemzését mutattuk be a XX. század második felére. Vizsgálataink során a következő extrém indexek tendenciáját tanulmányoztuk: éves hőmérsékleti ingás (ETR), vegetációs periódus hossza (GSL), hóhullám hossza (HWDI), hideg napok aránya (Tx10), meleg napok aránya (Tx90), hideg éjszakák aránya (Tn10), meleg éjszakák aránya (Tn90), fagyos napok száma (FD), nyári napok száma (SU), hőségnapok száma (Tx30GE), forró napok száma (Tx35GE), túl meleg éjjelek száma (Tn20GT), téli napok száma (Tx0LT), zord napok száma (Tn-10LT). A csapadéktól eltérően – ahol a tendenciák előjele és nagysága jelentős területi változékonyságot mutat (Bartholy és Pongrácz 2005a) – a hőmérsékleti extrém indexek globális és európai trendjei általában egyeznek. Az alábbiakban összefoglaljuk a XX. század éghajlati tendenciáit elemző vizsgálataink alapján kapott eredményeinket.

(1) A Kárpát-medence térségében a XX. század időszakában vizsgált hőmérsékleti extrém indexek nagy többségére a teljes negyven évet tekintve melegedésre utaló tendenciák a jellemzőek (kivéve a HWDI-t).

(2) A XX. század második fele két egymástól eltérő tendenciájú időszakra bomlik: 1961-1975 és 1976-2001. Az extrémindexek többségénél (HWDI, Tx90, SU, Tx30GE, Tx35GE, Tn20GT) a hetvenes évek közepéig hűlésre utaló tendenciák érvényesültek, majd ezt követően napjainkig melegedést regisztrálhatunk.

(3) A Kárpát-medence térségének egyik állomásán sem vitatható egyik extrém hőmérsékleti paraméter esetén sem az erős növekedő tendencia. A legintenzívebb növekedési arányokat (általában évtizedenként több mint 6 napos nagyságrenddel) a meleg éjszakák aránya (Tn90), a meleg napok aránya (Tx90), a nyári napok száma (SU), a hőségnapok száma (Tx30GE) és a hóhullámok hossza (HWDI) indexeknél találtunk.

3. Magyarország éghajlati extrémumainak elemzése extrém indexek felhasználásával -- Csapadék

A globális felmelegedés következtében a szélsőséges éghajlati események regionális skálán bekövetkező gyakorisági vagy intenzitásbeli változásai lényeges szerepet játszanak az éghajlati rendszer ökológiai és társadalmi rendszerekre gyakorolt hatásaiban. Így a klimatológiai extrémumokban nyomon követhető módosulások alapvetően meghatározzák ezen rendszerek alkalmazkodóképességét. Kutatásainkban a napi csapadékösszegek hosszú adatsorainak felhasználásával arra keressük a választ, hogy a XX. század során történt-e szignifikáns változás a szélsőséges csapadékeseményekben a Kárpát-medence térségében. A vizsgálatainkban szereplő szélsőséges csapadékeseményeket jellemző extrém-indexeket a Meteorológiai Világszervezet klimatológiai (WMO-CCl/CLIVAR) munkacsoportjának ajánlásai alapján definiáltuk. Számos éghajlati paraméterek trendelemzését végeztük el a Kárpát-medence térségére. Például: egymást követő száraz napok száma, 1 és 5 napi maximális csapadékmennyiség, csapadékintenzitás, nagy csapadékok évi aránya, nagy és extrém csapadékú napok száma.

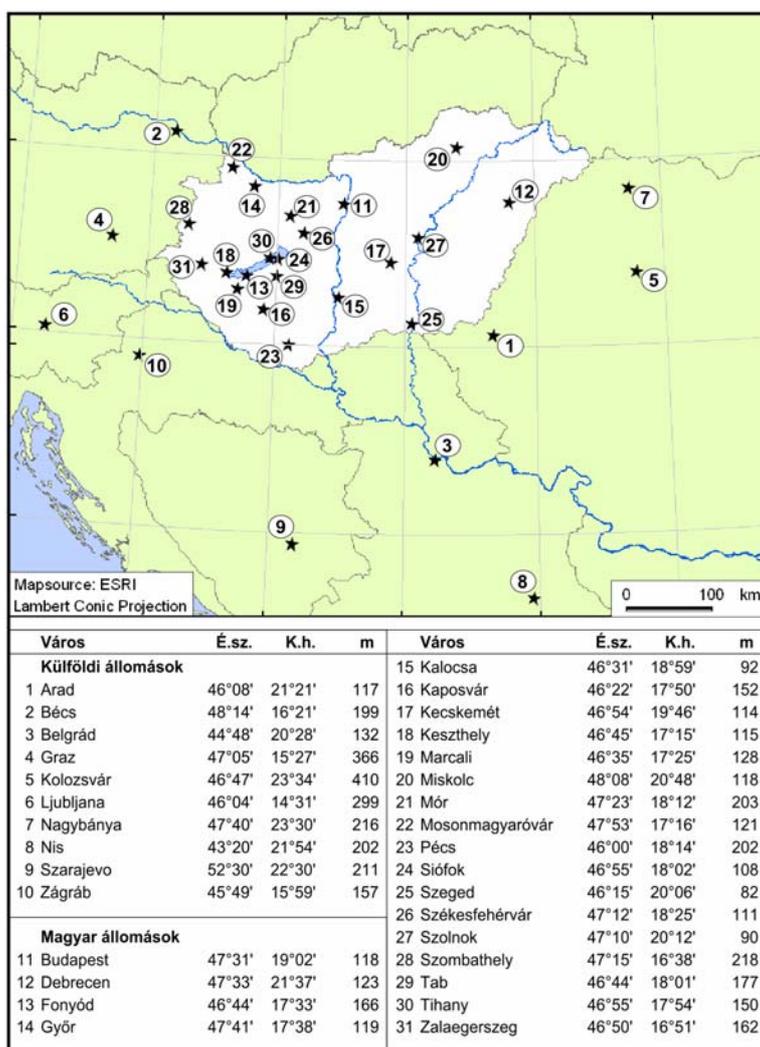
3.1. Bevezetés

A mezőgazdasági termelés szempontjából alapvető jelentőségű az adott térségben lehulló csapadék teljes mennyisége, intenzitása és eloszlása. Éppen ezért e cikkünkben a napi csapadékösszegek felhasználásával meghatározott éghajlati indexek trendelemzéseit végezzük el a XX. századra vonatkozóan. Vizsgálatainkban a Meteorológiai Világszervezet 1998-ban alakult egyik klimatológiai munkacsoportjának (*Working Group on Climate Change Detection*) ajánlásai (Karl et al. 1999) alapján definiált szélsőséges csapadékeseményeket jellemző legfontosabb extrémindexeket elemezzük. A globális vizsgálatokat Frich et al. (2002) publikációjában olvashatjuk, míg az Európára vonatkozó elemzéseket Klein Tank et al. (2002a; 2002b), Klein Tank

és Können (2003) közlik. E cikkünkben elsőként a felhasznált csapadék adatbázist mutatjuk be, majd az Európára és az általunk hasonló módszertannal a Kárpát-medencére végzett vizsgálatokat hasonlítjuk össze, s részletesebben tárgyaljuk a magyarországi adatsorokon végzett trendelemzéseket. Végül az utolsó fejezetben összefoglalásként a legfontosabb következtetéseket emeljük ki.

3.2. Adatok

A Kárpát-medence csapadék-extrémindex analizéséhez használt 31 hazai és külföldi állomás elhelyezkedését, földrajzi paramétereit a 3.1. ábrán mutatjuk be. Az általunk összeállított adatbázisban a 10 külföldi állomás (Arad, Bécs, Belgrád, Graz, Kolozsvár, Ljubljana, Nagybánya, Nis, Szarajevo, Zágráb) adatsorainak forrása a szabad hozzáférésű európai idősorokat tartalmazó ECA (Klein Tank 2003) adatbázis (melynek honlapjáról a kiválasztott adatok korlátozás nélkül letölthetők), míg a 21 hazai állomás (Budapest, Debrecen, Fonyód, Győr, Kalocsa, Kaposvár, Kecskemét, Keszthely, Marcali, Miskolc, Mór, Mosonmagyaróvár, Pécs, Siófok, Szeged, Székesfehérvár, Szolnok, Szombathely, Tab, Tihany, Zalaegerszeg) adatsorait az Országos Meteorológiai Szolgálat Archivumából vásároltuk. Az állomások válogatásánál két szempontot vettünk figyelembe: teljesüljön a domborzati és éghajlati homogenitási viszonyokhoz igazodó egyenletes területi lefedettség, valamint a kiválasztott idősorokban lehetőleg minimális legyen az adathiány.



3.1. ábra. A Kárpát-medencére vonatkozó extrémindex elemzés alapjául szolgáló állomások földrajzi elhelyezkedése, paramétereit

3.3. A Kárpát-medencére és Európára számított csapadék-extrémindexek tendenciáinak összehasonlítása

E fejezetben a XX. század második felének két részidőszakára (1946-tól és 1976-tól) végeztünk összehasonlító elemzéseket a Kárpát-medencére és Európára. Előzetes vizsgálatok alapján (IPCC 2001) a XX. század utolsó negyedének tendenciái mind a csapadék, mind a hőmérséklet esetén jelentősen eltérnek az évszázados trendektől. Ezért választottuk vizsgálatunk két célidőszakának az 1946-2001 (illetve Európa esetén 1946-1999), s az 1976-2001 (illetve Európa esetén 1946-1999) közötti periódust.

Míg a Kárpát-medencében az elmúlt 56 évben csökkent a csapadékextremitás mértéke, addig az elmúlt 26 évben a szélsőséges csapadékok összességében növekedtek. Az európai kontinens egészén mindkét vizsgálati időszakban ezzel ellentétes tendenciák figyelhetők meg, azaz az utolsó négy és fél évtizedben növekedett illetve az utolsó két és fél évtizedben csökkent a csapadékextremitási trend (Pongrácz és Bartholy 2004; Bartholy és Pongrácz 2004; 2005a; 2005b).

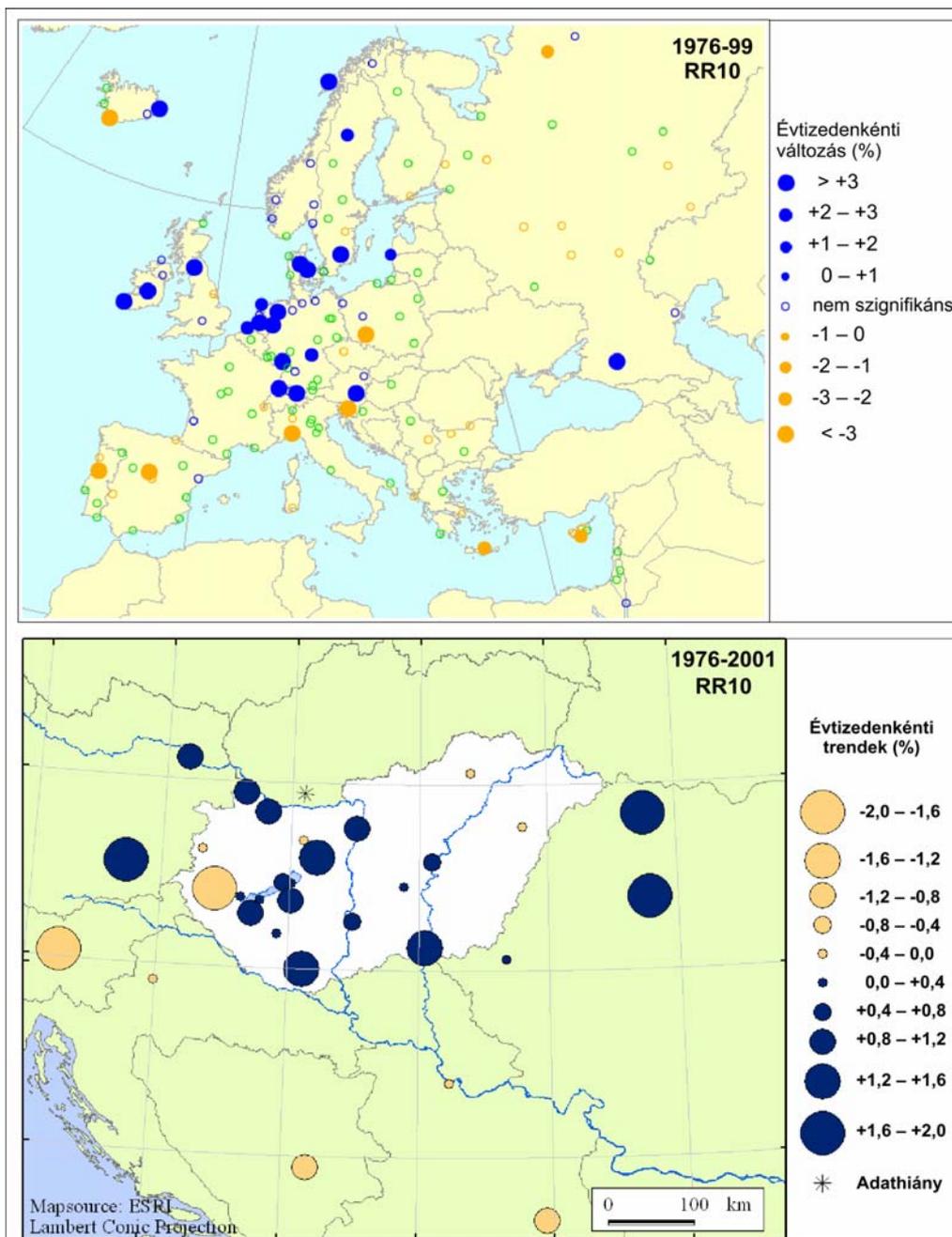
A 3.1. táblázatban összefoglaltuk az extrém csapadékindexek tendenciáját a Kárpát-medencében. Megjegyezzük, hogy a táblázat alsó három sorában lévő három paraméter nem extrém jellegű, inkább a lehullott teljes csapadékmennyiség változására utal. Jól látható, hogy az utolsó 25 évben a legtöbb extrém csapadék index tendenciája szignifikánsan növekedett (különösen az R95T, RR10, RR20, R75, R95 esetén), viszont a XX. század második felét egészében tekintve gyakran területi megosztottság jelenik meg a Kárpát-medencében, melyre a (- +) jellel hívjuk fel a figyelmet.

3.1. táblázat. Az extrém csapadék indexek definíciója, összefoglaló trendelemzése a Kárpát-medence térségére. A zárójelben szereplő előjelek a 95%-os szinten nem szignifikáns átlagos regionális trendeket jelölik.

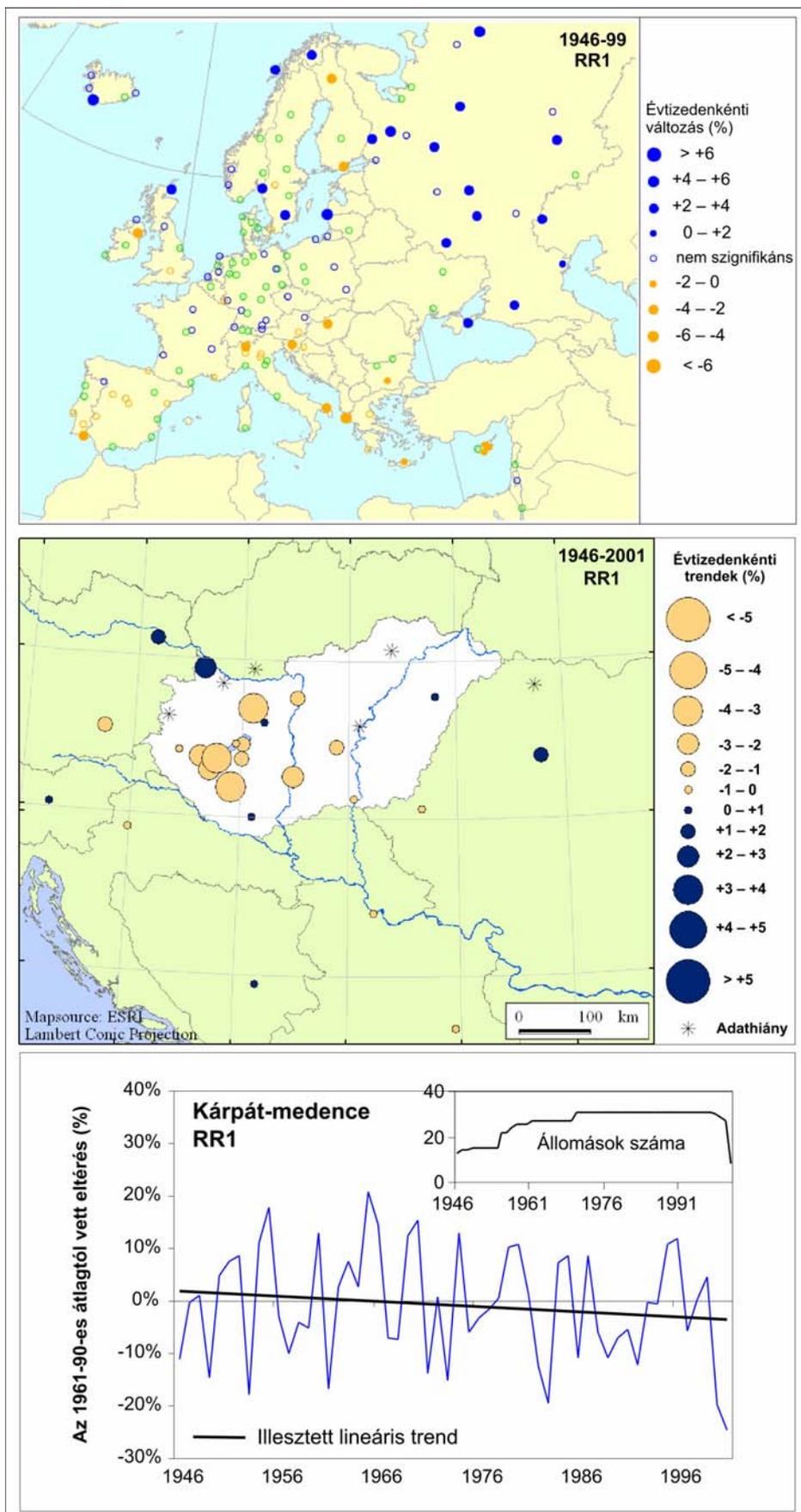
Az extrémindex jelölése (ECAD), definíciója [egység]	1946-2001	1976-2001
CDD: Az egymást követő száraz napok maximális száma ($R_{nap} < 1 \text{ mm}$) [nap]	+	-
Rx1: Az év során mért max. 1 nap alatt lehullott csap.menny. [mm]	(- +)	-
Rx5: Az év során mért legnagyobb 5 nap alatt lehullott csapadék-összeg [mm]	-	+ -
SDII: Napi csapadékinzertitás index (teljes csapadékösszeg / összes csapadékos ($R_{nap} \geq 1 \text{ mm}$) napok száma) [mm/nap]	(+)	(+)
R95T: Nagyon csapadékos napok csapadékösszegének évi aránya az 1961-90-es normálidőszak 0.95-ös kvantiliséhez ($R_{95\%}$) viszonyítva ($\Sigma R_{nap} / R_{total}$, ahol ΣR_{nap} az $R_{95\%}$ -nél nagyobb napi csapadékok összege) [%]	(+)	+
RR10: Nagy csapadékú napok száma ($R_{nap} \geq 10 \text{ mm}$) [nap]	(- +)	+
RR20: Extrém csapadékú napok száma ($R_{nap} \geq 20 \text{ mm}$) [nap]	(- +)	+
R75: Mérsékelten csapadékos napok száma ($R_{nap} > R_{75\%}$, ahol $R_{75\%}$ az 1961-90-es normálidőszak napi csapadékainak felső kvartilise) [nap]	(-)	+
R95: Nagyon csapadékos napok száma ($R_{nap} > R_{95\%}$, ahol $R_{95\%}$ az 1961-90-es normálidőszak napi csapadékainak 0.95-ös kvantilise) [nap]	(- +)	+
RR5: Adott csapadékú napok száma ($R_{nap} \geq 5 \text{ mm}$) [nap]	(-)	(-)
RR1: Adott csapadékú napok száma ($R_{nap} \geq 1 \text{ mm}$) [nap]	-	-
RR0.1: Adott csapadékú napok száma ($R_{nap} \geq 0,1 \text{ mm}$) [nap]	-	-

Mindössze két paramétert emelünk ki példaként a táblázatból, melyeket a továbbiakban részletesebben elemzünk. A 3.2. ábrán a XX. század utolsó negyedére a 10 mm-t meghaladó nagy

csapadékú napok számának (RR10) összehasonlítását láthatjuk Európa és a Kárpát-medence térségére. Az állomásokhoz helyezett körök az 1961-90-es referencia-időszakhoz viszonyított évtizedes trendek előjelét és erősségét jelenítik meg: a sötétebb szín a pozitív, a világosszürke a negatív trendeket jelöli; a körök mérete pedig a jobb oldalt látható kategóriák szerint az eltérések nagyságával arányos. Jól látható az európai térség megosztottsága: az északi területeken a nagy csapadékú napok száma az utolsó két-három évtizedben növekedett, míg a Földközi-tenger vidékén csökkent. A Kárpát-medence a két régió határterületén helyezkedik el, s a részletesebb vizsgálatokat tartalmazó térképből kitűnik, hogy csak néhány délebbre fekvő állomás esetén jelenik meg a negatív tendencia. Az abszolút értékben 0,4-nél nagyobb trendegyütthatók 95%-os szinten szignifikánsak, vagyis csak a kis számú legkisebb méretű kör jelöl nem szignifikáns változást.



3.2. ábra. A 10 mm-t meghaladó csapadékú napok számának (RR10) alakulása Európában és a Kárpát-medencében a XX. század utolsó negyedében. A (-0,4; +0,4) intervallumon kívül eső trendegyütthatók a Kárpát-medencében 95%-os szinten szignifikánsak.



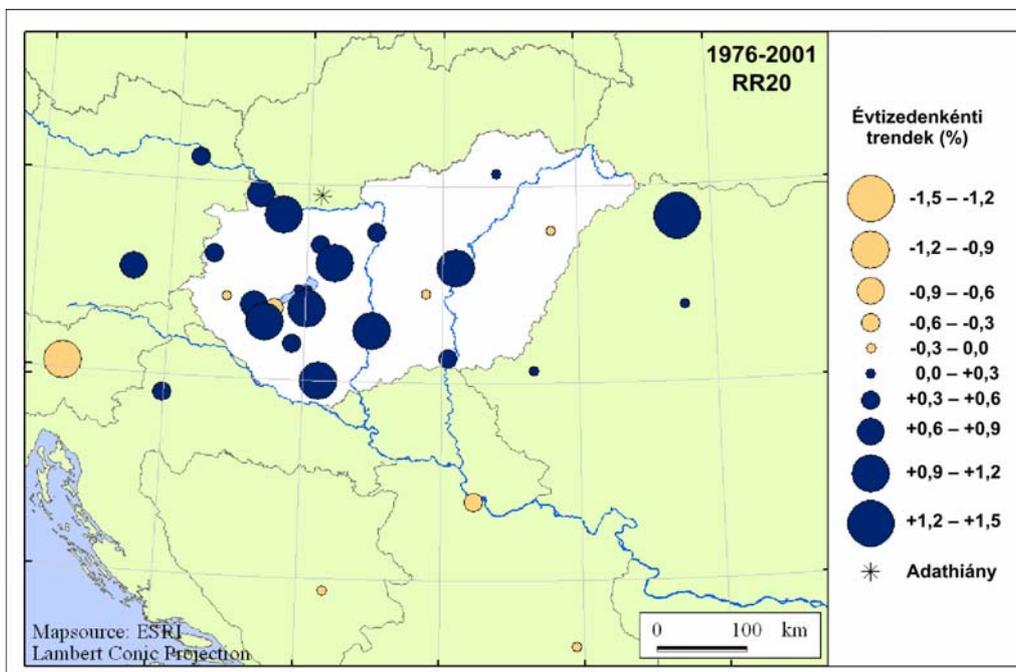
3.3. ábra. Az 1 mm-t meghaladó csapadékú napok számának (RR1) alakulása Európában és a Kárpát-medencében a XX. század második felében. A (-0,3 ; +0,3) intervallumon kívül eső trendegyütthatók a Kárpát-medencében 95%-os szinten szignifikánsak.

A 3.3. ábra az 1 mm-nél nagyobb csapadékú napok száma (RR1) paraméter trendanomáliáinak területi eloszlását és időbeli menetét mutatja be a XX. század második felére. A felső két térkép a 3.2. ábrához hasonló elrendezésben Európára és a Kárpát-medencére mutatja az RR1 paraméter évtizedes trendjeinek előjelét és erősségét állomásonként. Az RR10-hez hasonlóan e paraméter esetén is Európa zonálisan megosztott: északon pozitív, délen negatív tendencia jelentkezik. Az egész Kárpát-medencét itt egy erős negatív trend jellemzi, azaz az 1 mm-et meghaladó csapadékú napok számának erőteljes csökkenése látható.

A 3.3. ábra alsó grafikonja az RR1 index anomália idősorát mutatja a Kárpát-medencére az 1961-90-es referencia-időszakhoz viszonyítva. E grafikon jobb felső sarkában az átlagszámításhoz felhasznált értékes adattal rendelkező állomások évenkénti számát látjuk. A Kárpát-medencére vonatkozó térképhez hasonlóan e grafikon is a csapadékos napok számának egyértelmű csökkenését jeleníti meg: szembevető a görbére illesztett lineáris trend csökkenő jellege.

3.4. A Kárpát-medence csapadékindexének elemzése

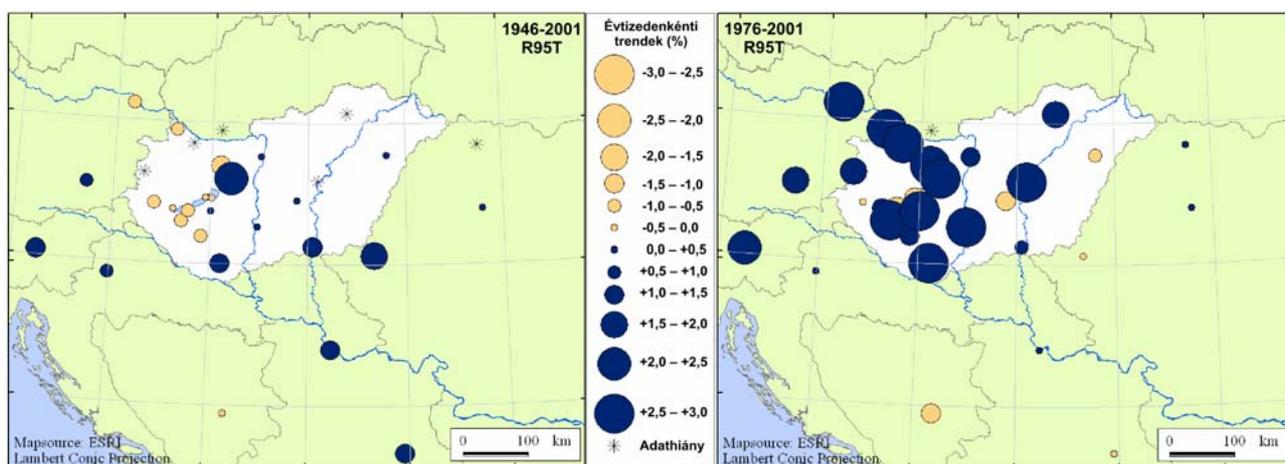
Az IPCC-jelentés (2001) feltevése szerint több régió éghajlatát, mezőgazdaságát is jelentősen befolyásoló veszélyforrás lehet a XXI. században a csapadékszélsőségek gyakoriságának növekedése. Az összefoglaló jellegű 3.1. táblázat alapján számos extrém-csapadékindex erősen növekvő tendenciája figyelhető meg a Kárpát-medencében. Ezek az eredmények jó egyezést mutatnak korábbi vizsgálatainkkal (Bartholy és Pongrácz 1998; Pongrácz és Bartholy 2000; Bartholy et al. 2003). Különösen a vizsgált időszak második felében, az 1976 és 2001 közötti években találunk több helyen növekvő tendenciát. A nagy csapadékinzintzást, vagy a nagy csapadékot jelző extrém indexek (különösen az SDII, R95T, RR20, RR75, R95) esetén találtuk a legerősebb pozitív trendet. A 3.4-3.6. ábrákon bemutatjuk néhány erősebben változó index trendjének területi eloszlását.



3.4. ábra. A 20 mm-t meghaladó csapadékú napok számának (RR20) alakulása a Kárpát-medencében 1976-2001 között. A (-0,3 ; +0,3) intervallumon kívül eső trendegyütthatók 90%-os szinten szignifikánsak.

A 3.4. ábra a 20 mm-t meghaladó extrém csapadékú napok számának (RR20) tendenciáit elemzi 1976 és 2001 között. Szembetűnő az egész Kárpát-medencét jellemző egyöntetű erős pozitív trend. Ha csupán a hazai állomásokat tekintjük, a Dunántúlon intenzívebben növekedett a 20 mm-nél nagyobb csapadékú napok száma, mint az Alföld térségében.

A 3.5. ábrán a nagy csapadékok évi arányának (R95T) alakulását láthatjuk a Kárpát-medencében. A bal oldali térkép a teljes XX. század második felének (1946-2001) megosztott trendjét illusztrálja, melyre a Dunántúlon enyhe csökkenő, míg a térség többi részén közepes erősségű növekvő tendencia jellemző. A jobb oldali térképen az évszázad utolsó negyedében jelentkező erős pozitív tendencia látható, mely azt jelzi, hogy a teljes év csapadékösszegeiből (R_{total}) a nagy csapadékok formájában lehulló részarány ($\Sigma R_{nap} / R_{total}$, ahol ΣR_{nap} az $R_{95\%}$ -nél, azaz az 1961-90-es normálidőszak napi csapadékainak 0,95-ös kvantilisénél nagyobb napi csapadékok összege) jelentősen megnövekedett.



3.5. ábra. A nagy csapadékok évi arányának (R95T) alakulása a Kárpát-medencében a XX. század második felében. A bal oldali térképen a (-0,3 ; +0,3), a jobb oldali térképen a (-0,4 ; +0,4) intervallumon kívül eső trendegyütthatók 95%-os szinten szignifikánsak.

3.5. Következtetések

Az alábbiakban összefoglaljuk a Meteorológiai Világszervezet klimatológiai munkacsoport ajánlásai alapján a XX. század második felére a 12 extrém csapadékindex tendenciáit elemző vizsgálataink eredményeit.

(1) Külön vizsgáltuk az 1946-2001 és az 1976-2001 időszakokra az extrém csapadékindexek trendjeit. Megállapíthatjuk, hogy mindkét térségben területileg egységesebb és intenzívebb trendek jelentkeznek a XX. század utolsó negyedében, mint a század második felében.

(2) Az 1976-2001 időszakban a vizsgált indexek csaknem felénél (SDII, R95T, RR20, RR75, R95) egyenletesen erős pozitív trendet figyeltünk meg, mely a csapadékextremitások általános növekedésére engednek következtetni.

(3) Az RR5, RR1, RR0.1 paramétereknél a teljes 1946-2001 időszakra vonatkozóan az egész Kárpát-medence térségére csökkenő tendencia jellemző.

(4) A XX. század negyedik negyedében a nagy csapadékú napok száma csökkent, azonban az ezeken a napokon lehullott nagy csapadékok aránya az évi illetve évszakos összeghez viszonyítva jelentősen megnövekedett.

4. Szinoptikus-klimatológiai elemzések

Kutatásainkhoz az európai középtávú időjárás előrejelző központ (ECMWF) 1°-os horizontális felbontású reanalízis adatbázisából (ERA-40) nyomási anomáliamezők segítségével beazonosítottuk

az atlanti-európai térségben átvonuló ciklonok középpontjait, majd végigkövettük a térségben kialakult mérsékeltövi ciklonok pályáját (6 órás időlépcsővel). 1957 és 2002 között évszakonként értékeltük a ciklonok tartamgyakoriságait, valamint a ciklonaktivitási indexeket. Vizsgáltuk továbbá az elmúlt 45 évben hazánk fölött átvonuló ciklonok frontrendszerait, azok éves, évszakos és havi számának alakulását, a hideg- és melegfrontok eloszlásában és intenzitásában mutatkozó trendeket.

4.1. Bevezetés

A trópusok és a sarkvidékek közötti hő- és nedvességtranszport nagy hányadéért a mérsékeltövi ciklonok felelősek. Ezért a ciklonok gyakoriságában és intenzitásában bekövetkező bármely módosulás jelentős mértékű regionális változást okozhat a közepes földrajzi szélességeken. Többféle megközelítést alkalmazhatunk a ciklon-gyakoriságok változásának detektálására. Egyike a leggyakrabban használt módszereknek a makrocirkulációs típusok gyakoriságváltozásának vizsgálata. Egy másik közelítés, amikor a beazonosított mérsékeltövi ciklonok gyakoriságát és pályájának paramétereit elemezzük. Elsőként, még szubjektív vizsgálati módszerekkel van Beber (1891) és Klein (1957) végeztek ciklonpálya elemzést. Az utóbbi évtizedekben a számítógépek segítségével már lehetővé vált a ciklonok objektív módon történő vizsgálata is (pl.: Lambert 1988; Hodges 1994). Zhang et al. (2004) a ciklonok aktivitását elemezte a sarkvidék körzetére, 1948 és 2002 között, melyhez légnyomás-mezők $2,5^\circ$ -os rácsponti értékeit használta. Beszámolónkban elsőként az európai makrocirkulációs helyzetek gyakoriság-változásait elemezzük a XX. századra vonatkozóan. Majd az atlanti-európai régió ciklonpályáinak, s a ciklonok intenzitásának változásait vizsgáljuk az európai középtávú előrejelző központ (ECMWF) ERA-40 adatbázisa alapján. Végül a Kárpát-medencén átvonuló időjárási frontok gyakoriságának és intenzitásának elemzését mutatjuk be.

4.2. Európai ciklonpályák azonosítása és elemzése

Az északi féltekén a mérsékeltövi ciklonok és frontrendszerük alapvető szerepet játszanak a helyi időjárás kialakításában. Például Európában a téli csapadék kétharmad részéért átlagosan csupán 15 ciklon felelős (Fraedrich et al. 1986). Ez is kiemeli a ciklonpályák és ciklonintenzitásokban detektálható módosulások vizsgálatának fontosságát.

4.2.1. Adatok

Vizsgálataink során az európai középtávú előrejelző központ (ECMWF) ERA-40 reanalízis adatbázisát használtuk fel (<http://www.ecmwf.int/research/era>). Az adatbázist földfelszíni és műholdas mérések alapján állították össze, s az 1957. szeptember 1-től 2002. augusztus 31-ig terjedő időszakot öleli fel (Kallberg et al. 2004). Az era-40 adatbázis számos meteorológiai paramétert tartalmaz 6 órás időbeli felbontásban, 60 vertikális szinttel rendelkezik a felszíntől mintegy 65 km-es magasságig, és $1,125^\circ$ -os horizontális rácshálózatot fed le (Gibson et al. 1997). E vizsgálatban az országos meteorológiai szolgálat közreműködésével rendelkezésünkre bocsátott $1^\circ \times 1^\circ$ -os horizontális felbontású tengerszinti légnyomásértékek mezőseit használtuk fel. A hemiszférikus mezőkből leválasztottuk az általunk vizsgált atlanti-európai térség (30° – 75° é és 45° ny– 40° k által közrezárt terület) adatait, mely összesen $46 \times 86 = 3956$ rácspontot tartalmaz.

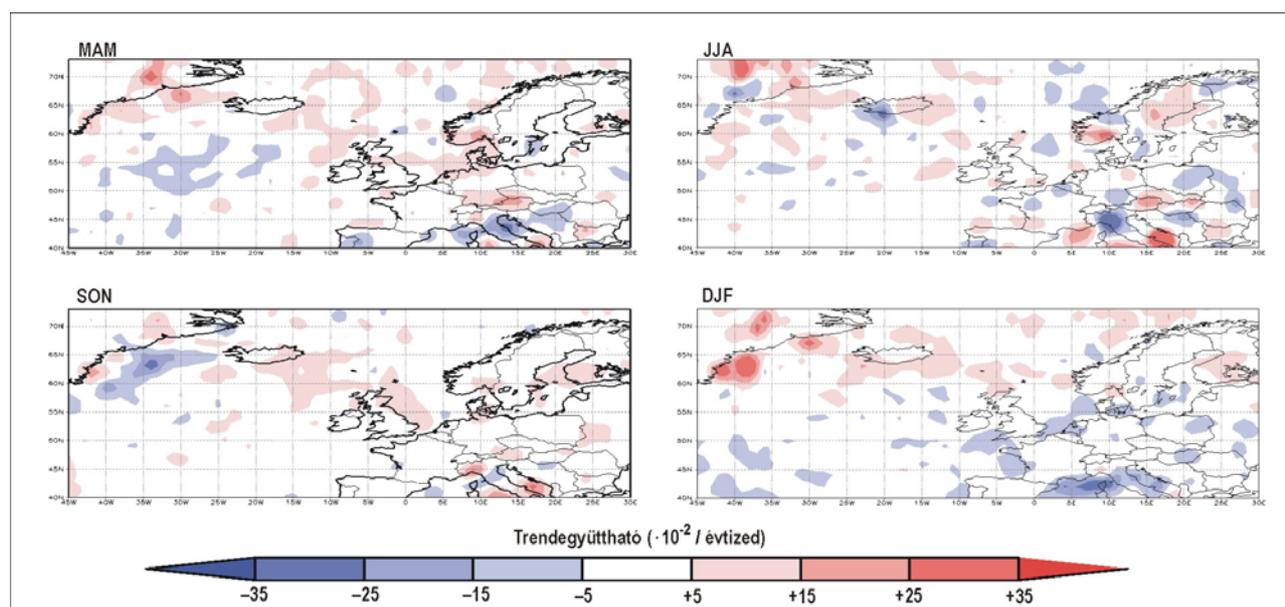
4.2.2. Eredmények

A globális reanalízis adatbázis segítségével lehetőség nyílik a mérsékeltövi ciklon-középpontok objektív módon történő azonosítására és a ciklonok pályájának ugyancsak objektív követésére. Ilyen objektív algoritmust dolgozott ki például Serreze (1995) és Serreze et al. (1997), akik a tengerszinti légnyomás gradiens értékeit használták fel arra, hogy az északi sarkvidék körüli ciklonokat tanulmányozzák 1973-1992 közötti tavaszi és téli időszakokban.

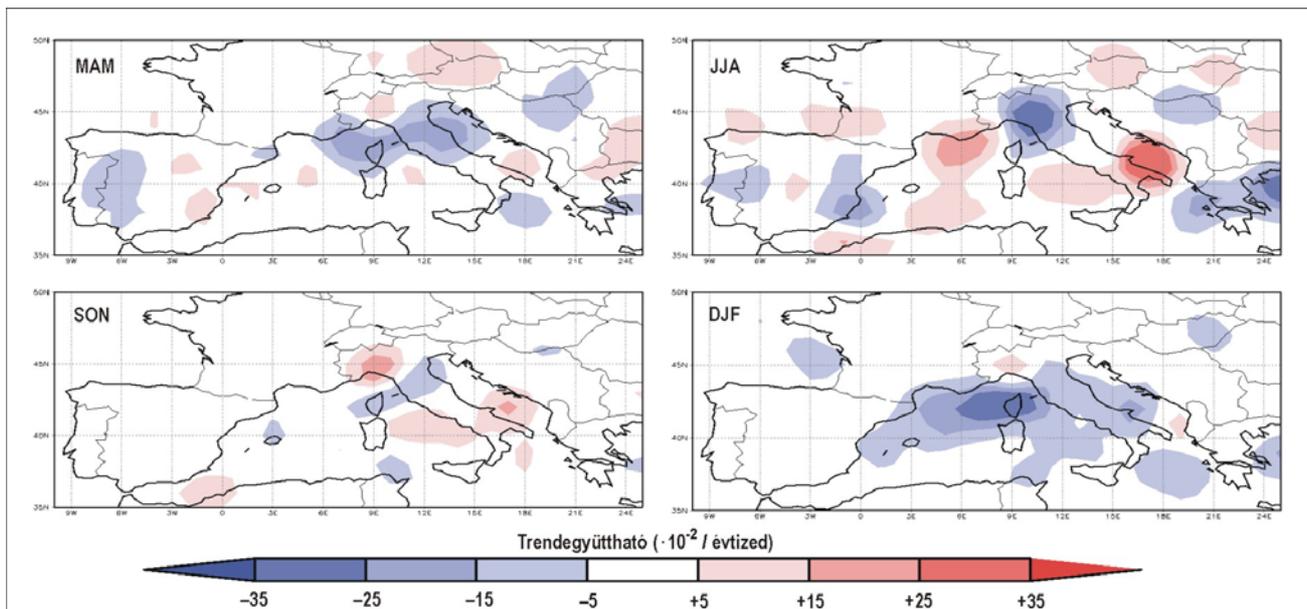
Vizsgálatainkban mi is a tengerszintre átszámított légnyomási mezősorokat vettük alapul (ám jóval hosszabb időszakot elemeztünk 1957 és 2002 között az ERA-40 adatbázisból), s Serreze et al. (1997) alapján határoztuk meg a mérsékeltövi ciklonok középpontját. Előzetes elemzéseink (Pongrácz et al. 2006) alapján szükségesnek tűnt, hogy a teljes atlanti-európai térségben átvonuló ciklonok vizsgálatát kettébontsuk a mediterrán régióra, valamint az attól Északra fekvő térségekre (ez utóbbit hívjuk a továbbiakban északnyugati régiónak).

A mediterrán régió ciklonközéppontjainak meghatározásához az alábbi kritériumrendszert alkalmaztuk: (1) a tengerszinti légnyomás kisebb, mint 1013,5 hPa; (2) lokális nyomási minimum található a közvetlen szomszédos nyolc rácsponthoz viszonyítva. Tapasztalatainkat felhasználva szigorúbb kritériumokat alkalmaztunk az északnyugati régió ciklonközéppontjainak meghatározásához: (1) a tengerszinti légnyomás kisebb, mint 995 hPa; (2) lokális nyomási minimum található a szomszédos 24 rácsponthoz viszonyítva (ahol centrális elhelyezkedésben két-két szomszédot tekintünk minden irányban). A számítógépes algoritmus szerint hatóránként megőriztük az így definiált potenciális ciklonközéppontok földrajzi szélességét és hosszúságát, a tengerszintre átszámított légnyomását, valamint a nyomási gradiens legkisebb értékét. Ezután rekonstruáltuk a feltételezett ciklonpályákat ezekből a tárolt lehetséges ciklon-középpontokból. Két azonosított ciklonközéppontot akkor tekintettünk ugyanahhoz a ciklonpályához tartozónak, ha teljesült az alábbi két feltétel: (1) a két pont földrajzi távolsága kisebb, mint 450 km a mediterrán régióban, illetve 650 km az északnyugati régióban; (2) a tengerszintre átszámított légnyomásuk különbsége abszolút értékben rendre kisebb, mint 6 hPa, illetve 8 hPa. A ciklonpályák tárolásakor a következő információkat rögzítettük: (i) a cikloncentrum első detektálásának időpontja; (ii) az utolsó detektálásig eltelt időlépcsők száma; (iii) a ciklon teljes élettartama alatt detektált legkisebb légnyomás-gradiens értéke; (iv) a ciklon-középpontok földrajzi koordinátái mindenegyes időlépcsőben; (v) a cikloncentrum tengerszintre átszámított légnyomása ugyancsak minden időlépcsőben.

A ciklongyakoriság trendegyütthatóinak évszakos földrajzi eloszlását mutatjuk be a két régióra a 4.1. és a 4.2. ábrán az 1957-2002 időszakra. A 4.1. ábrán Grönland/Izland térségében jól kirajzolódik a tavaszi és a téli erőteljes növekvő tendencia, míg nyáron és ősszel a cikloncentrumok kis mértékű áthelyeződése figyelhető meg. A ciklonok eltolódása Grönland esetén a sziget belseje felé, Izlandnál pedig keletebbre történik. A 4.2. ábrán a mediterrán térségben erős csökkenő tendencia figyelhető meg tavasszal és télen. Ezzel párhuzamosan ősszel és még inkább nyáron a cikloncentrumok áthelyeződését detektálhatjuk a térségben. Nyáron a Tírrén/Ligur-tenger vidékén a ciklonok délnyugati irányba tolódtak el, valamint az adriai-tenger déli részén a ciklonok gyakorisága markánsan megnövekedett.

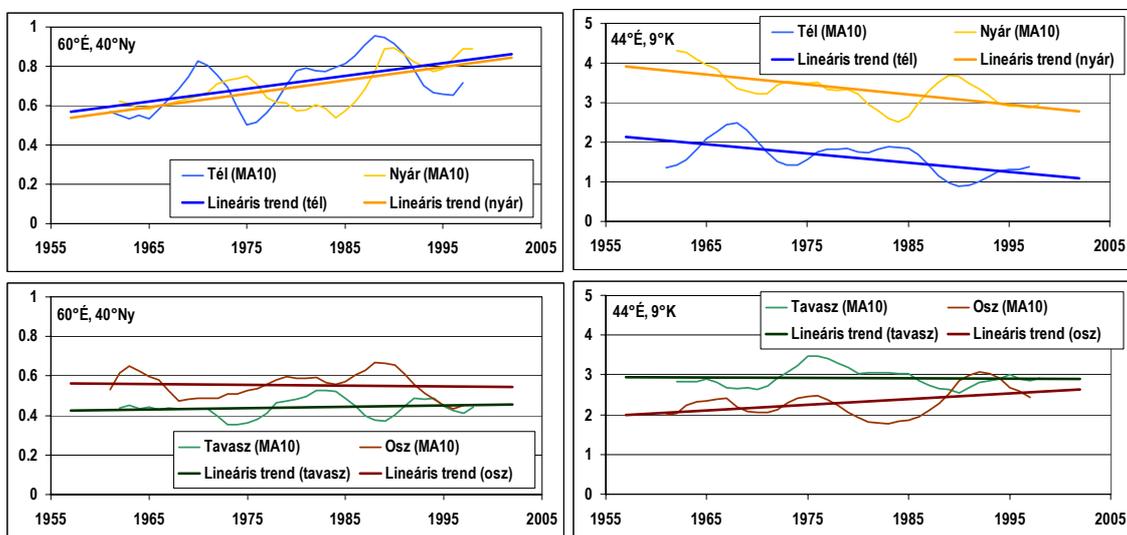


4.1. ábra. A ciklongyakoriság évszakos trendjei az északnyugati térségben.



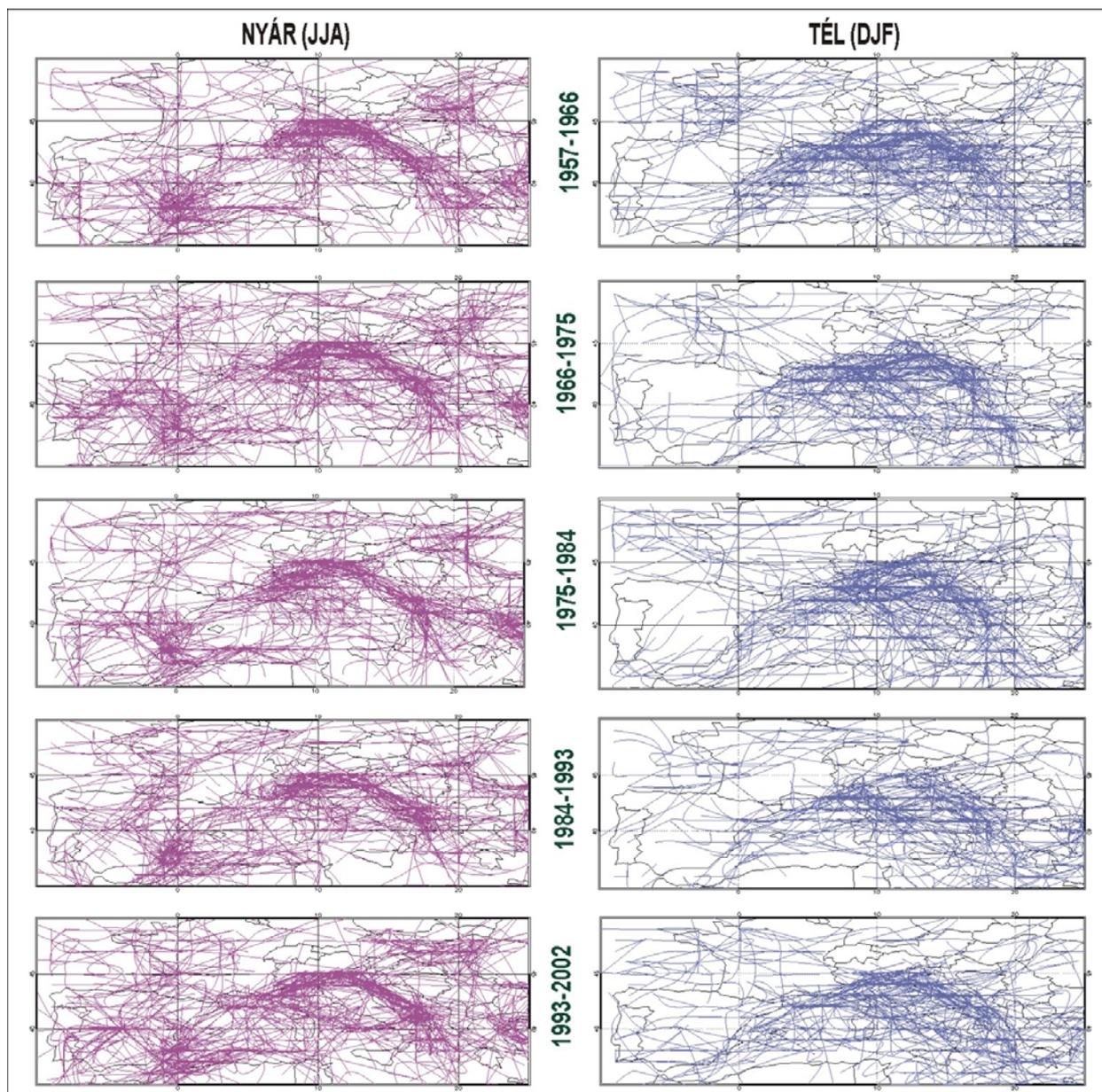
4.2. ábra. A ciklongyakoriság évszakos trendjei a mediterrán térségben.

Mindkét térségből kiválasztottunk egy-egy rácspontot, s ezek évszakos ciklongyakorisági értékeit, illetve azok lineáris trendjeit mutatjuk be a 4.3. ábrán. Az északnyugati régióból a 60°E, 40°Ny rácspont téli és nyári növekvő tendenciáit emeljük ki, továbbá jól látható, hogy a tavaszi és az őszi hónapokban a teljes 1957-2002 közötti időszakban nem mutatható ki szignifikáns változás. A mediterrán térség 44°E, 9°K rácspontja jól reprezentálja a 4.2. ábrán már említett ciklongyakoriságok földrajzi eltolódását. Télen és nyáron jelentősen csökkenő, míg ősszel növekvő tendenciát detektálhatunk az 1957-2002 időszakra.



4.3. ábra. A ciklongyakoriság évszakos trendjei két kiválasztott rácspontra.

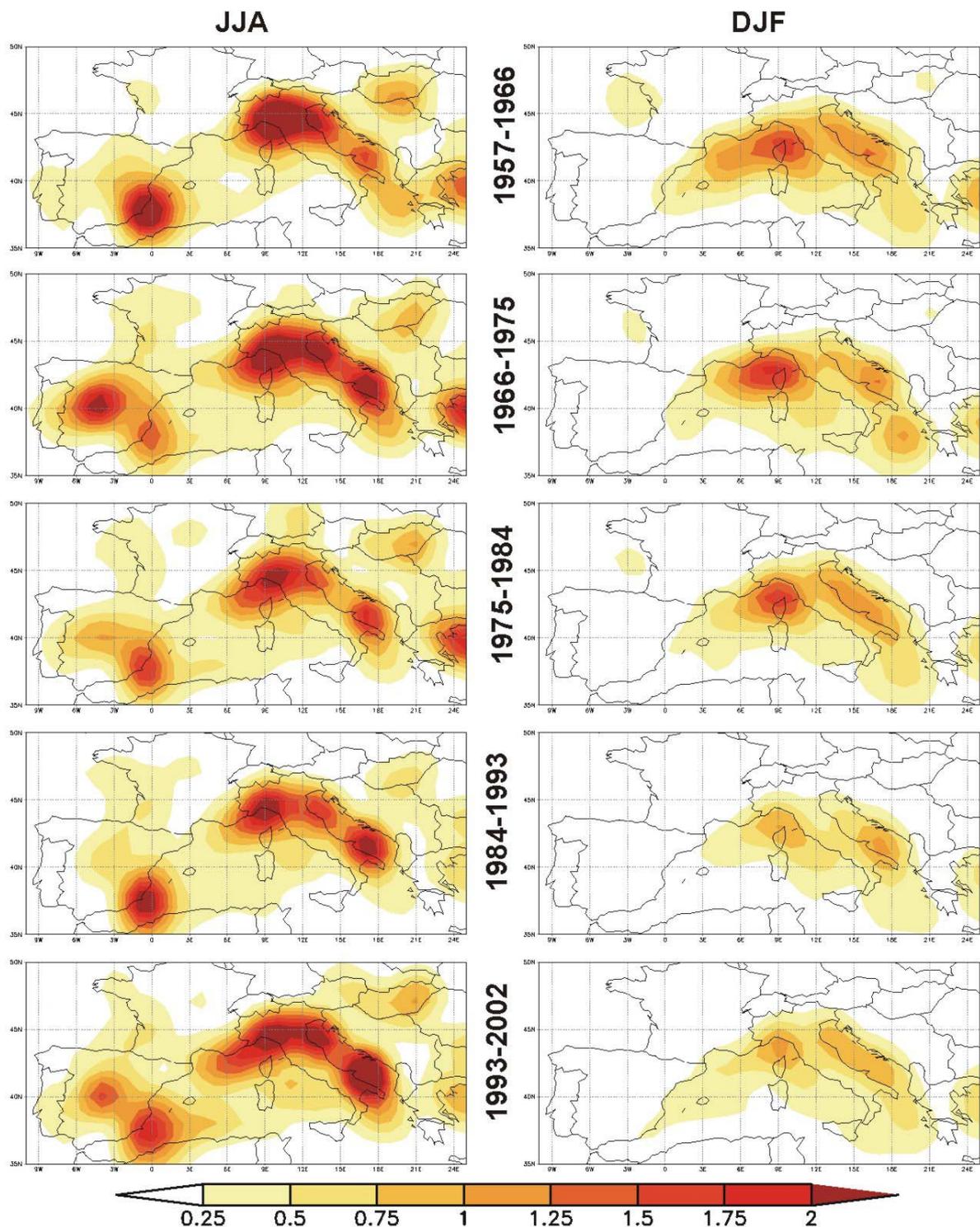
A ciklonpályák beazonosítása a teljes 1957-2002 időszakra megtörtént. Majd elvégeztük a ciklonpályákban detektálható évszakos eltolódások vizsgálatát. A 4.4. ábrán a nyári és téli ciklonpályák eltolódását illusztráljuk öt részidőszak segítségével. Mind nyáron, mind télen felismerhető, hogy a vizsgálati időszak elején még az adriai-tenger fölött húzódó ciklonpályák szétválnak egy kevésbé gyakori déli és egy gyakoribb északi ágra. Ez a folyamat a nyári hónapokban intenzívebben megfigyelhető.



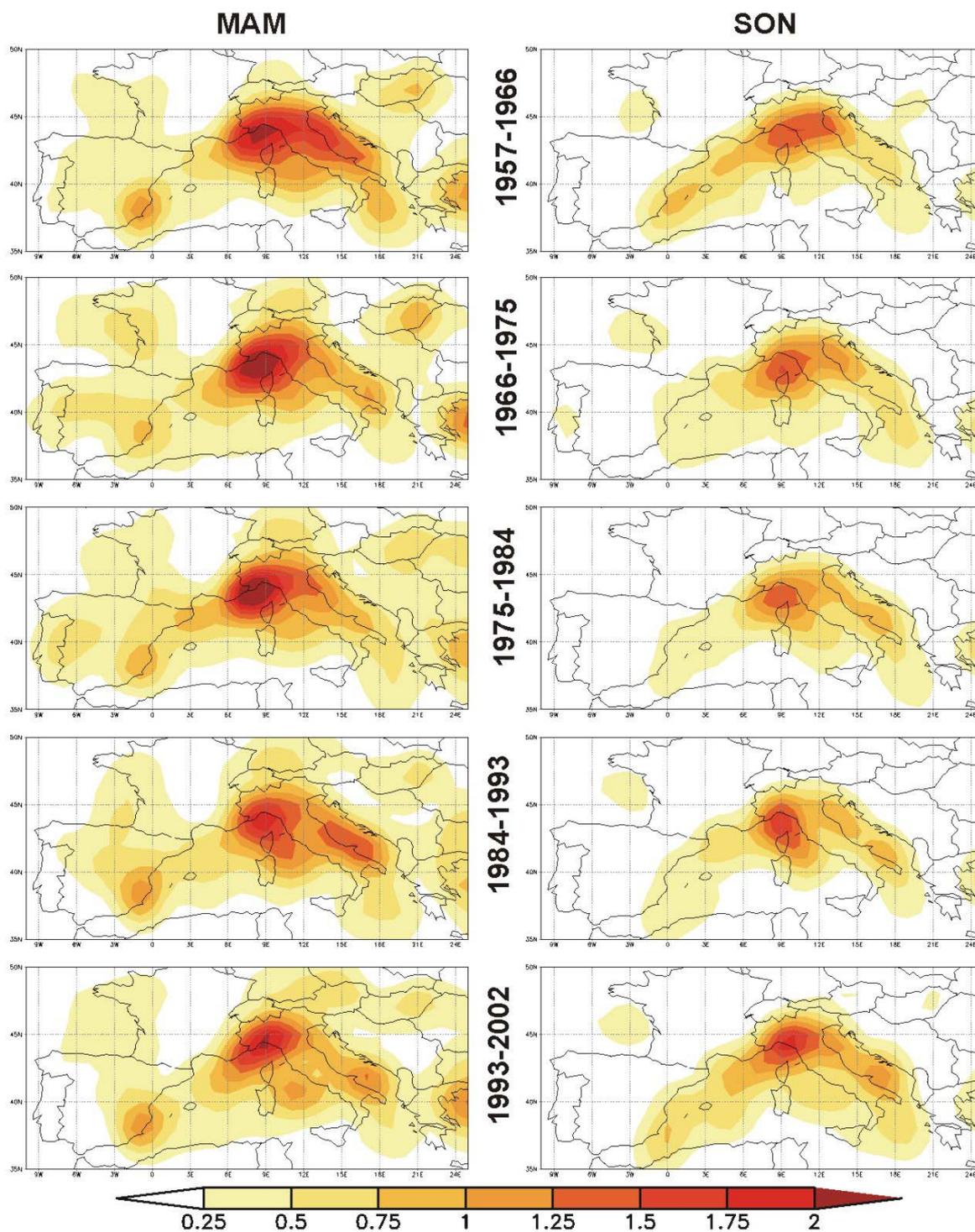
4.4. ábra. A ciklontrajektóriák a mediterrán térségben.

A 4.5. és a 4.6. ábrán a ciklonátvonulások rácsponti gyakoriságváltozásait követhetjük nyomon a mediterrán régióban öt részidőszakban. A teljes 45 éves időszak során a ciklonátvonulások száma növekedett nyáron és ősszel, míg kis mértékben csökkent télen és tavasszal.

A mérsékeltövi ciklonok intenzitásának komplex jellemzésére egy másik paramétert használtunk fel. Az ún. ciklon aktivitási indexet (CAI) Zhang et al. (2004) definiálta, az alábbiak szerint: (1) vesszük a ciklonközpont tengerszinti nyomási értékének, és ugyanazon rácspont éven belüli megfelelő időpontra vonatkozó 45 éves tengerszinti nyomásértékei zonális átlagának különbségét abszolút értékben – amennyiben az adott rácspont felett nem található ciklon, akkor azt nullának vesszük; (2) ezt minden időpontra és rácspontra elvégezzük; (3) havonként és rácspontonként összegezzük az (1)-(2) lépésben számítottakat, s így kapjuk meg a CAI értékeket. Előzetes várakozásainknak megfelelően a CAI jól tükrözi a ciklonok fő vonulási útvonalt. A nagyobb CAI értékek télen jelennek meg mind az öt részidőszakban (Pongrácz et al. 2006). A legmagasabb ciklon aktivitási indexű terület mindkét évszakban Grönland és Izland között található, ennél jóval alacsonyabb értékek jellemzik a genovai-centrum környékét.



4.5. ábra. A ciklonátvonulások évszakos (nyáron és télen) változásai a mediterrán térségben.



4.6. ábra. A ciklonátvonulások évszakos (tavasszal és ősszel) változásai a mediterrán térségben.

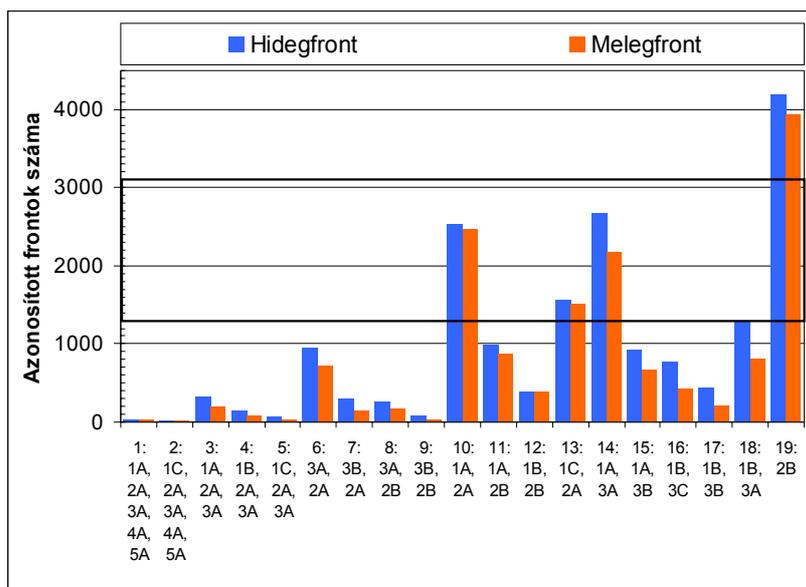
4.3. A Kárpát-medence fölött áthaladó időjárási frontok vizsgálata

A mérsékeltövi ciklonok hatása a helyi időjárási viszonyokra gyakran a frontrendszeren keresztül vizsgálható jól, ezzel foglalkozunk beszámolónk utolsó részében. Kutatásaink során a teljes atlanti-európai térségből csupán a kárpát-medencét érintő hideg- és melegfrontokra fókuszáltunk, azon belül is Budapestet választottuk ki a front detektálás helyszínéül. Egy térség fölött áthaladó időjárási frontok definíciója, objektív beazonosítása nem egyszerű feladat, az itt bemutatott vizsgálatainkban főként a frontdetektálás szöbajöhető paramétereit és kritériumait elemeztük. Az ERA-40 reanalízis adatbázis idősorait felhasználva ötféle meteorológiai paraméterben (a 850 hPa-os geopotenciális szint hőmérsékletében, a 10 méteres szélben, a harmatpontban és 2 méteres hőmérsékletben, valamint a tengerszinti légnyomásban) megnyilvánuló változások alapján végeztük el a hideg- és melegfrontok azonosítását. Összehasonlítottuk közel húsz lehetséges kritériumrendszer alapján beazonosított frontok számát, paramétereit, továbbá meghatároztuk az 1957-2002 időszakban jellemző trendeket. A frontok azonosítására többféle kritériumrendszert állítottunk össze, melyek jelölési rendszerét a 4.1. táblázat tartalmazza.

4.1. táblázat. A különböző időjárási paramétereket felhasználó feltételek jelölési rendszere (m: átlag, d: szórás)

	Szélirány- változás, 10 m (Δv)	Hőmérséklet- változás, 850 hpa (Δt_{850})	Tengerszinti légnyomás- változás (Δp)	Hőmérséklet- változás, 2 m (Δt)	Harmatpont- változás, 2 m (Δt_d)
$> m$	1a	2a	3a	4a	5a
$> m + d$	1b	2b	3b	4b	5b
$> m + 0,5 \cdot d$	1c	2c	3c	4c	5c

A 4.7. ábráról leszűrhető, hogy több feltétel bevonása (akár az összes rendelkezésre álló paraméter számításba vétele) drasztikusan csökkenti az azonosított frontok számát. Így az 1-es és 2-es esetben Budapest fölött évente csupán rendre 4, illetve 3 frontot találtunk. Ez nyilvánvalóan távol áll a valóságtól, ennél lényegesen több halad át térségünkön (Makainé és Tóth 1978).

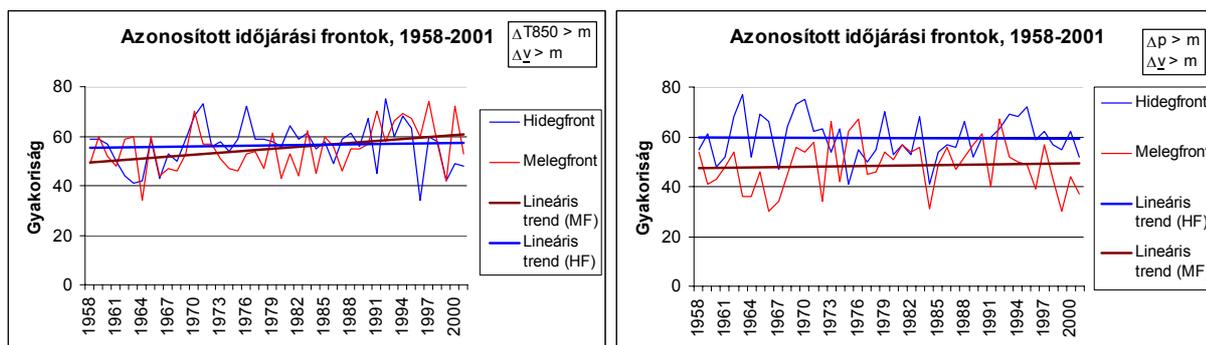


4.7. ábra. A különböző feltételrendszerek alkalmazásával azonosított hideg- és melegfrontok száma, 1957-2002.

A másik véglet szerint egy egyszerűsített feltételt, csak a 850 hPa-os légnyomási szint hőmérsékletváltozását figyelembe véve (19-es feltétel), éves szinten átlagosan 180 frontátvonulással

számolhatunk. Ez irreálisan magas szám, hiszen így minden másnapra jutna egy-egy front. Hazánkban ellenben gyakran találunk fronttevékenységtől mentes időszakokat; elsősorban a nyári félévben, melyek hetekig, vagy akár egy hónapig is eltarthatnak. A valóság tehát a két véglet között keresendő. A 3., 4. és 5. feltételrendszer három paramétert vesz figyelembe: a szelet, a légnyomást és a 850 hPa-os hőmérsékletet. A 6-18. feltételrendszerek pedig kettőt a három előbb említett időjárási változó közül. A 4.7. ábrán tehát bejelöltük fekete téglalappal azt a sávot, amit reális értéknek tartunk az 1957-2002 közötti időszakban átvonult frontok száma szempontjából. Ennek az intervallumnak a határai 1300 és 3100, tehát évenként külön-külön átlagosan 29-69 hideg- és melegfronttal számolhatunk.

Az elemzésben a frontok éves számának idősorát tekintettük, s elvégeztük a frontok évi számainak trendelemzését. Mivel az adatbázis csonka naptári évvel kezdődik és végződik, ezért nem számoltunk éves frontsámokat az 1957. és a 2002. évre. Minden esetben külön-külön meghatároztuk a hideg- illetve a melegfrontokhoz tartozó lineáris trendeket.



4.8. ábra. A 10. (balra) és 14. (jobbra) feltételrendszer alkalmazásával azonosított időjárási frontok éves száma.

Általában bármelyik kritériumrendszer alkalmazásával kevesebb melegfrontot detektáltunk, mint hidegfrontot. A szinoptikus gyakorlatban is a melegfrontok analizálása a nehezebb, főleg nyáron, mivel általában kevésbé drasztikus változással járnak a hidegfrontokhoz képest. Valószínűsíthető, hogy ez tükröződik eredményeinkben is. A 10-es feltételrendszer alkalmazásával azonosított hideg- és melegfrontok évi száma közel azonos, de míg a hidegfrontok éves számában alig tapasztalunk változást a vizsgált 45 év alatt, addig a melegfrontoknál figyelemreméltó növekedést detektálhatunk: kb. tízzel növekedett meg az éves előfordulási szám (4.8. ábra bal oldalán). A 10-es kritériumrendszerhez hasonlóan a 13-as feltételrendszer alkalmazásával is közel azonos számú hideg- és melegfrontot detektálhatunk, valamint a frontsámok évek közötti ingadozása is hasonló menetet követ. Ebben az esetben viszont mindkét fronttípusra kimutatható a jelentős növekvő trend (évente 5-10 fronttal többet azonosítottunk a vizsgált 45 év végére). A 14-es és a 18-as feltételrendszer esetén, ahol csak a nyomástendenciát és a szélfordulást vesszük figyelembe, jóval kevesebb a melegfrontok száma a hidegfrontokhoz viszonyítva, de a frontok éves eloszlása a vizsgált időszak nagy része alatt hasonlóan alakul. Ebben a két esetben nem detektálható szignifikáns lineáris trend (4.8. ábra jobb oldalán).

4.4. Következtetések

Kutatásaink során (pl.: Bartholy et al. 2005a, 2006) elemeztük az európai makrocirkulációs helyzetek XX. századi gyakoriságváltozásait, az atlanti-európai régió ciklonpályáinak, s a ciklonok intenzitásának változásait az 1957-2002 közötti időszakra vonatkozóan, valamint a kárpát-medencén átvonuló időjárási frontok gyakoriságában, intenzitásában, s csapadékrendszerében detektálható módosulásokat. Az általunk használt frontdefiníció nem teljesen korrekt, hiszen nem csak a szigorúan vett hideg- és melegfrontokat jelöltük ki a jelentős mértékben leegyszerűsített front-értelmezésünkkel, hanem az advektációs helyzetek egy jelentős része is kiválasztásra került. A bemutatott vizsgálatok eredményei alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le.

1. A Hess-Brezowsky-féle makrocirkulációs típusok közül számos esetén észleltünk szignifikánsan növekvő, illetve csökkenő gyakorisági trendet az utóbbi 120 évben.

2. A teljes atlanti-európai térségben átvonuló ciklonok vizsgálatát a cikloncentrumok eltérő mélysége és intenzitása miatt kettébontottuk a mediterrán régióra, valamint az attól északra fekvő északnyugati régióra.

3. Grönland/Izland térségében jól kirajzolódik a tavaszi és a téli erőteljes növekvő tendencia, míg nyáron és ősszel a cikloncentrumok kis mértékű áthelyeződése figyelhető meg. A ciklonok eltolódása Grönland esetén a sziget belseje felé, Izlandnál pedig keletebbre történik.

4. A mediterrán térségben erős csökkenő tendencia figyelhető meg tavasszal és télen. Ezzel párhuzamosan ősszel és még inkább nyáron a cikloncentrumok áthelyeződését detektálhatjuk a térségben. Nyáron a Tirrén/Ligur-tenger vidékén a ciklonok délnyugati irányba tolódtak el, valamint az adriai-tenger déli részén a ciklonok gyakorisága markánsan megnövekedett.

5. Az 1957-2002 időszakban a ciklonaktivitás (cai értékek alapján) télen erősebb volt, mint nyáron. A vizsgált térségben a legintenzívebb ciklogenezis Grönland és Izland környékére tehető.

6. A hideg- és melegfrontok beazonosítására 19 feltételrendszert dolgoztunk ki, melyek közül három adott a valóságot elfogadható mértékben közelítő frontgyakoriságot. Mivel a különböző frontdefiníciók alapján elvégzett tendenciaanalízisek jelentősen eltérő eredményre vezettek, ezért e területen további vizsgálatok szükségesek.

5. Globális éghajlati modellek eredményeinek dinamikus leskálázása a Kárpát-medence térségére

Az európai éghajlatváltozást vizsgáló PRUDENCE projekt 50 km-es felbontású modellszimulációi alapján készítettünk becsléseket a Kárpát-medence térségére a 2071-2100 időszakra. A beszámoló e fejezetében a várható hőmérséklet- és csapadékváltozás mértékét elemezzük az A2 és a B2 globális IPCC scenáriók esetére.

5.1. Regionális éghajlati modellezés a PRUDENCE projekt keretében

Az 1990-es évek elejére egyértelművé vált, hogy a globális éghajlati modellekkel készített klímabecslések pontossága regionális térszkálán nem megfelelő, s keresni kellett valamilyen módszert, mellyel a globális skálájú modellek eredményeiből kiindulva a regionális leskálázás végrehajtható. Elsőként Giorgi és munkatársai (*Giorgi, 1990*) fejlesztették ki az ún. beágyazott modellekkel való szimulációt, amikor a globális modellek eredményeit bemenő paraméterként felhasználva korlátos tartományú beágyazott modellek írják le a finomabb skálájú légköri folyamatokat. A ma használatos regionális modellek felbontása akár már 10-20 km is lehet. A regionális klímamodellezés témakörében a XXI. század elején az V. és VI. EU-keretprogramban számos, az egész kontinenst átfogó program indult (PRUDENCE, STARDEX, ENSEMBLES, CECILIA, CLAVIER). E projektek sorában a legelső a PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk>) volt, mely további kutatásokhoz már 2005-től rendelkezésre bocsátotta a regionális éghajlati szimulációk eredményeit.

A PRUDENCE projektben kilenc Európai Unió országából összesen 21 egyetem, nemzeti meteorológiai szolgálat és kutatóintézet vett részt, a projekt vezetője a Dán Meteorológiai Intézet volt, a résztvevők között többek között megtalálhatjuk a brit Hadley Központot, a hamburgi Max Planck Intézetet, valamint a trieszti Nemzetközi Elméleti Fizikai Központot (Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, ICTP). A regionális modellszimulációk kiindulási- és peremfeltételeihez három globális éghajlati modell (a brit HadAM3, a hamburgi ECHAM5, s a francia ARPEGE) outputjait használták fel. A szimulációk során mindösszesen 10 regionális éghajlati modell került alkalmazásra (*Christensen, 2005*). A futtatásokban a teljes európai térségre egységesen 50 km-es horizontális felbontást alkalmaztak. Minden esetben az éghajlati szimulációk referencia időszaka 1961-1990 volt, az éghajlati projekciók célidőszaka pedig 2071-2100. A

regionális modellek mindegyikét az IPCC-jelentésekben szereplő A2 scenárióra futtatták, s ahol csak lehetőség volt rá, a B2 scenárióra is.

Az A2 scenárió a világ sokféleségének megmaradásával, valamint az emberiség lélekszámának állandó, de lassú növekedésével számol. A gazdasági és technikai fejlődés várhatóan minden földrajzi régióban érvényesül, de az összes forgatókönyv közül ez esetben a leglassabban (IPCC, 2007). Ezt tartják az IPCC-scenáriók közül a legpesszimistábbnak, mivel 2100-ra a globális szén-dioxid szint 850 ppm-re történő növekedését feltételezi, s ez az ipari forradalom előtti légköri mennyiség közel háromszorosa. A B2 scenárió a felmerülő környezeti és társadalmi problémák regionális szintű megoldását helyezi előtérbe. A földi népességszám várhatóan növekszik, de az A2 feltételezésénél lassabban. A gazdasági növekedés közepes ütemű, a technológiai változások visszafogottabbak, ugyanakkor szerteágzóbbak, mint a másik három alapscenárió esetén (IPCC, 2007). Még ez az optimistának tekinthető B2 scenárió is a szén-dioxid globális koncentrációjának 600 ppm-re, vagyis az ipari forradalom előtti szint több mint kétszeresére történő növekedésével számol a XXI. század végére.

Az alábbiakban összegezzük a Kárpát-medence térségére a XXI. század végére várható regionális éghajlatváltozási scenáriókat a PRUDENCE modellszimulációk felhasználásával. Az évszakos hőmérsékleti paraméterek várható alakulását elemezzük, majd az évszakos csapadék valószínűsíthető változását mutatjuk be.

5.2. A Kárpát-medencében várható hőmérsékletváltozás mértéke

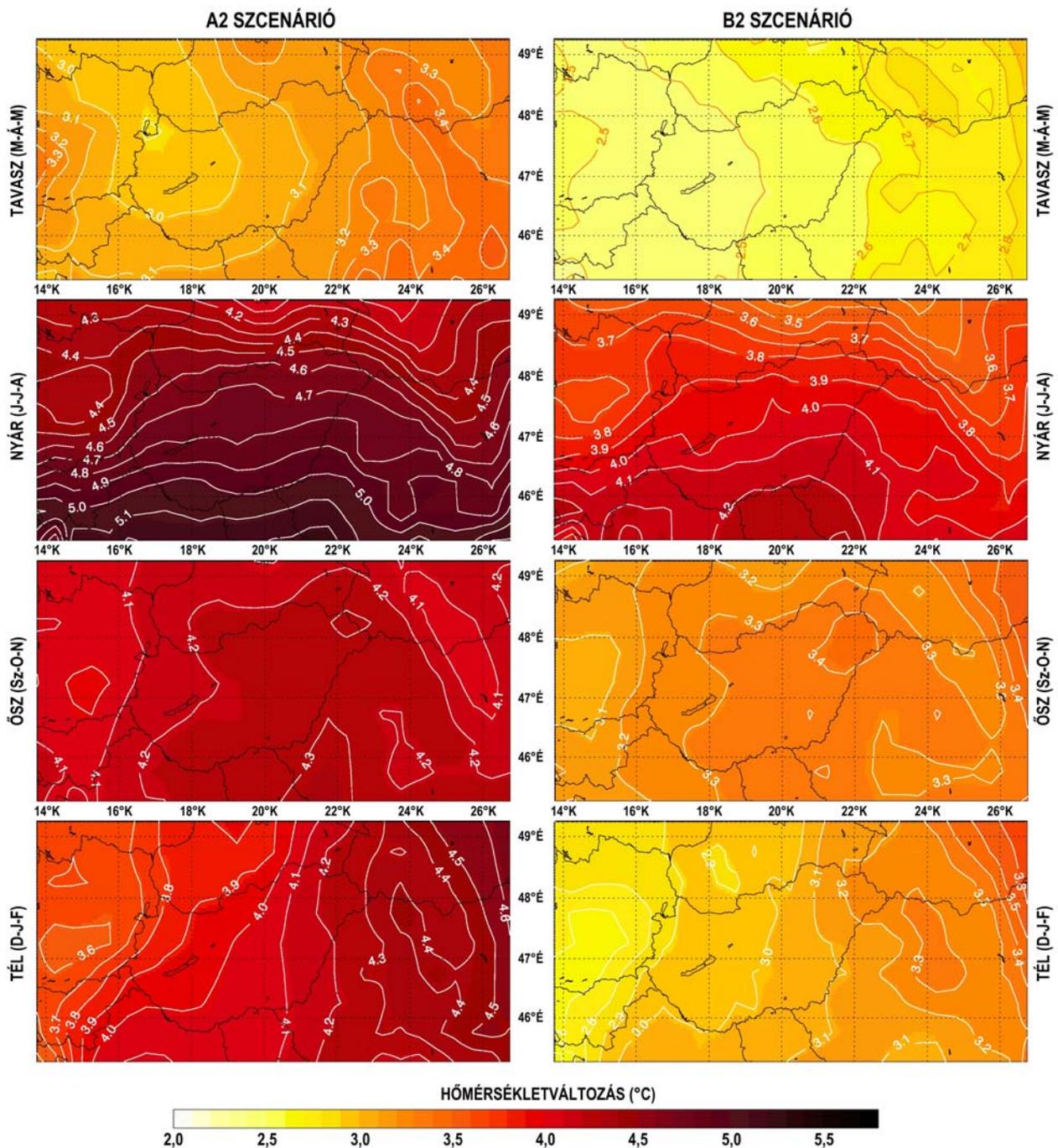
Jelen vizsgálatainkban a Kárpát-medencét reprezentáló területnek a 45,25°-49,25°É és 13,75°-26,50°K által kijelölt térséget választottuk. Elsőként az 1961-1990 közötti referencia időszakra kapott szimulációs eredményeket elemeztük, mely a klímamodellek validálásának hagyományos módja. A PRUDENCE szimulációk értékelésére az ún. CRU adatbázist (*New et al., 1999*) használtuk fel, melyet a Kelet-Angliai Egyetem Éghajlatkutató Osztálya (University of East Anglia Climatic Research Unit) állított össze földfelszíni meteorológiai mérések alapján. Általánosságban elmondhatjuk, hogy a szimulációk valamelyest felülbecslik a hőmérsékletet a Kárpát-medence térségében, csak a vizsgált terület nyugati és az északkeleti határain figyelhetünk meg csekély mértékű alulbecslést. A legnagyobb felülbecslés az ország déli részén figyelhető meg, de ennek mértéke sem haladja meg a 1,5 °C-ot.

A validálást követően az évszakos átlaghőmérséklet várható alakulását vizsgáltuk a 2071-2100 időszakra. Az 5.1. ábra kompozit térképein (melyeket a rendelkezésre álló különböző modellfuttatásokból kapott várható évszakos változások átlagaként állítottunk elő) mutatjuk be a várható évszakos hőmérséklet-növekedést az A2 (balra), illetve a B2 (jobbra) scenárió esetén (melyhez 16, illetve 8 modellfuttatást használtunk fel). Hasonlóan a globális és európai eredményekhez, a kárpát-medencére is az A2 scenárió esetén nagyobb melegedés várható, mint a B2 esetén.

Az 5.1. táblázatban a magyarország területére várható melegedés mértékét összegezzük. A melegedés mindkét scenárió esetén nyáron a legnagyobb (4,5-5,1 °C, illetve 3,7-4,2 °C), s tavasszal a legkisebb (2,9-3,2 °C, illetve 2,4-2,7 °C). A hőmérséklet emelkedés mértéke nyáron északról dél felé, míg télen és tavasszal nyugatról kelet felé haladva növekszik. A modellek eredményeiből adódó bizonytalanságot az előrejelzett hőmérsékletváltozás szórásértékeivel jellemezve a legnagyobb szórás nyáron (0,9-1,1 °C) jelentkezik mindkét scenárió esetén (Bartholy et al., 2007).

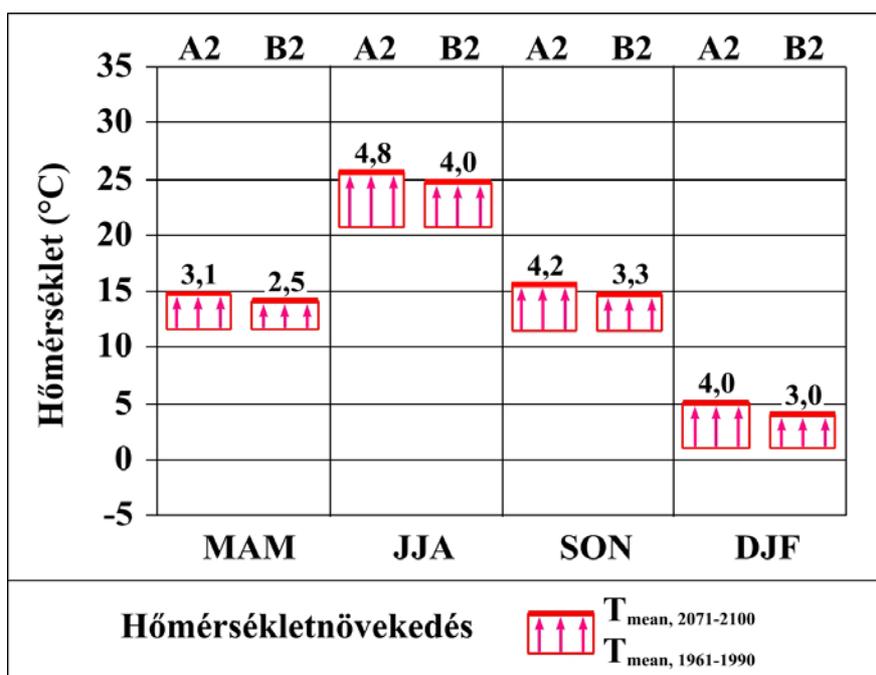
5.1. táblázat: a 2071-2100 időszakra magyarországra várható átlaghőmérséklet-változás értékei (az A2 scenárió esetén 16 modellszimuláció eredményeit vettük figyelembe, míg a B2 scenárió esetén 8 modellszimuláció eredményei álltak rendelkezésre)

SZCENÁRIÓ	TAVASZ (MÁM)	NYÁR (JJA)	ŐSZ (SZON)	TÉL (DJF)
A2	2,9-3,2 °C	4,5-5,1 °C	4,1-4,3 °C	3,7-4,3 °C
B2	2,4-2,7 °C	3,7-4,2 °C	3,2-3,4 °C	2,9-3,2 °C



5.1. ábra: A várható évszakos hőmérsékletváltozás mértéke (°C) a Kárpát-medence térségére 16, illetve 8 európai regionális éghajlati modellszimuláció eredményei alapján a 2071-2100 időszakra, A2 (bal oldalon) illetve B2 (jobb oldalon) scenárió esetére. Referencia időszak: 1961-1990.

Az 5.2. ábra összegezi az A2 és B2 scenáriók esetén Magyarországra várható évszakos hőmérsékletváltozásokat. Általánosságban elmondhatjuk, hogy a 2071-2100 időszakra a melegedés mértéke mindkét scenárióra és minden évszakra meghaladja a 2,5 °C-ot, de kisebb mint 4,8 °C. A legkisebb eltérés az A2 és B2 scenárió között tavasszal várható (0,6 °C), míg legnagyobb télen (1,0 °C). A melegedés a legnagyobb mértékű várhatóan nyáron lesz, 4,8 °C az A2 scenárió esetén, és 4,0 °C a B2 scenárióra. A legkisebb hőmérséklet-növekedés tavasszal várható: 3,1 °C (A2), illetve 2,5 °C (B2).



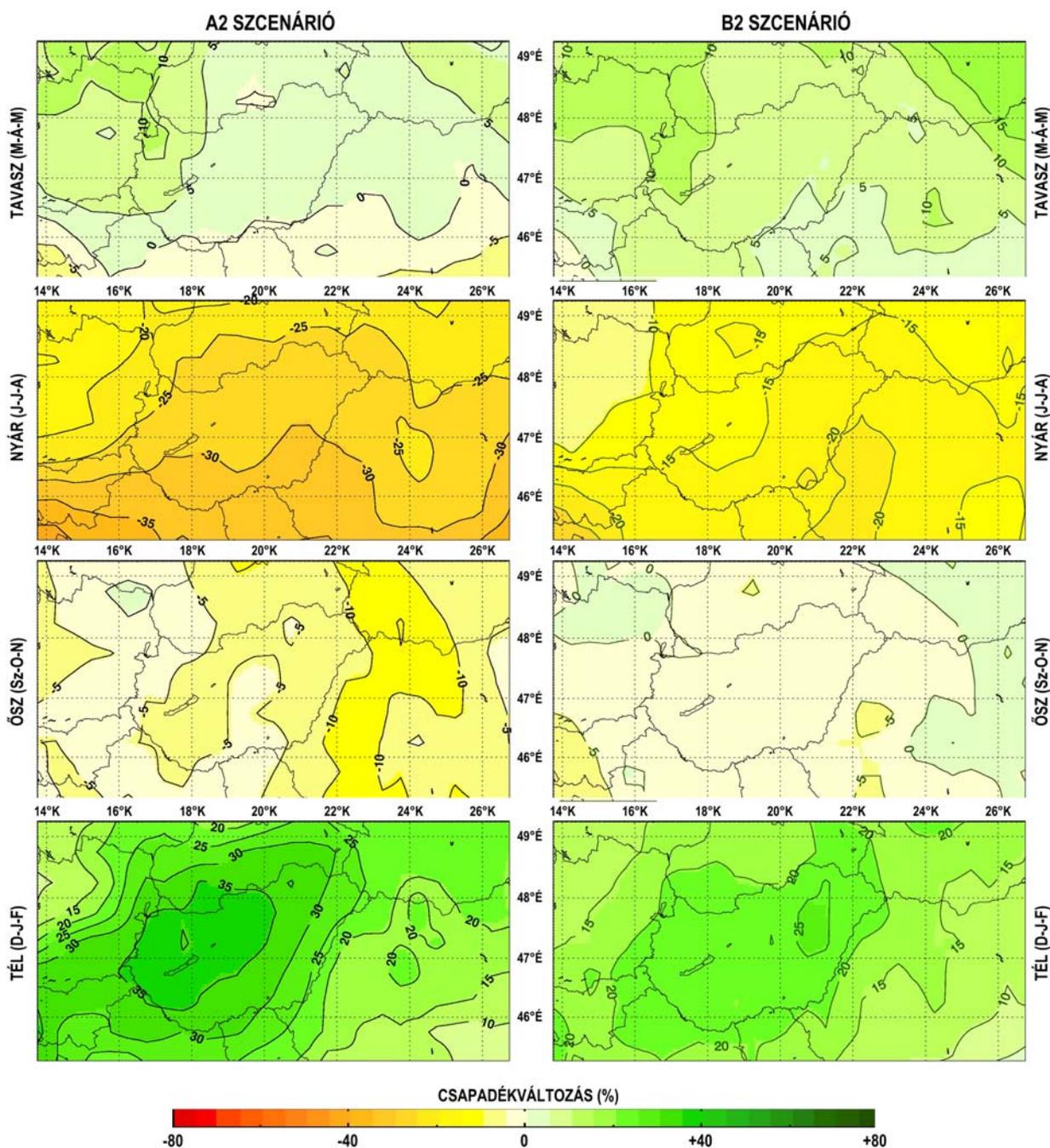
5.2. ábra: A XXI. század végére Magyarországra várható átlaghőmérséklet-változás évszakos értékei (az 1961-1990 közötti referencia-időszak hőmérsékletei a Budapesten mért értékeket jelzik).

5.3. A Kárpát-medencében várható csapadékváltozás mértéke

A hőmérséklethez hasonlóan, a csapadékra is végeztünk hibaanalízist az 1961-1990 időszakra a CRU adatbázis (New et al., 1999) felhasználásával. A csapadék esetén a modellek inkább felülbecslik a jelen éghajlati viszonyokat, s csupán a vizsgált terület délnyugati régiójában találunk alulbecslést. Szigorúan hazánk területét vizsgálva a szimulált és mért csapadéértékek közötti eltérések a -10% és +20% közötti intervallumba esnek.

Mind az A2, mind a B2 scenárió esetén az éves csapadékösszegekben nem várható jelentős mértékű változás (Bartholy et al., 2003), de ezt nem mondhatjuk el az évszakos csapadékösszegekről. A regionális klímamodellek által a Kárpát-medence térségére 2071-2100-ra becsült várható csapadékváltozások évszakos kompozit térképeit az 5.3. ábrán mutatjuk be, balra az A2, jobbra a B2 scenáriót figyelembe véve. Amint jól látható, a csapadékösszegek változásának várható tendenciája nem minden évszakban azonos előjelű. Nyáron (és kisebb mértékben ősszel) a teljes vizsgált térségben a csapadék csökkenésére, míg télen (és kisebb mértékben tavasszal) a csapadék növekedésére számíthatunk.

Az 5.2. táblázatban foglaljuk össze az évszakos csapadékváltozások Magyarországra várható értékeit a két vizsgált scenárióra. A hőmérséklethez hasonlóan az A2 scenárió esetén nagyobb mértékű csapadékváltozások valószínűsíthetők, mint a B2 scenárióra. Az előrejelzett csapadékcsökkenés mértéke nyáron 24-33% (A2 scenárió), illetve 10-20% (B2 scenárió), míg a téli csapadéknövekedés mértéke 23-37% (A2 scenárió), illetve 20-27% (B2 scenárió). A modelleredményekből adódó bizonytalanságot reprezentáló évszakos szórás térképek (Bartholy et al., 2007) alapján a modellek előrejelzésében a legnagyobb eltérések az A2 scenárió esetén nyáron mutatkoznak (amikor a szórásértékek akár a 20%-ot is elérhetik), míg a B2 scenárió esetén tavasszal (amikor a szórásértékek elérik a 16%-ot). A többi évszakban relatíve jó egyezés mutatkozik a modelleredmények között (Bartholy et al., 2007). Természetesen a hőmérsékletben mutatkozó szórásokhoz viszonyítva a várható évszakos csapadékösszegekben nagyobb bizonytalanságot mutatnak a modelleredmények.



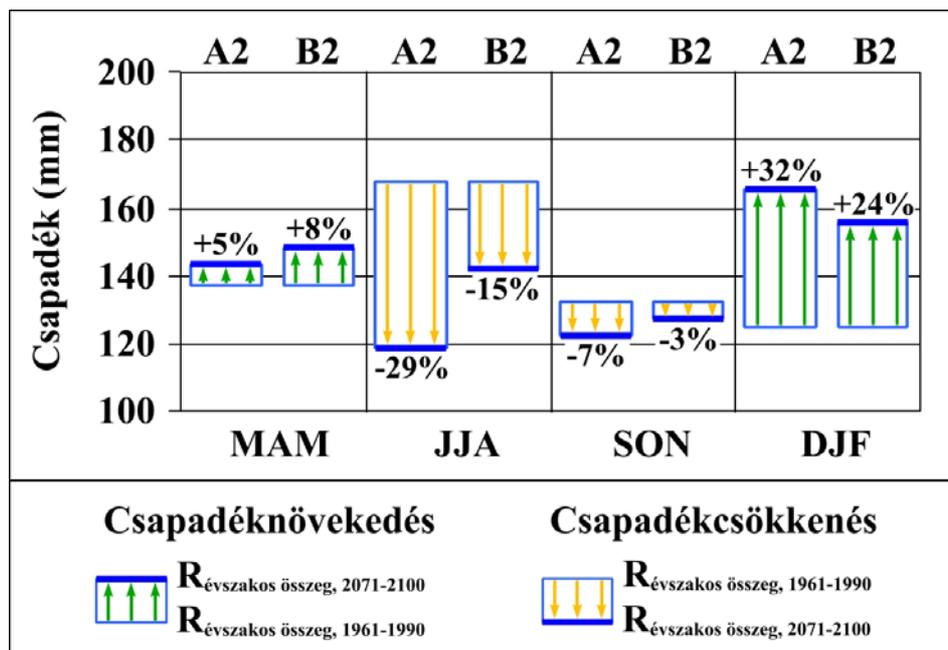
5.3. ábra: A várható évszakos csapadékváltozás mértéke (%) a Kárpát-medence térségében 16, illetve 8 európai regionális éghajlati modellszimuláció eredményei alapján a 2071–2100 időszakra, A2 (bal oldalon), illetve B2 (jobb oldalon) scenárió esetére. Referencia időszak: 1961-1990.

5.2. táblázat: a 2071–2100-ra várható évszakos csapadékváltozás értékei magyarországra (az A2 scenárió esetén 16 modellszimuláció eredményeit vettük figyelembe, míg a B2 scenárió esetén 8 modellszimuláció eredményei álltak rendelkezésre).

Szenárió	Tavaszi (MAM)	Nyári (JJA)	Őszi (SON)	Téli (DJF)
A2	0 – (+10) %	(-24) – (-33) %	(-3) – (-10) %	(+23) – (+37) %
B2	(+3) – (+12) %	(-10) – (-20) %	(-5) – 0 %	(+20) – (+27) %

Az 5.4. ábrán illusztráljuk a magyarországi csapadék éves eloszlásában várható változást az A2 és a B2 scenárió esetén. Az évszakos csapadékcsökkenést sárga, míg a csapadéknövekedést zöld nyilak jelölik. Az 1961-1990 közötti referencia időszakban az átlagosan lehullott csapadékmennyiség alapján az évszakok csökkenő sorrendje: nyár, tavasz, ősz, tél (a referencia-időszak értékeit a Budapesten mért csapadékösszegek alapján tekintettük, ami a sokéves átlagokat nézve

nagyjából az országos sorrendnek is megfelel). A modelleredmények valószínűsítik e sorrend teljes átrendeződését a XXI. század végére. A modellek azt jelzik, hogy mindkét scenárió esetén a legcsapadékosabb két évszak a tél és a tavasz lesz (ebben a sorrendben). A legszárazabb évszak az A2 scenárió figyelembe véve várhatóan a nyár, míg a B2 scenárió esetén az ősz lesz. A klímaprojekciók alapján a B2 scenárió esetén az évszaki csapadékmennyiségek közötti különbségek szignifikáns csökkenése várható (felére csökken), mely azt eredményezi, hogy az éves csapadékeloszlás kiegyenlítettebbé válik a XXI. század végére. Nem mondható el ugyanez az A2 scenárió esetére, ahol várhatóan továbbra is jelentős mértékben eltér egymástól a téli és a nyári csapadékösszeg, csak a legszárazabb és a legcsapadékosabb évszak felcserélődik.



5.4. ábra: A XXI. század végére Magyarországra várható csapadékváltozás évszaki értékei (az 1961-1990 közötti referencia-időszak értékei a Budapesten mért csapadékösszegeket jelzik).

A Kárpát-medencében várható hőmérséklet- és csapadékváltozás elemzésekor a fentiekben nem vettük figyelembe azt, hogy a múltira vonatkozóan az egyes klímamodellek milyen hibákkal szimulálták az éghajlatot, és persze azt sem, hogy milyen hibák lesznek a jövőre nézve. Ily módon a levont következtetések nem tekinthetők teljesen pontosnak, sokkal inkább kvalitatív becslésként értelmezhetőek, melyek a jellemző várható tendenciákat jelölik ki.

5.4. Az 1 °C-os globális melegedés esetén várható éghajlatváltozás Magyarországon

A PRUDENCE projekt keretében végzett modellfuttatások célidőszaka a XXI. század vége (2071–2100), így a Kárpát-medencére vonatkozó elemzéseinkben mi is ezt az időszakot vizsgáltuk. A klímaváltozások hatásvizsgálatához a közelebbi jövőre vonatkozó előrejelzésekre lenne szükség, melyek egyelőre még nem állnak rendelkezésre. A századvégre (2071–2100) vonatkozó modellbecslések alapján *Christensen* (2005) meghatározta az 1°C-os globális melegedéshez tartozó regionális hőmérséklet- és csapadékváltozásokat az európai országokra (az A2, illetve a B2 scenáriók esetén adódó globális melegedés mértékét 1 °C-hoz arányosítva). Ehhez az elemzéshez 50 km × 50 km-es ráccsal fedték le egész Európát, és az adott országok területére eső rácsponti értékeket átlagolták. Majd az összes modellfuttatás (25) hőmérsékletre és csapadékra vonatkozó becsléseit összegezték. Ezután az éves és évszaki átlag- illetve szórásértékek alapján egy normál eloszlású valószínűségi függvényt illesztettek, és ez alapján számították a 95., 50. és 5. percentiliseket, melyek mindegyikéhez megadták a 95%-os konfidencia-intervallumot is. Ezeket az eredményeket foglaljuk össze Magyarországra a 5.3. táblázatban a hőmérsékletre, illetve a csapadékra vonatkozóan, melyek közel harminc rácspont becsléseit veszik alapul. A számszerűsített

eredmények összhangban vannak az előző két fejezetben bemutatott térképeken látható becslésekkel.

A hőmérsékletre vonatkozóan egyértelmű melegedő tendencia jelentkezik, mely erősebb az 1 °C-os globális átlaghőmérséklet-emelkedésnél. Az éves 1,4 °C-os hőmérséklet-emelkedésnél nagyobb mértékű változásra számíthatunk nyáron és ősszel (1,7 °C, illetve 1,5 °C), míg télen és tavasszal valamivel kisebb mértékűre (1,3 °C, illetve 1,1 °C).

5.3. táblázat: Az 1 °C-os globális hőmérsékletnövekedés esetén Magyarországra vonatkozó várható hőmérséklet- és csapadékváltozások 2071–2100 időszakra 25 modellszimuláció eredményei alapján (Christensen, 2005). A percentilisek esetén a zárójelben található értékek a 95%-os konfidencia-intervallumot jelölik.

	Éves	Tavasz (MAM)	Nyár (JJA)	Ősz (SON)	Tél (DJF)
Hőmérséklet (°C)					
Átlag	1,4	1,1	1,7	1,5	1,3
Szórás	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3
95. percentilis	1,9 [1,8-2,1]	1,6 [1,5-1,8]	2,4 [2,2-2,6]	2,0 [1,8-2,1]	1,9 [1,7-2,1]
5. percentilis	0,9 [0,7-1,0]	0,6 [0,5-0,8]	1,0 [0,8-1,2]	1,0 [0,8-1,1]	0,8 [0,6-0,9]
Csapadék (%)					
Átlag	-0,3	0,9	-8,2	-1,9	9,0
Szórás	2,2	3,7	5,3	2,1	3,7
95. percentilis	3,4 [2,2-4,6]	7,0 [5,0-9,0]	0,5 [(-2,3)-(3,2)]	1,5 [0,4-2,7]	15,0 [13,0-16,9]
5. percentilis	-3,9 [(-5,1)-(-2,8)]	-5,2 [(-7,2)-(-3,3)]	-16,9 [(-19,5)-(-14,1)]	-5,3 [(-6,4)-(-4,2)]	3,0 [1,0-5,0]

Az 1 °C-os globális átlaghőmérséklet-emelkedés esetén várható éves csapadékváltozást csekély mértékű negatív tendencia jellemzi. Az évszakos csapadékösszegben hazánkban jelentős (abszolút értékben átlagosan közel 10%-os) változás a téli és nyári évszakban valószínűsíthető, előbbi esetén növekedésre, utóbbinál csökkenésre számíthatunk. Az átmeneti évszakokban a különböző modellek által adott becslések nem ennyire egyértelműek – némelyeknél csökkenést, másoknál növekedést kapunk Magyarország térségére.

5.5. Következtetések

Az Európai Unió V. keretprogramon belül a PRUDENCE projekt az A2 és B2 scenárióra Európára ad becsléseket a XXI. század utolsó három évtizedére, 50 km-es rácsfelbontással. Ennek eredményei alapján levonható az az általános következtetés, hogy hasonlóan a globális és európai trendekhez, a Kárpát-medencére is az A2 scenárió esetén nagyobb melegedés várható, mint a B2 esetén. A 2071–2100-ra várható melegedés mindkét scenárió esetén nyáron a legnagyobb (4,8 °C, illetve 4,0 °C), s tavasszal a legkisebb (3,1 °C, illetve 2,5 °C). Nyáron zonális struktúra figyelhető meg, azaz a várható melegedés mértéke északról dél felé növekszik. Télen általában meridionális struktúra várható, azaz nyugatról keletre haladva nő a várható melegedés. A 2071–2100-ra várható éves csapadékváltozást csekély mértékű negatív tendencia jellemzi, mely az egymással ellentétes jelentős mértékű évszakos változásokból adódik: télen növekedő, nyáron viszont csökkenő évszakos csapadékösszeg valószínűsíthető. Az előrejelzett csapadékcsökkenés mértéke nyáron 24–33% (A2 scenárió), illetve 10–20% (B2 scenárió), míg a téli csapadéknövekedés mértéke 23–37% (A2 scenárió), illetve 20–27% (B2 scenárió). Az 1961–1990 közötti referencia időszakban a legcsapadékosabb évszakunk a nyár volt, míg a legszárazabb a tél. A modelledmények valószínűsítik az éven belüli csapadékeloszlás átrendeződését a XXI. század végére. A modellek azt jelzik, hogy mindkét scenárió esetén a legcsapadékosabb évszak a tél lesz, míg a legszárazabb várhatóan a nyár (A2 scenárió), illetve az ősz (B2 scenárió).

Hangsúlyozzuk, hogy ezen becslések nem pótolják a PRUDENCE keretében alkalmazott dinamikus modellekhez hasonló, ám a XXI. század egészére kiterjedő finom felbontású (akár 10 km-es) regionális klímaváltozási elemzést, mely több globális éghajlati szcenáriót vesz figyelembe és számos meteorológiai paramétert tartalmaz. Regionális éghajlati modellek adaptálása Magyarországon jelenleg mind az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén (Bartholy et al., 2006), mind az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (Horányi, 2006) folyamatban van. Amíg ezekből a részletes elemzések elkészülnek, addig az itt bemutatott eredmények tendencia jellegű információkat nyújthatnak minden érdeklődőnek, a klímapolitikusoknak, illetve a nemzetgazdaság többi érintett szektorának. A felhasználhatóságot jelzi az a tény is, hogy a beszámolóban szereplő eredmények a Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia meteorológiai részét szolgáltatták.

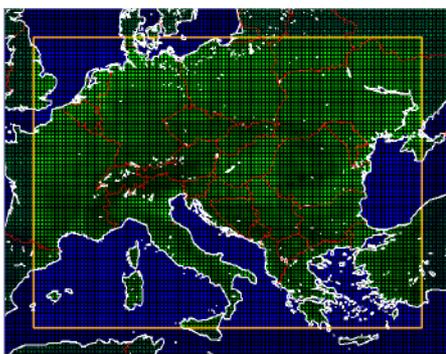
6. Regionális skálájú dinamikus modelladaptáció (PRECIS) a Kárpát-medence térségére

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Meteorológiai Tanszékén a PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies) regionális klímamodell hazai adaptálására került sor (Bartholy et al., 2006a, 2006b), amelyek segítségével lehetőségünk nyílik becslést adni a Kárpát-medencében a XXI. századra várható éghajlatváltozásra (Bartholy et al., 2009a, Pieczka et al., 2009).

Beszámolónk e fejezetében először bemutatjuk a vizsgálataink során felhasznált PRECIS klímamodellt, majd a szimulációk alapján a 2071-2100-as időszakra Magyarországra várható hőmérséklet- és csapadékváltozást elemezzük.

6.1. A PRECIS regionális éghajlati modell

A Brit Meteorológiai Szolgálat Hadley Központjában kifejlesztett HadCM3 globális klímamodellbe (Gordon et al., 2000) ágyazott PRECIS regionális klímamodell (Wilson et al., 2007) egy olyan korlátos tartományú, finom felbontású, légköri és felszíni részeket tartalmazó modell, mely a Föld bármely térségére alkalmazható. A modellel lefedhető térség kiterjedésének felső korlátja $5000 \times 5000 \text{ km}^2$ (Jones et al., 2004). A választható horizontális rácsfelbontás 25 vagy 50 km, a modell vertikálisan 19 szinttel számol. A 6.1. ábrán azt a tartományt tüntettük fel, amit az ELTE Meteorológiai Tanszékén definiáltunk a modellszimulációk végrehajtásához. Az integrálási tartomány kiterjedése 123×96 rácspont 25 km-es horizontális rácsfelbontással, mely magába foglalja a Kárpát-medencét.



6.1. ábra: A PRECIS modell integrálási tartományának földrajzi elhelyezkedése

A referencia-időszakra (1961-1990) lefuttattuk a modellt a HadCM3 globális klímamodell eredményeit kezdeti- és peremfeltételként felhasználva. A validációhoz a CRU TS 1.2 elnevezésű, felszíni paraméterek rácsponti havi értékeit tartalmazó adatbázist (Mitchell and Jones, 2005) alkalmaztuk. Vizsgálataink alapján (Bartholy et al., 2009b, 2009c) elmondható, hogy a modell kielégítően becsülte a referencia-időszak éghajlatát. Hőmérséklet esetén a különbség átlagosan a (-1

°C; +1 °C) intervallumba esett, amely nem jelent szignifikáns eltérést. Ennél nagyobb, szignifikáns felülbecslést csak nyáron tapasztaltunk, amikor a hiba mértéke az ország területén elhelyezkedő rácspontok átlagában 2,2 °C volt. Csapadék esetén a legnagyobb hibát (országos átlagban +35%-os felülbecslést, mely szignifikánsnak bizonyult) tavasszal mutattunk ki, a többi évszakban kismértékű alulbecslést (országos átlagban -3%-ot nyáron, -7%-ot ősszel) tapasztaltunk. Télen a CRU adatbázistól vett eltérés a magyarországi rácspontok átlagában 0%-nak adódott.

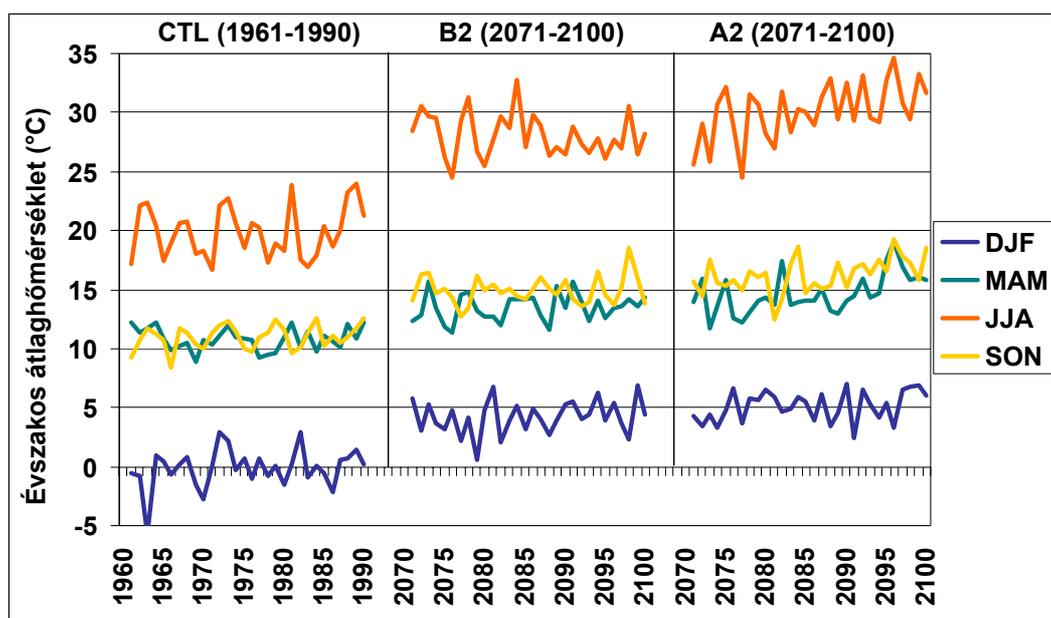
A PRECIS-vel elvégzett modellfuttatásaink a közelmúlt (vagyis az 1961-1990-es időszakon) kívül a jövő (2071-2100-as időszak) éghajlatát is szimulálják. 2071-2100-ra megvizsgáltuk az egyes éghajlati paraméterek várható megváltozását az 1961-1990-es referencia időszak átlagához képest. A következő két szakaszban az átlaghőmérsékletre illetve a csapadéokra kapott eredményeinket mutatjuk be.

6.2. A PRECIS modell szimulációi alapján várható hőmérsékletváltozás 2071-2100-ra

A 2071-2100-as időszakra két futtatást végeztünk el: az A2 és a B2 forgatókönyv (*Nakicenovic et al., 2000*) figyelembevételével. Mivel az A2 scenárióhoz magasabb századvégi CO₂-koncentráció társul (kb. 850 ppm a B2 esetén várható 625 ppm-mel szemben), ezért nem meglepő az az eredmény, mely szerint ezen forgatókönyv megvalósulása esetén magasabb hőmérsékletváltozásra kell számítanunk hazánk térségében is. A vizsgált időszakra, Magyarországra előrejelzett évszakai átlaghőmérséklet-változások értékeit a 6.1. táblázatban foglaljuk össze. Ebből egyértelműen kitűnik, hogy a legnagyobb mértékű melegedés nyárra várható. A változás mértéke minden évszakra, minden rácspontban szignifikáns 95%-os szinten (*Pieczka et al., 2009*).

6.1. táblázat: Magyarországra várható éves és évszakai átlaghőmérséklet-változás (°C) a 2071-2100-as időszakra (referencia-időszak: 1961-1990)

	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
B2 scenárió	4,0	3,1	6,0	3,9	3,2
A2 scenárió	5,4	4,2	8,0	5,2	4,2



6.2. ábra: A magyarországi évszakai átlaghőmérséklet (°C) évek közötti változékonysága

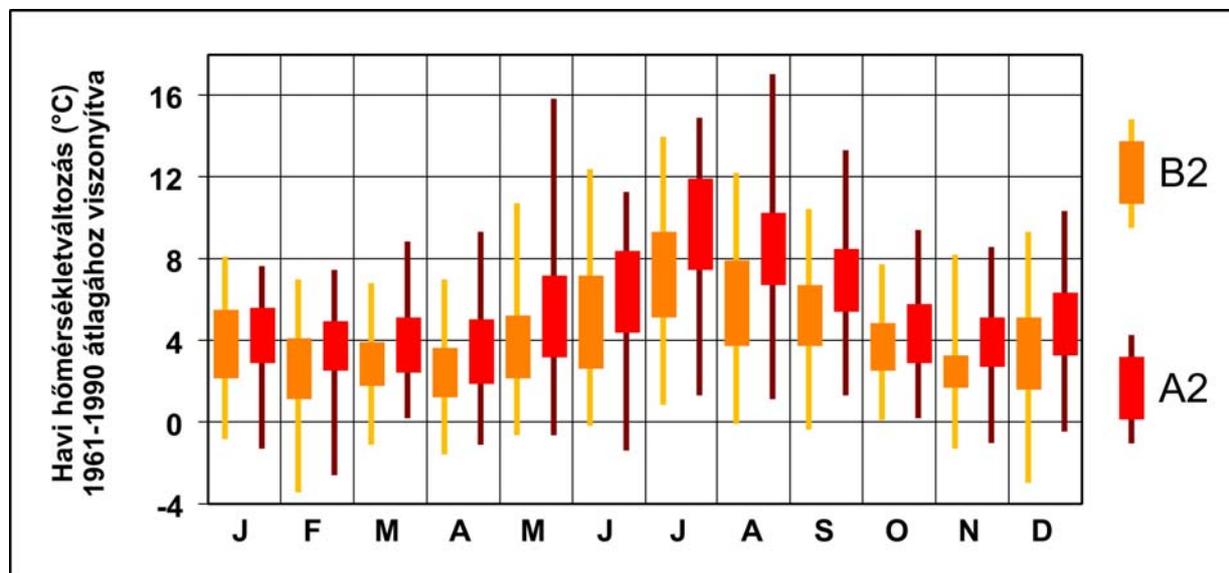
A magyarországi évszakai átlaghőmérséklet évek közötti változékonyságát feltüntető 6.2. ábráról is leolvasható, hogy a modell minden évszakra egyértelmű melegedést valószínűsít, mely

várhatóan nyáron a legnagyobb mértékű. Az évek közötti változékonyság értéke az átmeneti évszakokban a jelenlegihez képest akár másfél-kétszeresére is nőhet az A2 scenárió esetén (6.2. táblázat). Az őszi évszakban a tavaszinál nagyobb változások valószínűsíthetők az átlaghőmérsékletben. Ez abban is megmutatkozik, hogy az átmeneti évszakok közül az ősz (elsősorban a késő nyári – kora őszi erőteljes melegedés miatt) válik melegebbé (Bartholy *et al.*, 2009c).

6.2. táblázat: A hőmérséklet időbeli szórása (°C) Magyarországra az 1961–1990-re és a 2071–2100-ra vonatkozó modellszimulációk esetén

	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
1961-1990	1,0	0,9	2,2	1,0	1,7
2071-2100 B2 scenárió	0,8	1,2	1,9	1,2	1,4
2071-2100 A2 scenárió	1,3	1,7	2,4	1,5	1,3

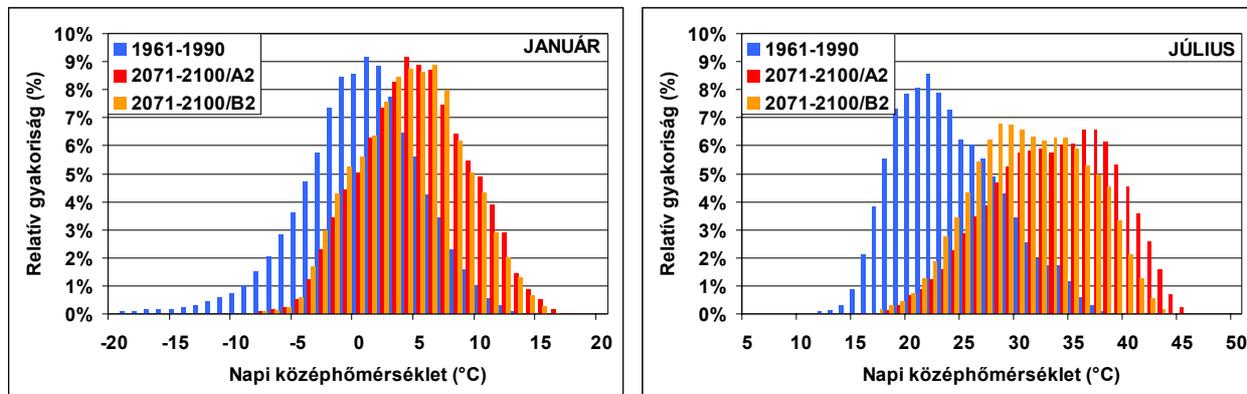
A 6.3. ábrán a 2071-2100-ra várható havi hőmérsékletváltozások magyarországi rácspontokra számított értékeiből meghatározott Box-Whisker diagramok láthatók mindkét vizsgált scenárióra. A kis téglalapok a teljes minta alsó- és felső kvartilisét, a függőleges vonalak pedig a minta minimumát és maximumát jelzik. Az alsó kvartilis értéke minden esetben (és sok esetben a minimum is) 0 °C felett helyezkedik el, amely a várható hőmérséklet-emelkedést hangsúlyozza. A kis téglalapok reprezentálják az adatok középső 50%-át; minél nagyobb azok mérete, annál nagyobb a rácsponti értékek szórása. A két különböző scenárió esetén az adatok középső felének szórása nagyságrendileg azonos, átlagosan 2-4 °C körüli, a legnagyobb értékeket nyáron veszi fel. Az 1961-1990-es referencia időszak átlagához viszonyítva negatív hőmérsékleti anomália csak kevés rácspontban, illetve időpontban várható.



6.3. ábra: A magyarországi rácspontokban várható havi hőmérsékletváltozások (°C) eloszlása 2071-2100-ra (referencia-időszak: 1961-1990)

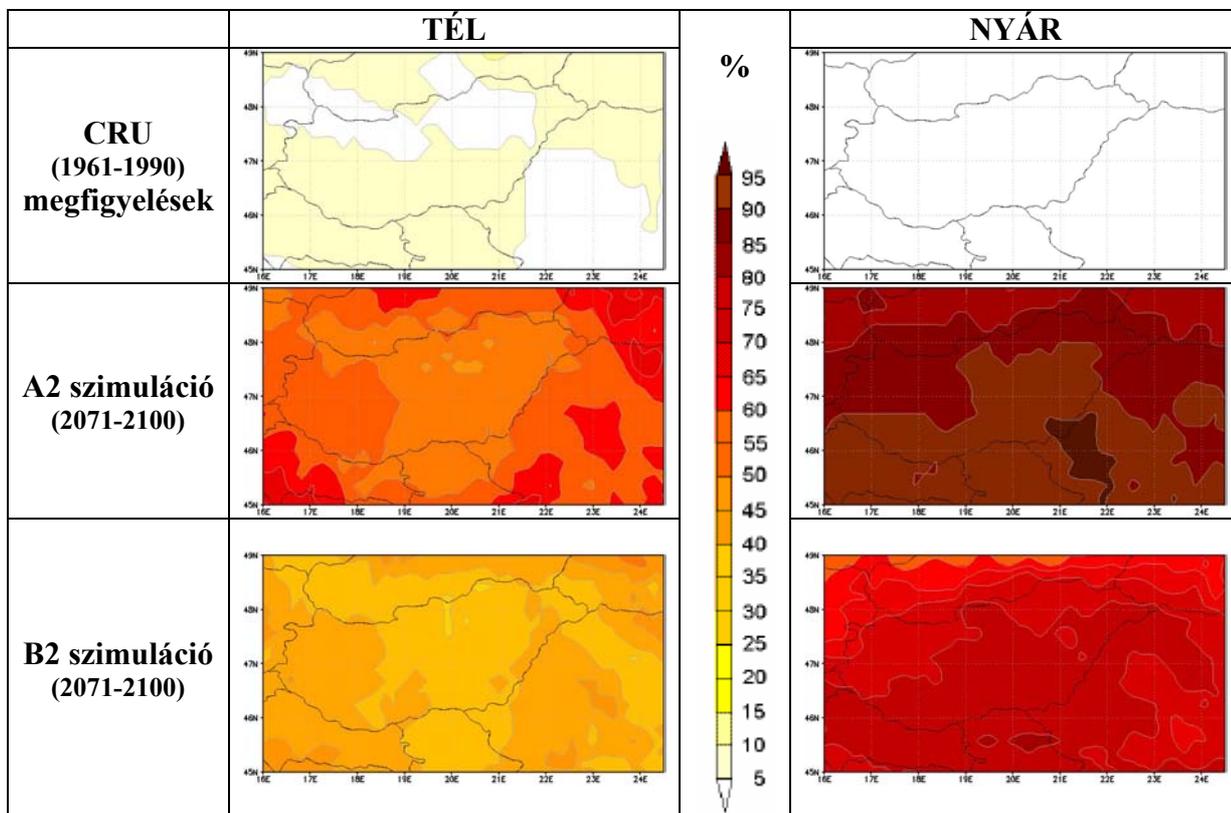
Megvizsgáltuk a szimulált napi középhőmérsékletek várható havi gyakoriságváltozásait, s eredményeink közül a leghidegebb (január) és a legmelegebb (július) hónapokra vonatkozó elemzést mutatjuk be a 6.4. ábrán. Januárban az eloszlás pozitív irányba való eltolódására számíthatunk (havi átlagban +4,3 °C, illetve +3,8 °C rendre az A2, illetve B2 forgatókönyv esetén), mely várhatóan kevesebb hideg és több meleg időszakkal, valamint rekord meleggel jár együtt. Júliusban ezen kívül a sűrűségfüggvény alakjának megváltozását is leolvashatjuk a jobb oldali

grafikonról, mely szerint a különböző hőmérséklet-értékek gyakoriságának jelentős megváltozására számíthatunk (havi átlagban +9,4 °C, illetve +7,2 °C a várható változás az A2, illetve a B2 forgatókönyv esetén). Amíg január hónapra a két jövőbeli forgatókönyv hasonló eloszlásokat jelez előre, addig júliusban eltérést figyelhetünk meg közöttük, mely mind az átlagosnál hidegebb, mind az annál melegebb tartományban igen jelentős. Az A2 scenárió a B2-höz képest kevesebb hidegebb és több melegebb időszakkal, valamint rekord meleggel számol.



6.4. ábra: A szimulált napi középhőmérsékletek havi gyakoriságváltozásai januárban (bal oldalon) és júliusban (jobb oldalon)

Annak érdekében, hogy az éghajlati paraméterek eloszlásának megváltozásáról ne csak időbeli, hanem térbeli információkat is szolgáltatassunk (ezáltal megjelenítve az ország egyes régiói közötti különbségeket), egy speciális vizsgálati módszert dolgoztunk ki. A módszer célja annak meghatározása, hogy a múlt átlagától vett jövőbeli eltérés bizonyos küszöbértékeket milyen gyakorisággal fog meghaladni a modellszámítások alapján.

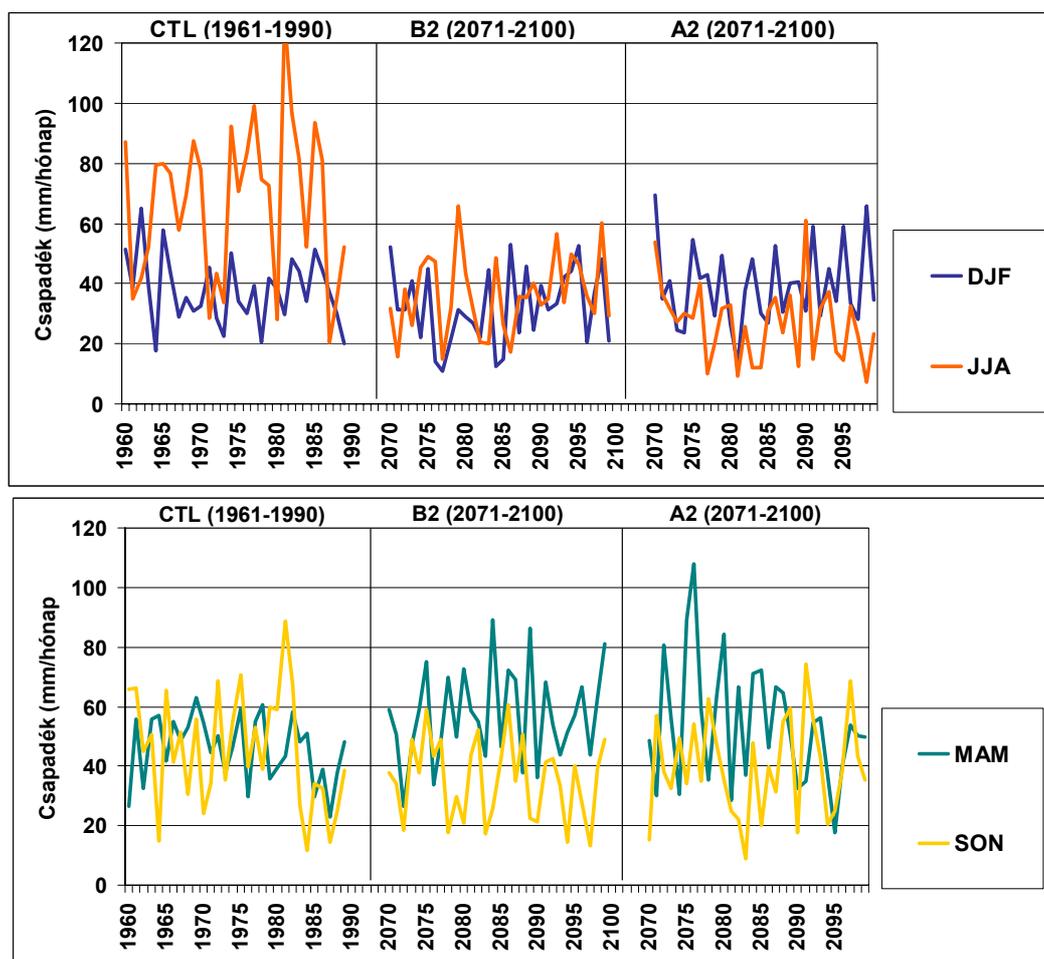


6.5. ábra: A 4 °C-nál nagyobb havi hőmérsékleti anomáliák előfordulási gyakorisága télen (bal oldalon) és nyáron (jobb oldalon)

A 6.5. ábra megjeleníti a +4 °C-nál nagyobb hőmérsékleti anomáliák előfordulási valószínűségének területi eloszlását a téli és nyári hónapokra a jelen (1961-1990) klimatikus viszonyok mellett, valamint a 2071-2100-as jövőbeli időszakra. A felhasználók számára értékes információt adhat, hogy az adott küszöbértékek túllépésének gyakorisága az ország mely területein milyen mértékben változhat a jövőben. A múltban a téli hónapokban a +4 °C-ot meghaladó pozitív anomáliák a teljes időszak 5-10%-ában fordultak elő, nyáron pedig egyáltalán nem. A PRECIS modell szerint a század végére igen jelentős lesz a múltbeli átlagos hőmérsékletnél legalább +4 °C-kal magasabb havi átlaghőmérsékletek előfordulási gyakorisága (A2: télen 50-60%, nyáron 85-95%; B2: télen 35-45%, nyáron 70-80%). Télen a legnagyobb változás a Dunántúlon várható, ez azonban kisebb mértékű, mint a nyárra várható. A két scenárió között értékeikben figyelhetünk meg nagyobb különbséget (mint azt már eddig is láthattuk, az A2 forgatókönyv nagyobb mértékű melegedést vetít előre), a változások térbeli szerkezete hasonló.

6.3. A PRECIS modell szimulációi alapján várható csapadékváltozás 2071-2100-ra

Az éves csapadékösszeg tekintetében a modell átlagosan mintegy 20%-os csökkenést valószínűsít. Az éven belül a legnagyobb változás nyárra várható, amelyre a PRECIS szignifikáns szárazodást prognosztizál az ország egész területére (ennek értéke A2 scenárió esetén 58%, B2 esetén 43% országos átlagban). Tavaszra és őszi szintén csökkenéssel számolhatunk, bár ez sokkal kisebb mértékű, és a vizsgálatok alapján nem, vagy csak hazánk területének néhány %-ában szignifikáns. Egyedül télen számíthatunk némi (országos átlagban 14%-os) növekedésre, mely az A2 scenárió esetén a Dunántúl térségében szignifikáns, s ott eléri a 30-40%-os mértéket (*Pieczka et al., 2009*)



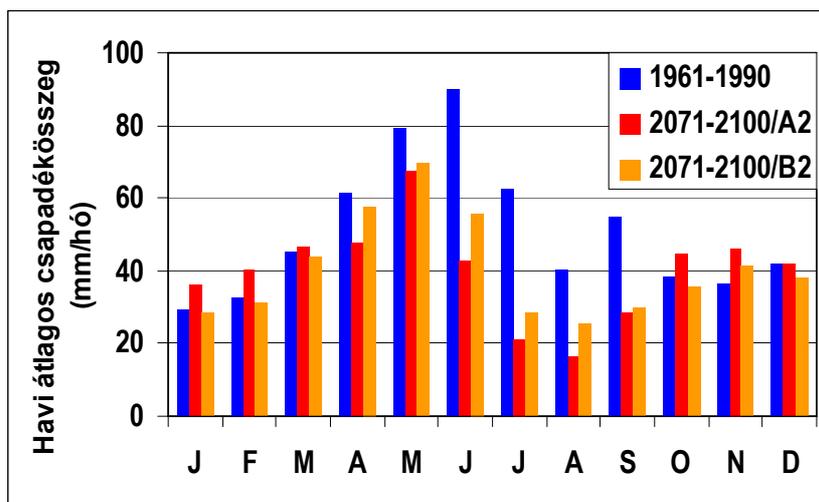
6.6. ábra: A magyarországi évszakos átlagszapadék (mm/hó) évek közötti változékonysága

A csapadék térben és időben rendkívül változékony. Évek közötti változékonyságát a modellszimulációk alapján vizsgálva megállapíthatjuk, hogy jelentős változások bekövetkezésére számíthatunk (6.6. ábra). A csapadék éves menetének átrendeződését, a nyári változékonyság és csapadékösszeg szignifikáns csökkenését, tavasszal és télen a szórás növekedését valószínűsítik az eredmények (6.3. táblázat).

6.3. táblázat: A csapadék időbeli szórása (mm/hó) Magyarországra az 1961–1990-re és a 2071–2100-ra vonatkozó modellszimulációk esetén

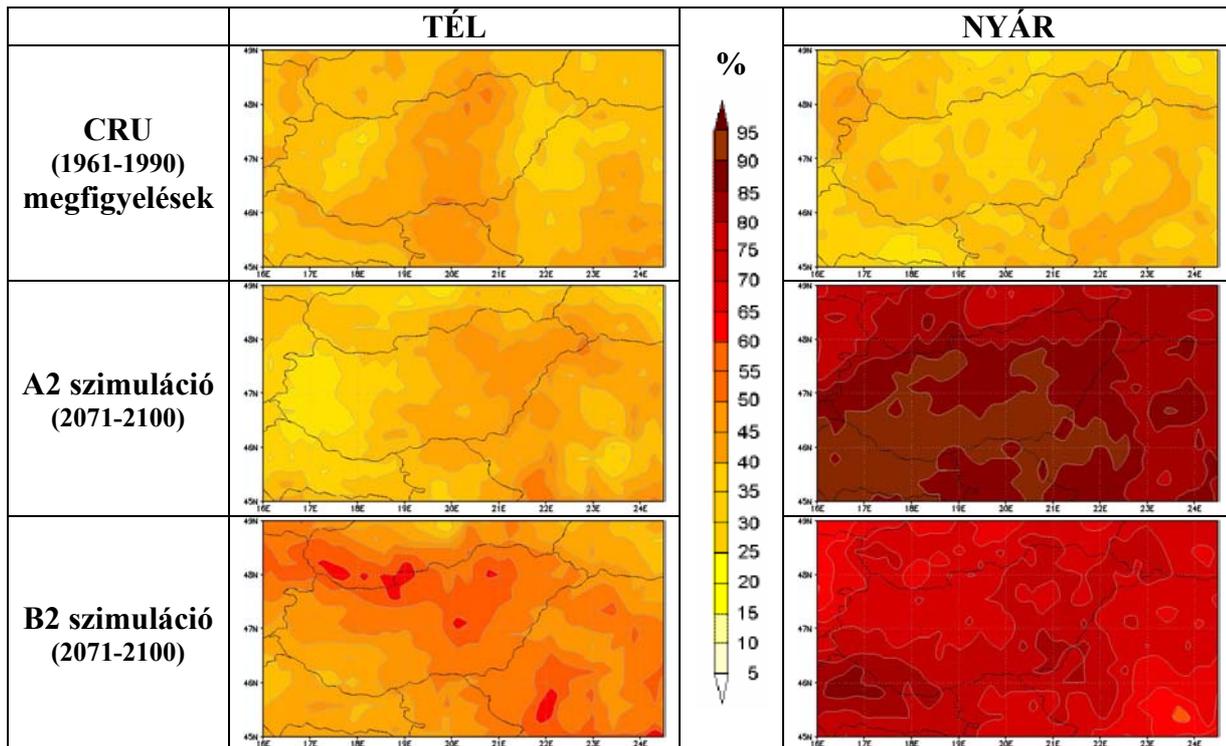
	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
1961-1990	11	17	26	20	12
2071-2100 B2 szcenárió	8	18	14	15	14
2071-2100 A2 szcenárió	8	22	14	18	15

A csapadék éves menetének megváltozását olvashatjuk le a 6.7. ábráról is. Jelenleg Magyarországon a legcsapadékosabbak a késő tavaszi, kora nyári hónapok, melyekben a csapadékmennyiség meghaladja a 60 mm/hónap értéket, a legszárazabbak pedig január és február, 30-35 mm/hónap csapadékkal. A PRECIS szimulációk szerint mind az A2, mind a B2 szcenárió esetén 2071-2100-ra július és augusztus válnak legszárazabb hónapjainkká (az A2 esetén csupán 20 mm/hónap, B2 esetén 25-30 mm/hónap csapadékkal!), s az év legcsapadékosabb időszaka előrébb tolódik (A2 esetén májusra 65 mm/hó értékkel, B2 esetén április, május, júniusra 55-65 mm/hó értékkel).

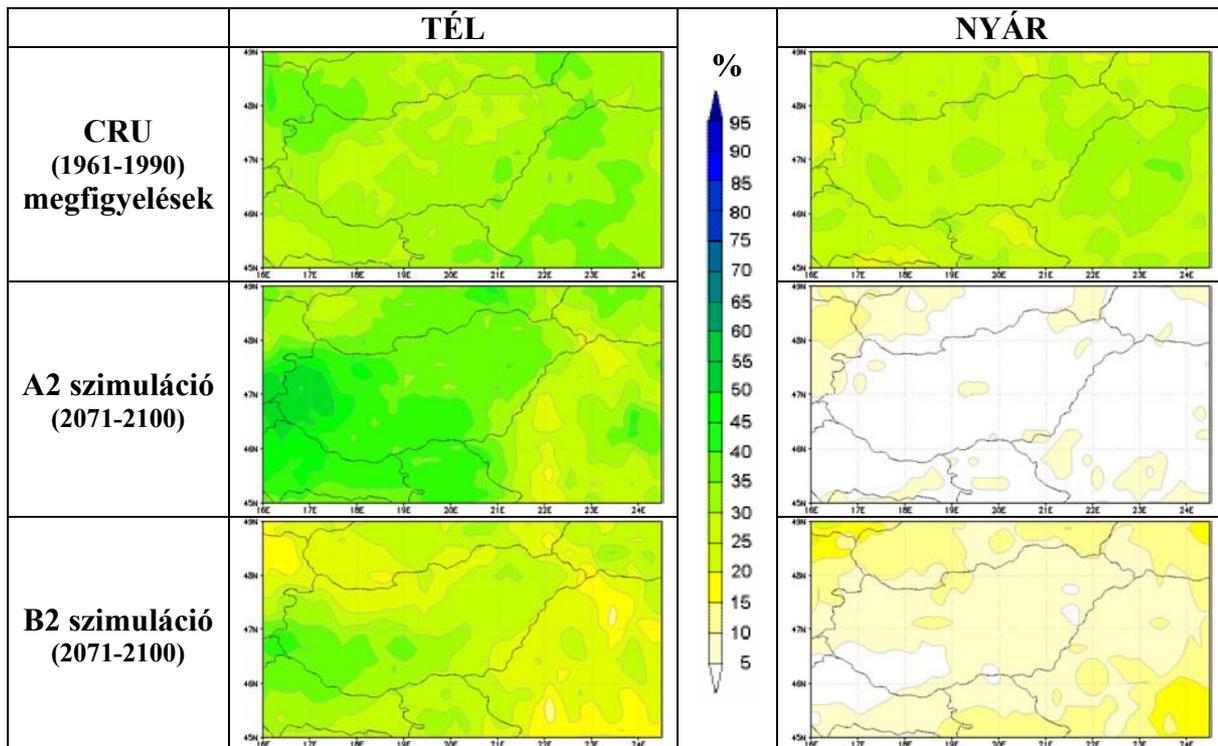


6.7. ábra: A szimulált havi átlagos csapadékösszeg (mm/hó) éven belüli eloszlása

A PRECIS modell nyárra egyértelműen az éghajlat szárazabbá válását valószínűsíti a Kárpát-medence térségében, melyet jelez a negatív anomáliák gyakoriságnövekedése: 30-45%-ról 80-90%-ra az A2, 70-80%-ra a B2 esetén (6.8. ábra), s a pozitív anomáliák gyakoriságcsökkenése az ország egész területén: 25-30%-ról 0-10%-ra az A2, 0-20%-ra a B2 esetén (6.9. ábra). A térképsorozat alapján tehát elmondható, hogy az A2 forgatókönyv esetén nagyobb mértékű gyakoriságváltozásra számíthatunk, mint a B2 esetén. A téli évszakra várható változások kevésbé egyirányúak és sokkal kisebbek, az A2 szcenárióra pedig leolvasható a Dunántúlra korábban már említett téli csapadéknövekedés (25-30%-ról 50%-ra). A2 esetén a téli hónapokban a csapadékosabb időszakok gyakoriságnövekedése az egész ország területén valószínűsíthető, míg a száraz időszakok gyakoriságcsökkenésére elsősorban a Dunántúl térségében számíthatunk.



6.8. ábra: A 20%-ot meghaladó havi negatív csapadék anomáliák ($\Delta P < -20\%$) előfordulási gyakorisága télen (bal oldalon) és nyáron (jobb oldalon)



6.9. ábra: A 20%-ot meghaladó havi pozitív csapadék anomáliák ($\Delta P > +20\%$) előfordulási gyakorisága télen (bal oldalon) és nyáron (jobb oldalon)

6.4. Összefoglalás

A brit fejlesztésű PRECIS regionális klímamoddellel elvégzett modellfuttatásaink a közelmúlt (az 1961-1990-es időszak), valamint a jövő (2071-2100-as időszak) éghajlatát szimulálják. Jelen tanulmányban a Kárpát-medence térségében várható átlaghőmérséklet és csapadék XXI. század

végére várható megváltozását elemeztük az 1961-1990-es időszakhoz képest. Főbb eredményeinket az alábbiakban összegezzük.

A 2071-2100-as időszakra a modell szignifikáns melegedést prognosztizál Magyarország területére, mely az A2 forgatókönyv esetén nagyobb (éves átlagban 5,4 °C), mint B2 esetén (éves átlagban 4,0 °C). A legnagyobb változás mindkét scenárió esetén nyáron várható. A melegedéssel nemcsak az átlaghőmérséklet növekszik, hanem a hőmérséklet eloszlása is jelentősen módosul a jövőben (több meleg időszak és rekord meleg).

Az évszázad végére a Kárpát-medencében éves átlagban a csapadék csökkenése, valamint az év során lehulló csapadékösszeg eloszlásának időbeli átrendeződése valószínűsíthető. A várható változás a nyári félév hónapjaiban a legjelentősebb, a PRECIS-szimulációk az ország egész területén szignifikáns szárazodást prognosztizálnak 2071-2100-ra. A csapadék növekedésére télen, elsősorban a Dunántúlon számíthatunk.

7. Irodalomjegyzék

- Bartholy J., Pongrácz R., 1998: Hazai csapadék idősorok eltérő trendjei, a szélsőséges csapadékok területi és időbeni változásai. In: II. Erdő és Klíma Konferencia. (Tar K.-Szilágyi K., szerk.) Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 62-66.
- Bartholy J., Pongrácz R., 2004: Extrém csapadékindexek XX. századi tendenciái a Kárpát-medence térségében. Földtani Kutatás, XLI, 3-4. szám, 57-68.
- Bartholy J., Pongrácz R., 2005a: Néhány extrém éghajlati paraméter globális és a Kárpát-medencére számított tendenciája a XX. században. AGRO-21 Füzetek, 40, 70-93.
- Bartholy J., Pongrácz R., 2005b: Tendencies of extreme climate indices based on daily precipitation in the Carpathian Basin for the 20th century. Időjárás, 109, 1-20.
- Bartholy J., Pongrácz R., 2006: Comparing tendencies of some temperature related extreme indices on global and regional scales. Időjárás, 110, 35-48.
- Bartholy J., Pongrácz R., Matyasovszky I., Schlanger V., 2003: Expected regional variations and changes of mean and extreme climatology of Eastern/Central Europe. In: Combined Preprints CD-ROM of the 83rd AMS Annual Meeting. Paper 4.7 American Meteorological Society. 10p.
- Bartholy J., Pongrácz R., Molnár Zs., 2004: Classification and analysis of past climate information based on historical documentary sources for the Carpathian Basin. Int. J. Climatology, 24, 1759-1776., DOI: 10.1002/joc.1106
- Bartholy J., Pongrácz R., Pieczka I., Kardos P., Hunyady A., 2009b: Analysis of expected climate change in the Carpathian Basin using a dynamical climate model. Lecture Notes in Computer Science 5434. 176-183.
- Bartholy J., Pongrácz R., Torma Cs., Hunyady A., 2006a: A PRECIS regionális klímamodell és adaptálása az ELTE Meteorológiai Tanszékén. In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok – Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások. (Szerk.: Weidinger T.) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. 99-114.
- Bartholy J., Pongrácz R., Torma Cs., Hunyady A., 2006b: A regionális klímaváltozás becslése a Kárpát-medence térségére. VAHAVA-zárókonferencia. In: A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok. KvVM-MTA „VAHAVA” projekt. (Szerk.: Láng I., Jolánkai M., Csete L.) CD-ROM. Akaprint, Budapest. 5p.
- Bartholy J., Pongrácz R., Torma Cs., Pieczka I., Hunyady A., 2009a: Regional climate model experiments for the Carpathian basin. 89th AMS Annual Meeting/21st Conference on Climate Variability and Change. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/147084.pdf>. Phoenix, AZ. 5p.
- Bartholy J., Pongrácz R., Torma Cs., Pieczka I., Kardos P., Hunyady A., 2009c: Analysis of regional climate change modelling experiments for the Carpathian basin. International Journal of Global Warming 1, 238-252.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy. (2007): A 21. század végén várható éghajlatváltozás Magyarországon. – Földrajzi Értesítő 51: 147-168.
- Bartholy J., Pongrácz R., Pattantyús-Ábrahám, M., 2006: European cyclone track analysis based on four geopotential fields of ECMWF ERA-40 Datasets. Int. J. Climatology, 6, 1517-1527. DOI: 10.1002/joc.1392
- Bartholy J., Pongrácz R., Pattantyús-Ábrahám, M., Pátkai, Zs., 2005a: Analysis of the european cyclone tracks, the corresponding frontal activity, and changes in MCP frequency distribution. EMS Annual Meeting/ECAM 2005 – Abstracts, Vol. 2. European Meteorological Society. EMS05-A-00297.
- Bartholy J., Pongrácz R., Torma, Cs., Hunyady, A. (2006): A PRECIS regionális klímamodell és adaptálása az ELTE Meteorológiai Tanszékén. In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok – Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások (szerk: Weidinger T.) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. 99-114.
- Brazdil R., 1996. Reconstructions of past climate from historical sources in the Czech Lands. Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years. (eds: Jones P.D., Bradley R.S., Jouzel J.) NATO ASI Series. Springer, Berlin. 409-431.

- Christensen, J.H. (2005): Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects – Final Report. – DMI, Copenhagen.
- Fraedrich, K., Bach, R., Naujokat, G., 1986: Single station climatology of central european fronts: number, time, and precipitation statistics. *Contr. Atmos. Phys.* 59, 54–65.
- Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M.G., Peterson T., 2002: Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19, 193-212.
- Gibson, J. K., Kallberg, P., Uppala, S., Nomura, A., Hernandez, A., Serrano, A., 1997: ERA description. ECMWF Reanalysis Project Report Series 1, 77p.
- Giorgi, F. (1990): Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. – *Journal of Climate* 3: 941-963.
- Gordon, C., C. Cooper, C. A. Senior, H. Banks, J. M. Gregory, T. C. Johns, J. F. B. Mitchell and R. A. Wood, 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.* 16, 147-168.
- Hess, P., Brezowsky, H., 1977: Katalog der Grosswetterlagen. *Berichte Deutscher Wetterdienst Offenbach*. 113 Bd 15.
- Hodges, K. I., 1994: A general method for tracking analysis and its application to meteorological data. *Mon. Wea. Rev.* 122, 2573–2586.
- Horányi, A. (2006): Regionális klímadinamikai kutatások: nemzetközi és hazai áttekintés. In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok – Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások (szerk: Weidinger T.) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. 62-70.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001: Third Assessment Report. The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 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*. Edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY.
- Jones, R. G., Noguer, M., Hassell, D. C., Hudson, D., Wilson, S. S., Jenkins, G. J., Mitchell, J. F. B., 2004: Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Exeter:UK Met Office Hadley Centre.
- Kallberg, P., Simmons, A., Uppala, S., Fuentes, M., 2004: The ERA-40 Archive. ERA-40 Project Report Series No. 17.
- Karl T.R., Nicholls N., Ghazi A., 1999: Clivar/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. *Climatic Change*, 42, 3-7.
- Klein, W., 1957: Principal tracks and mean frequencies of cyclones and anticyclones in the northern hemisphere. Research Paper No. 40. U.S. Weather Bureau, Washington.
- Klein Tank A.M.G. and Coauthors, 2002a: Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. Climatol.*, 22, 1441-1453.
- Klein Tank A.M.G., 2003: The European Climate Assessment and Dataset project. <http://www.knmi.nl/samenw/eca/index.html>.
- Klein Tank A.M.G., Können G.P., 2003: Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946-99. *J. Climate*, 16, 3665-3680.
- Klein Tank A.M.G., Wijngaard J.B., van Engelen A., 2002b: Climate of Europe; Assessment of observed daily temperature and precipitation extremes. KNMI, De Bilt, the Netherlands, 36p.
- Lambert, S. J., 1988: A cyclone climatology of the canadian climate centre general circulation model. *J. Climate* 1, 109–115.
- Makainé Cs. M., Tóth P., 1978: *Színoptikus Meteorológia*. Tankönyvkiadó, Budapest. 753p.
- Mitchell, T.D., and Jones, P.D., 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.* 25, 693-712.
- Nakicenovic, N. and Swart, R. (Eds.), 2000: *Emissions Scenarios. A Special Reports of IPCC Working Group III*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- New, M., Hulme, M., Jones P. (1999): Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. – *Journal of Climate* 12: 829-856.
- Peterson T., Folland C.K., Gruza G., Hogg W., Mokssit A., Plummer N., 2002: Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs, 1998-2001. World Meteorological Organisation Rep. WCDMP-47. WMO-TD 1071. Geneva, Switzerland. 143p.
- Pfister C., 1993. Historical Weather Indices from Switzerland. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series # 93-027. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- Pfister C., Kington J., Kleinlogel G., Schuele H., Siffert E., 1994. High resolution spatio-temporal reconstructions of past climate from direct meteorological observations and proxy data. *Climatic Trends and Anomalies in Europe 1675-1715*. (eds: Frenzel B., Pfister C., Glaeser B.). Fischer, Stuttgart. 329-376.
- Pieccka I., Bartholy J., Pongrácz R., Hunyady A., 2009: Climate change scenarios for Hungary based on numerical simulations with a dynamical climate model. *Lecture Notes in Computer Science*. Megjelenés alatt.
- Pongrácz R., Bartholy J., 2000: Változási tendenciák Magyarország éghajlatának szélsőségeiben. In: III. Erdő és Klíma konferencia (szerk: Kircsi A.), 38-44., Debrecen.

- Pongrácz R., Bartholy J., 2004: Klímaváltozás: a szélsőségek eltolódása a XX. században. *Természet Világa* 2004/II. Különszám: Klímaváltozás, magyarországi hatások, 51-54.
- Pongrácz R., Bartholy J., Pattantyús-Ábrahám M., Pátkai Zs., 2006: Az Atlanti-Európai térség szinoptikus-klimatológiai vizsgálata. In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok – Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások (Szerk: Weidinger T.) OMSz, Budapest. 144–159.
- Réthy A., 1962. Időjárási események és elemi csapások Magyarországon 1700-ig. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Réthy A., 1970. Időjárási események és elemi csapások Magyarországon 1701-1800. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Réthy A., Simon A., 1998. Időjárási események és elemi csapások Magyarországon 1801-1900. I. kötet. OMSz, Budapest.
- Réthy A., Simon A., 1999. Időjárási események és elemi csapások Magyarországon 1801-1900. II. kötet. OMSz, Budapest.
- Serreze, M. C., 1995: Climatological aspects of cyclone development and decay in the arctic. *Atmosphere-ocean* 33, 1–23.
- Serreze, M. C., Carse, F., Barry, R., 1997: Icelandic low cyclone activity: climatological features, linkages with the nao, and relationships with recent changes in the northern hemisphere circulation. *J. Climate* 10, 453–464.
- Van Bebber, W. J., 1891: Die zugstrassen der barometrischen minima nach den bahnenkarten der deutschen seewarte für den zeitraum von 1870-1890. *Meteorol. Zeitschrift* 8, 361–366.
- Wilson, S., Hassell, D., Hein, D., Jones, R., Taylor, R., 2007: Installing and using the Hadley Centre regional climate modelling system, PRECIS. Version 1.5.1. Exeter:UK Met Office Hadley Centre.
- WMO, 2003. Extreme weather events might increase. WMO-No.695.
- Zhang, X., Walsh, J.E., Zhang, J., Bhatt, U.S., Ikeda, M., 2004: Climatology and interannual variability of arctic cyclone activity: 1948-2002. *J. Climate* 17, 2300–2317.