

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Meteorológiai Tanszék



A Kárpát-medence térségében 2071-2100-ra
várható regionális klímaváltozás elemzése a
PRUDENCE-eredmények felhasználásával

Diplomamunka

Készítette: Szabó Péter
V. éves meteorológus hallgató

Témavezetők: dr. Pongrácz Rita
dr. Bartholy Judit
(ELTE Meteorológiai Tanszék)

Budapest, 2008

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. PRUDENCE projekt	5
2.1 Regionális éghajlati modellek	8
2.1.1 ARPEGE	8
2.1.2 CHRM	8
2.1.3 HadRM	9
2.1.4 HIRHAM	9
2.1.5 REMO	10
2.1.6 RegCM	10
2.1.7 PROMES	11
2.1.8 CLM	11
2.1.9 RACMO	12
2.1.10 RCAO	12
3. Várható éghajlatváltozás a Kárpát-medencében	14
3.1 A regionális klímamodellek kontroll-szimulációi a Kárpát-medencére	14
3.2 A 2071-2100-ra várható hőmérsékleti- és csapadékváltozások becslése	22
3.2.1 A Kárpát-medencében várható hőmérsékletváltozás	22
3.2.1.1 A napi középhőmérséklet várható változása	22
3.2.1.2 A minimum- és maximumhőmérséklet várható változása... ..	26
3.2.2 A Kárpát-medencében várható csapadékváltozás	28
3.3 Az éghajlati szélsőségekben 2071-2100-ra várható változások becslése	34
3.3.1 Hőmérsékleti extrémindexek elemzése	37
3.3.2 Csapadék extrémindexek elemzése	43
4. Összefoglalás	48
5. Köszönetnyilvánítás	51
6. Irodalomjegyzék	52

1. Bevezetés

Földünk éghajlatát, annak változását globális éghajlati modellekkel, GCM-ekkel (Global Climate Model) szimulálhatjuk. A legelső modellt az 1960-as évek vége felé fejlesztették ki a NOAA Princetonban található kutatóintézetében. Az első önálló, a légköri és az óceáni folyamatokat együttesen tartalmazó, egy dimenziós modellt Manabe és Bryan (1969) hozta létre. A GCM-ek elsősorban globális skálán értelmezhető folyamatokkal foglalkoznak, s térbeli felbontásuk miatt sem tökéletesen megfelelőek egy-egy kisebb térség éghajlatváltozásának becslésére. E feladat pontosabb megoldására vált szükségessé a regionális klímadinamikai modellek (RCM-ek) kifejlesztése, adaptálása. A kisebb területre, nagyobb felbontással készített modellek már alkalmasak a hegyek, völgyek, mezoskálájú folyamatok megfelelő leírására (Giorgi, 1990). A regionális modelleket az óriási számítástechnikai igény miatt a GCM-ektől eltérően általában nem tudják, és nem is akarják hosszabb időszakra folyamatosan futtatni. Ezért ahogy a dolgozatomban szereplő modellek esetén is történt, egy referencia időszakra, általában 30 évre (jelen esetben 1961-1990 közti időszakra) és egy kiválasztott jövőbeni időszakra (például 2071-2100-ra) készítenek éghajlati előrejelzéseket (IPCC, 2007).

Magyarországon a finomfelbontású regionális klímamodellek adaptálása néhány éve kezdődött az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén (Bartholy et al., 2006) és az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (Horányi, 2006). A referencia időszakra vonatkozó futások már néhány hónapja rendelkezésre állnak, s az eredmények elemzése is megkezdődött (pl. Bartholy et al., 2008; Szépszó, 2008). A XXI. századra vonatkozó szimulációk azonban még nem fejeződtek be. Annak érdekében, hogy a globális melegedés helyi/regionális hatásait vizsgáló szakemberek mielőbb megfelelő információkkal rendelkezzenek a hazánkban várható regionális skálájú klímaváltozásról, az Európai Unió által támogatott PRUDENCE (Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects) projekt eredményeit használjuk fel a Kárpát-medence térségére. A PRUDENCE projekt (<http://prudence.dmi.dk>) keretében a résztvevők az A2 és B2 scenárióra végeztek regionális klímamodellezést a teljes európai térségre (Christensen et al., 2007).

Az A2 scenárió a világ sokféleségének megmaradását és a helyi értékek megőrzését tételezi fel. Az emberiség számának állandó, de lassú növekedésével számol. A gazdasági fejlődés és a technikai változások várhatóan minden földrajzi régióban érvényesülnek, de az összes forgatókönyv közül ez esetben a leglassabban (IPCC, 2001,

2007).

A B2 scenárió a felmerülő környezeti és társadalmi problémák regionális és helyi megoldását helyezi előtérbe. A földi népességszám várhatóan növekszik, de az A2 feltételezésénél lassabban. A gazdasági növekedés közepes gyorsasággal zajlik, a technológiai változások visszafogottabbak, ugyanakkor szerteágzóbbak, mint a másik három alapszenárió esetén (IPCC, 2001, 2007).

Jelen dolgozat célja a PRUDENCE projekt eredményeinek elemzése a Kárpát-medence térségére a minimum-, a maximum- és az átlaghőmérséklet, valamint a csapadék napi és havi felbontású idősorainak felhasználásával. Először röviden ismertetjük a PRUDENCE projektben résztvevő intézeteket, a szimulációk során felhasznált regionális klímamodelleket, valamint a rendelkezésre álló szimulációs adatmezők eltérését a mért értékekhez viszonyítva. A hazánk térségében várható éghajlatváltozást két részletben tárgyaljuk: a 3.1 fejezetben a regionális klímaváltozást havi átlagokkal reprezentáljuk elsősorban kompozittérképek felhasználásával, majd a 3.2 fejezetben az extrém éghajlati indexeket elemezzük a szimulált napi adatsorok alapján. A számításokhoz és a térképes megjelenítéshez a FERRET programnyelvet (<http://www.ferret.noaa.gov/Ferret/>) alkalmaztuk. Ezt a programozási nyelvet a NOAA munkatársai fejlesztették ki úgy, hogy a speciális tudományos fájlformátumok, például a NetCDF (Network Common Data Form) feldolgozására alkalmas legyen (Hankin et al., 2007).

2. PRUDENCE projekt

A PRUDENCE-projektet az Európai Unió V. keretprogramja támogatta 2001. és 2004. között. A projekt fő feladatai a következők voltak (Christensen et al., 2007):

- Egyszerre több, 30 éves időszakot felölelő éghajlati projekciót készítsenek a teljes európai térségre, melyhez a felhasznált globális modellek határfeltételeit, az üvegházgáz koncentráció-változást előzetesen egyeztették.
- Az alkalmazott regionális klímamodelleket összehasonlítsák az 1961-1990-es időszakra elvégzett szimulációkból meghatározott hibák alapján.
- Elemezzék a finomfelbontású regionális modellekből nyert eredményeket az 2071-2100-as időszakra az A2 és B2 globális scenáriókat alkalmazva.
- Külön hangsúllyal szerepelt az emberre és a gazdasági helyzetre is súlyos következményeket hordozó időjárási extrém eseményekben (mint például az árvíz, a hóhullámok, a viharok bekövetkezési valószínűsége) várható változás becslése különböző éghajlati indexek felhasználásával.

A projektben összesen 25 intézmény vett részt (Christensen, 2005), melyek közül 11 kutatóintézet szolgáltatott modellszimulációs eredményeket (1. táblázat). További résztvevők: Olasz Egyetemenközi Szövetség (CINECA), Német Levegő- és Űrkutató Központ, Madridi Műszaki Egyetem, Dán Agrárkutató Intézet, Readingi Egyetem, Kelet-angliai Egyetem, Finn Meteorológiai Szolgálat, Prágai Károly Egyetem, Fribourgi Egyetem, Finn Környezettudományi Intézet (SYKE), Dán Energiakutató Intézet (RISO), Svéd Lundi Egyetem, Nemzetközi Környezetkutató Központ (CIRED), Tel-Avivi Egyetem.

Megjegyezzük, hogy két Európán kívüli intézet, a Japán Meteorológiai Szolgálat (JMA) és a Japán Meteorológiai Kutatóintézet (MRI) közösen készített egy kb. 20 km-es (a többi alkalmazott modellnél finomabb) térbeli felbontással futtatott, A1B scenárió alkalmazó szimulációt Európa területére. Ennek eredményeit mi nem használtuk fel kutatásainkhoz az eltérő térbeli felbontás és alkalmazott emissziós scenárió, valamint a rövidebb szimulációs időszak miatt.

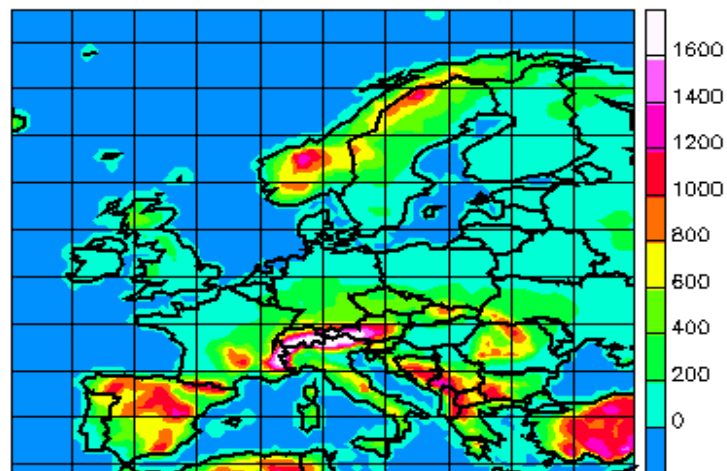
A regionális klímamodelleket kb. 50 km-es ($0,5^\circ$ illetve $0,44^\circ$) horizontális felbontással 30 évre futtatták le: egy 1961 és 1990 közötti (referencia időszakként kijelölt) és egy 2071 és 2100 közötti jövőbeli időszakra. Az utóbbi 30 éves időszakra a különböző intézetek mindegyike elvégezte az A2 forgatókönyvet felhasználó modell-szimulációt, míg

néhányan a B2 scenáriót is alkalmazták (1. táblázat). A modellekben alkalmazott határfeltételeket az 1. táblázatban foglaljuk össze. Néhány intézet több globális modell határfeltételeivel meghajtott eredményeket is közöl mind a referencia, mind a jövőbeli szimulációs időszakra.

1. táblázat: A PRUDENCE projektben résztvevő intézetek, a felhasznált regionális modellek (RCM), a futtatás határfeltételeit nyújtó globális modellek, s a rendelkezésre álló scenáriók (Christensen, 2007)

	Intézet	Regionális modell	Globális modell	Szenárió
1	Dán Meteorológiai Intézet	HIRHAM (ensemble/1)	HadAM3H	A2, B2
2		HIRHAM (ensemble/2)	HadAM3H	A2
3		HIRHAM (ensemble/3)	HadAM3H	A2
4		HIRHAM	ECHAM4/OPYC	A2, B2
5		HIRHAM	ECHAM5	A2
6		HIRHAM finom felbontású	HadAM3H	A2
7		HIRHAM extra finom felbontású	HadAM3H	A2
8	Brit Hadley Központ	HadRM3P (ensemble/1)	HadAM3P	A2, B2
9		HadRM3P (ensemble/2)	HadAM3P	A2
10		HadRM3P (ensemble/3)	HadAM3P	A2
11	Zürichi Műszaki Főiskola	CHRM	HadAM3H	A2
12	Kieli Atomenergiahasznosító Hajóépítési Társaság	CLM	HadAM3H	A2
13		CLM továbbfejlesztett	HadAM3H	A2
14	Hamburgi Max Planck Intézet	REMO	HadAM3H	A2
15	Svéd Hidrometeorológiai Intézet	RCAO	HadAM3H	A2, B2
16		RCAO	ECHAM4/OPYC	A2, B2
17		RCAO finom felbontású	HadAM3H	A2
18	Madridi Egyetem	PROMES	HadAM3H	A2, B2
19	Trieszti Nemzetközi Elméleti Fizikai Központ	RegCM	HadAM3H HadAM2H	A2 B2
20	Norvég Meteorológiai Intézet	HIRHAM	HadAM3H	A2
21	Holland Meteorológiai Intézet	RACMO	HadAM3H	A2
22	Francia Meteorológiai Szolgálat	ARPEGE (ensemble/1)	HadCM3	A2, B2
23		ARPEGE (ensemble/2)	HadCM3	A2
24		ARPEGE (ensemble/3)	HadCM3	A2
25		ARPEGE (ensemble/1)	ARPEGE/OPA	A2, B2
26		ARPEGE (ensemble/2)	ARPEGE/OPA	B2
27		ARPEGE (ensemble/3)	ARPEGE/OPA	B2

A könnyebb tárolás és feldolgozás céljából az adatbázisok mindegyike szabványos NetCDF formátumban érhető el a PRUDENCE honlapjáról (<http://prudence.dmi.dk>). A szimulációs idősor-mezők általában az alábbi 18 változóra tölthetők le napi, havi és évszakos felbontásban: (1) hőmérséklet 2 méteren (K), (2) csapadék (mm/nap), (3) teljes felhőfedettség (%), (4) párolgás (mm/nap), (5) hó-vízegyenérték (mm), (6) teljes lefolyás (mm/nap), (7) talajnedvesség (mm), (8) felszíni légnyomás (hPa), (9) tengerszinti légnyomás (hPa), (10) napi maximum hőmérséklet (K), (11) napi minimum hőmérséklet (K), (12) átlagos szél 10 méteres magasságban (m/s), (13) napi maximális szél 10 méteren (m/s), (14) specifikus légnedvesség 2 méteren (kg/kg), (15) nettó rövidhullámú sugárzás (W/m^2), (16) lefelé irányuló rövidhullámú sugárzás (W/m^2), (17) lefelé irányuló hosszuhullámú sugárzás (W/m^2), (18) nettó hosszuhullámú sugárzás (W/m^2). Egyes intézetek még további két paramétert is elérhetővé tettek: a relatív nedvességet (%) és a harmatpontot (K).



1. ábra: A CRU adatbázis és a PRUDENCE projekt szimulációiban alkalmazott céltartomány topográfija (forrás: prudence.dmi.dk)

A regionális klímamodelllek a számításokhoz az eredeti európai kivágatot az Egyenlítői területre átranzformálták, s így küszöbölték ki a hosszúsági és szélességi fokhálóat okozta torzításokat. A napi mezők az eredeti futtatási terület rácspontjai szerint vannak tárolva. A havi és évszakos mezőket viszont már a Kelet-Angliai Egyetem Éghajlatkutató Osztályán (Climate Research Unit, CRU) létrehozott referencia adatbázis (New et al., 1999, 2000) szabványos területére alakították át. A $0,5^\circ$ -os horizontális felbontású CRU adatbázis által lefedett európai terület délnyugati sarokpontja $35,25^\circ\text{É}$,

14,75 °K, északkeleti sarokpontja pedig 74,75 °É, 35,75 °K (1. ábra).

A következő alfejezetben sorra bemutatjuk a PRUDENCE projekt keretében alkalmazott regionális klímamodelleket.

2.1 Regionális éghajlati modellek

2.1.1 ARPEGE

Az ARPEGE-IFS (Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle - integrated forecast system, magyarul: kis- és nagyskálájú folyamatok kutatási projektje - integrált előrejelzési rendszer) globális modellt operatív előrejelzési célokra az ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasting, magyarul: Európai Középtávú Időjárás Előrejelzési Központ) intézetnél és a Francia Meteorológiai Szolgálatnál is egyaránt használják (valamelyest eltérő parametrizációt alkalmazva). Az ARPEGE éghajlati szimulációkra kidolgozott változata hibrid koordináta rendszert alkalmaz, 31 vertikális szinttel rendelkezik, és horizontális felbontása 50-450 km között változik. A központi mediterrán térségben alkalmazzák pl. az 50 km-es felbontást, míg az európai éghajlati viszonyok szempontjából kis jelentőségű területeken (pl. a Csendes-óceán déli régiójában) 450 km-es horizontális felbontással fut a modell. A modell fizikai parametrizációját Déqué et al. (1998) közli. Különösen meghatározó az ARPEGE sugárzási sémája (Morcrette, 1990), a felhőcsapadék-turbulencia séma (Richard és Royer, 1993) és a konvektív séma (Bougeault, 1985).

A PRUDENCE projekt keretein belül a következő modell-szimulációkat végezték el: CNRM DA9 (1961-1990), CNRM DE3 (1961-1990), CNRM DE4 (1961-1990), CNRM DE6 (2071-2100, HadCM3 A2), CNRM DE7 (2071-2100, HadCM3 A2), CNRM DE8 (2071-2100, HadCM3 A2), CNRM DE9 (2071-2100, ARPEGE/OPA A2), CNRM DE5 (2071-2100, HadCM3 B2), CNRM DC9 (2071-2100, ARPEGE/OPA B2), CNRM DC7 (2071-2100, ARPEGE/OPA B2), CNRM DC2 (2071-2100, ARPEGE/OPA B2)

2.1.2 CHRM

A svájci ETHZ intézetben (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, magyarul: Svájci Szövetségi Műszaki Főiskola) futtatott korlátos tartományú klíma-előrejelzési CHRM elnevezésű modell (Climate High Resolution Model, magyarul: Nagyfelbontású

Klíma-modell) a német és svájci meteorológiai intézet által operatíván futtatott HRM (High Resolution Model, magyarul: Nagyfelbontású Modell) előrejelzési modellből (Majewski, 1991) származik. A modellszámításokat horizontálisan fél fokos felbontású, 81×91 rácspontot tartalmazó szabályos, de elforgatott rácsrendszeren végzik. A modell 20 vertikális szinten, hibrid koordináta-rendszerben számol. A modellről részletesebb leírást Vidale et al. (2003) ad. A CHRM modell fizikai parametrizációi közül a legfontosabbak a Tiedtke-féle nedvesség-konvergencia számítás (Tiedtke, 1989) és a Kessler-féle mikrofizikai parametrizáció (Lin et al., 1983). A svájci CHRM és a német REMO (lásd később) modell csak a fizikai parametrizációban tér el egymástól.

A PRUDENCE projekt keretein belül a következő modell-szimulációkat végezték el: ETH HC_CTL (1961-1990), ETH HC_A2 (2071-2100, A2). Mindkét szimuláció a HadAM3H globális modell outputjait használta fel kiindulási- és peremfeltételként.

2.1.3 HadRM

Az angol Hadley Központban alkalmazott korlátos tartományú modell legújabb verziója a HadRM3H (Jones et al., 2001). Ez a csatolt légköri-óceáni regionális klíma-modell a HadCM3 GCM-en és a finomabb felbontású HadAM3H légköri globális modellen alapszik. A cirrusz-üllők sugárzási hatásait Gregory (1999) sémájára építik. A relatív nedvesség felhőzet-alakító hatását, így a konvektív csapadékot a felhőzet sűrűségétől függően parametrizálták, míg a nagyskálájú csapadékot a felhőzet víztartalmától függőnek tekintették (Jones et al., 1995). Ezekkel a módosításokkal korrigálták a csapadék értékeket, hogy a túl meleg és száraz nyári időszakok túlzott előfordulását csökkentsék.

A PRUDENCE projekt keretein belül a következő modell-szimulációkat végezték el: HC ADEHA (1961-1990), HC ADEHB (1961-1990), HC ADEHC (1961-1990), HC ADHFA (2071-2100, A2), HC ADHFE (2071-2100, A2), HC ADHFF (2071-2100, A2), HC ADHFD (2071-2100, B2). Mindegyik szimuláció egységesen a HadAM3P globális modell outputjait használta fel kiindulási- és peremfeltételként.

2.1.4 HIRHAM

A Dán Meteorológiai Intézet által alkalmazott modell a HIRHAM4 (Christensen et al., 1996) egy továbbfejlesztett változata. A modell dinamikai alapjait a hidrosztatikus HIRLAM korlátos tartományú modell adja, míg a fizikai parametrizációt a hamburgi

globális cirkulációs modell, az ECHAM4 alapján veszik. A csapadék-folyamatok helyes parametrizálásával az éves csapadék helyes becslését érték el (Hagemann et al., 2001). A számításokat egy elforgatott, 0,44°-os felbontású, szabályos rácshálózaton végzik. Vertikálisan 19 szinttel rendelkező, hibrid, szigma-p koordináta-rendszert vesznek.

A PRUDENCE projekt keretein belül a következő modell-szimulációkat végezték el: METNO HADCN (1961-1990), METNO HADA2 (2071-2100, A2), DMI HC1 (1961-1990), DMI HC2 (1961-1990), DMI HC3 (1961-1990), DMI HS1 (2071-2100, A2), DMI HS2 (2071-2100, A2), DMI HS3 (2071-2100, A2), DMI HB1 (2071-2100, B2), melyek mindegyikéhez a HadAM3H globális modell outputjait használták fel kiindulási- és peremfeltételként. További három futtatáshoz az ECHAM4/OPYC globális modellpáros szolgáltatott bemenő adatokat: DMI ECCTRL (1961-1990), DMI ECSCA2 (2071-2100, A2), DMI ECSCB2 (2071-2100, B2). Végül két futtatáshoz az ECHAM5 globális modell outputjait használták fel: DMI ECC (1961-1990), DMI ECS (2071-2100, A2).

2.1.5 REMO

A REMO regionális modellt (Jacob, 2001) a hamburgi Max-Planck Intézetben futtatják. A dinamikai alapok a Német Meteorológiai Szolgálat Europamodel/Deutschlandmodelljéből (Majewski és Schrodin, 1994) származnak. A fizikai parametrizációs sémákat pedig az ECHAM4 globális klímamodellből (Roeckner et al., 1996) vették át. A regionális modell szférikus koordinátákat használ Arakawa-C rácson, mely 0,5°-os horizontális felbontású. Vertikálisan 19 szintet tartalmaz. Az integrációs terület lefedi teljes Európát és az Atlanti-óceán egy részét. Az oldalsó határfeltételeket egy nyolc pontos határzónán keresztül, Davies (1976) formulái szerint számolják. A turbulens áramok parametrizációja Louis (1979) alapján készült. A REMO modell dinamikája tehát megegyezik a svájci CHRM regionális modellével, míg a fizikai parametrizáció a dán HIRHAM klímamodellhez hasonló.

A PRUDENCE projekt keretein belül a következő modell-szimulációkat végezték el: MPI 3003 (1961-1990), MPI 3006 (2071-2100, A2). Mindkét szimuláció a HadAM3H globális modell outputjait használta fel kiindulási- és peremfeltételként.

2.1.6 RegCM

Az ICTP (International Centre for Theoretical Physics) által futtatott RegCM modellt

eredetileg Giorgi et al. (1993a, b) fejlesztette ki, majd a módosításokat Giorgi et al. (1999) illetve Pal et al. (2000) közli. A modell dinamikai alapja az NCAR (National Center for Atmospheric Research) intézetnél is futtatott mezoskálájú MM5 modelléhez hasonló. A felszíni folyamatokat a Bioszféra-Atmoszféra közötti Szállítási Sémán (BATS) keresztül, míg a határreteg fizikáját Giorgi et al. (1993a) szerint vezetik be. A nagyskálájú csapadék leírása Pal et al. (2000) cikkében található, míg a konvektív csapadék sémáját Giorgi et al. (1993b) közli. A sugárzási transzfer sémáját az NCAR által kifejlesztett, CCM3 (Community Climate Model, Kiehl et al., 1996) adja, mely lehetővé teszi az aeroszolok és a különböző üvegházgázok, valamint a felhőbeni víz és jég megoszlás megfelelő leírását. A PRUDENCE projekt keretein belül a következő modell-szimulációkat végezték el: ICTP REF (1961-1990), ICTP A2 (2071-2100, A2), ICTP B2 (2071-2100, B2). A referencia időszakra, valamint az A2 scenárió esetén a HadAM3H globális modell outputjait használták fel kiindulási- és peremfeltételként, míg a B2 scenárió esetén a HadAM2H-t.

2.1.7 PROMES

A PROMES klímamodell az azonos nevű numerikus modelltől származtatható, mely hidrosztatikus közelítést és teljesen összenyomható közegre felírt primitív egyenlet-rendszert alkalmaz (Castro et al., 1993). A modell nyomási alapokon nyugvó szigma koordináta-rendszert, és Lambert projekciót használ. Az Arakawa-C rácson vett modell prognosztikai változói a potenciális hőmérséklet, felszíni nyomás, horizontális szél, specifikus nedvesség, felhőzet és csapadék. A rövidhullámú sugárzás sémáját Anthes et al. (1987) alapján veszik, míg a hosszuhullámú sugárzást Garand (1983) szerint számolják. A konvektív skálájú csapadékot Kain és Fritsch (1993) alapján, míg a felszíni-vegetációs-légköri mozgásokat a SECHIBA séma (Ducoudre et al., 1993) alapján veszik.

A PRUDENCE projekt keretein belül a következő modell-szimulációkat végezték el: UCM CONTROL (1961-1990), UCM A2 (2071-2100, A2), UCM B2 (2071-2100, B2). Mindhárom szimuláció során a HadAM3H globális modell outputjait használták fel kiindulási- és peremfeltételként.

2.1.8 CLM

A CLM klímamodellnek a Német Meteorológiai Intézetnél használt LM, Lokalmodell-hez hasonló dinamikája és fizikája van (Steppeler et al., 2003). A nem-hidrosztatikus modell

számításait egy elforgatott, szférikus, Arakawa-C horizontális rácson és egy felszínkövető, hibrid, vertikális koordináta-rendszerben végzik el. Az időbeli integrálás horizontálisan explicit, vertikálisan implicit időlépcsőkön történik. A PRUDENCE-en belül használt modellverzió $0,5^\circ$ -os horizontális felbontással, elforgatott, szférikus rendszerben és vertikálisan 20 szintet véve felszínkövető, hibrid koordináta-rendszerben számolt. Tiedtke (1989) sémáját a CAPE-lezárással alkalmazva kapjuk a nedvesség konvekció parametrizálását. A sugárzási sémát Ritter és Geleyn (1992) írja le. A talajban lezajló folyamatok leírására kilenc réteggel számoló almodellt használnak.

A PRUDENCE projekt keretein belül a következő modell-szimulációkat végezték el: GKSS CTL (1961-1990), GKSS SA2 (2071-2100, A2), GKSS CTLSN (1961-1990), GKSS SA2SN (2071-2100, A2). Mind a négy szimuláció során a HadAM3H globális modell outputjait használták fel kiindulási- és peremfeltételként.

2.1.9 RACMO

A holland RACMO2 modell az ERA-40 reanalízis adatbázis előállításához (Uppala et al., 2005) is alkalmazott ECMWF 23r4 fizikai cikluson alapszik, mely egy tömeg-fluxus sémát, egy prognosztikai felhő sémát és egy TESSEL-féle felszíni sémát tartalmaz. A nyári hőmérsékleti hibák csökkentése érdekében a vegetációs függvényt módosították és a felszíni rétegek vastagságát megnövelték Lenderink et al. (2003) alapján. A RACMO2 a HIRLAM 5.0.6 modell szemi-lagrange dinamikáját veszi alapul. A modell horizontális felbontása $0,44^\circ$, az alkalmazott időlépcső 12 perc, és az ERA40-hez hasonlóan 31 vertikális szintet használ. A szimulációs tartomány szélén 8 pontos relaxációs sémát, míg a szél esetében a helyes légnyomási értékek eléréséhez 16 pontosat vesznek (Lenderink et al., 2003). A határfeltételeket 6 óránként frissítik.

A PRUDENCE projekt keretein belül a következő modell-szimulációkat végezték el: KNMI HC1 (1961-1990), KNMI HA2 (2071-2100, A2). Mindkét szimuláció során a HadAM3H globális modell outputjait használták fel kiindulási- és peremfeltételként.

2.1.10 RCAO

A regionális svéd RCAO modell (Döscher et al., 2002) a Rossby Központban használt légköri RCA (Rummukainen et al., 2001, Jones et al., 2004) és óceáni RCO (Meier et al., 2003) modellből áll, továbbá tartalmaz a folyók és a tavak leírására szolgáló egyszerűsített

hidrológiai ciklust is (Lindström et al., 1997, illetve Omstedt, 1999).

Az RCA modell a HIRLAM modellen alapszik. Horizontálisan elforgatott, Arakawa-C típusú rácsot, míg vertikálisan Simmons-féle hibrid koordináta rendszert vesz. A legújabb verziójú RCA2 modell 10-70 km-es horizontális felbontást, s 24-60 vertikális szintet tekint (Jones et al., 2004).

Az RCO az OCCAM (Ocean Circulation Climate Advanced Modlling Project in Southhampton) óceáni modellből származik (Webb et al., 1997). A modellben nyílt határfeltételeket (Stevens, 1990), két-egyenletes turbulens sémát, k-epsilon modellt (Rodi, 1980) és egy tengeri-jég sémát (Hibler, 1979) alkalmaznak. Főleg regionális számításokhoz használják.

A PRUDENCE projekt keretein belül a következő modell-szimulációkat végezték el: SMHI HCCTL (1961-1990), SMHI HCA2 (2071-2100, A2), SMHI HCB2 (2071-2100, B2), SMHI MPICTL (1961-1990), SMHI MPIA2 (2071-2100, A2), SMHI MPIB2 (2071-2100, B2). Az első három szimuláció során a HadAM3H globális modell outputjait használták fel kiindulási- és peremfeltételként, míg a második három szimulációhoz az ECHAM4/OPYC modellpáros szolgáltatotta a bemenő adatmezőket.

3. Várható éghajlatváltozás a Kárpát-medencében

Kutatásaink során a Kárpát-medence térségében várható regionális klímaváltozás elemzését két irányból megközelítve végeztük el. Elsőként a napi maximum-, minimum-, és középhőmérsékleti értékek valamint a csapadékösszegek havi átlagos várható alakulását vizsgáltuk, majd az éghajlati szélsőségek előfordulási gyakoriságában, s intenzitásában várható változásokat tanulmányoztuk. Mindkét esetben a rácsponti idősorokból kiindulva térképesen ábrázoltuk a kapott eredményeket.

A havi átlagokban várható változások elemzését a referencia időszakra (1961-1990) vonatkozó modell-szimulációk értékelésével kezdtük

3.1 A regionális klímamodellek kontroll-szimulációi a Kárpát-medencére

Vizsgálatunk során a havi középhőmérsékletek és csapadékösszegek referencia-időszakra szimulált mezőit egy független méréseken alapuló adatbázissal hasonlítottuk össze. A mért értékeket tartalmazó adatbázist a Kelet-Angliai Egyetem Éghajlatkutató Osztálya (CRU) állította össze.

Ez a CRU TS 2.0 elnevezésű adatbázis (Mitchell et al., 2003; New et al., 1999, 2000) 0,5°-os horizontális felbontással a teljes szárazföldi területet lefedi, s 1901-2000 közötti időszakra adja meg öt meteorológiai változó (csapadék, középhőmérséklet, gőznyomás, napi hóingás és felhőfedettség) havi idősorát. A 0,5°-os adatbázis forrásairól hőmérséklet esetében Jones és Moberg (2003) ad leírást, míg a csapadék esetén New et al. (2002).

A rendelkezésre álló mezősorokból leválasztottuk a Magyarországot lefedő rácspontokat a 16,75 °K és 22,25 °K közötti, valamint a 45,75 °É és 48,25 °É közötti területen. A leválasztott rácspontokban a havi átlaghőmérséklet-, illetve a havi átlag csapadékösszeg-idősorok alapján képeztük a 30 évre vonatkozó átlagértékeket, majd a teljes leválasztott régióra meghatároztuk a területi átlagokat. A kontroll-szimuláció és a CRU adatbázis felhasználásával kapott területi átlagértékek különbsége adja a modell számolási hibáját. A hőmérséklet esetén ezeket a 2. táblázatban összegezzük.

2. táblázat: A különböző kontroll-futások (1961-1990) havi és évi átlagos hőmérsékleti hibái (°C) Magyarország területére

Azonosító	Intézet	KHC1	KNMI	HADCN	METNO	HCCTL	SMHI	MPICTL	SMHI	HC_CTL	ETH	CTL	GKSS	CTLNSN	GKSS	REF	ICTP	DA9	CNRM	DE3	CNRM	DE4	CNRM	HC1	DMI	HC2	DMI	HC3	DMI	ECCTRL	DMI	ECC	DMI	ADEHA	HC	ADEHB	HC	ADEHC	HC	3003	MPI	CONTROL	UCM		
JAN		1,6	2,9	2,9	3,1	1,0	1,9	0,3	1,5	1,4	1,2	1,8	2,2	2,5	1,6	2,5	2,1	1,7	2,1	2,1	1,8	2,1			1,7	2,1	2,1	1,8	2,1			1,7	2,1	2,1	1,8	2,1			1,7	2,1	2,1	1,8	2,1		
FEB		1,3	1,7	2,5	1,1	0,1	1,2	-1,0	0,2	-1,1	-1,4	-0,7	1,9	1,9	1,0	0,7	1,4	1,7	1,7	1,2	2,1	0,6			1,7	1,7	1,2	2,1	0,6			1,7	1,7	1,2	2,1	0,6			1,7	1,7	1,2	2,1	0,6		
MÁR		0,3	0,0	1,5	0,3	-1,2	-0,6	-2,5	-1,8	-3,0	-3,1	-2,6	1,2	1,4	0,6	-0,8	1,7	0,5	0,8	1,0	1,2	-2,1			0,5	0,8	1,0	1,2	-2,1			0,5	0,8	1,0	1,2	-2,1			0,5	0,8	1,0	1,2	-2,1		
ÁPR		-0,1	-1,2	0,6	0,3	-1,6	-1,4	-3,3	-3,0	-3,6	-3,5	-3,3	0,2	0,4	0,1	-0,9	1,6	0,0	0,4	1,1	0,4	-4,0			0,0	0,4	1,1	0,4	-4,0			0,0	0,4	1,1	0,4	-4,0			0,0	0,4	1,1	0,4	-4,0		
MÁJ		0,7	-0,9	1,5	0,9	-0,4	-0,4	-1,6	-1,0	-2,3	-2,2	-2,1	0,2	0,4	-0,1	-1,3	1,6	0,5	1,6	0,7	0,7	-2,8			0,5	1,6	0,7	0,7	-2,8			0,5	1,6	0,7	0,7	-2,8			0,5	1,6	0,7	0,7	-2,8		
JÚN		2,0	0,7	2,5	2,0	1,8	2,0	0,8	1,8	0,4	0,3	0,2	1,9	1,4	1,7	0,5	2,7	2,5	3,6	3,7	2,8	0,3			2,5	3,6	3,7	2,8	0,3			2,5	3,6	3,7	2,8	0,3			2,5	3,6	3,7	2,8	0,3		
JÚL		2,9	1,5	4,0	4,9	3,2	2,9	1,8	3,6	2,0	1,9	1,9	3,9	3,2	3,6	2,2	5,6	6,0	6,2	6,9	3,8	1,7			6,0	6,2	6,9	3,8	1,7			6,0	6,2	6,9	3,8	1,7			6,0	6,2	6,9	3,8	1,7		
AUG		2,2	1,3	4,1	4,2	2,3	1,5	0,6	3,0	2,1	1,8	2,2	3,4	3,1	4,2	2,0	6,4	5,8	5,5	6,2	3,6	0,9			5,8	5,5	6,2	3,6	0,9			5,8	5,5	6,2	3,6	0,9			5,8	5,5	6,2	3,6	0,9		
SZEP		-0,2	-0,2	1,7	2,6	-0,6	-1,1	-2,3	0,0	0,0	0,4	0,2	2,2	2,3	2,7	1,6	4,5	2,4	2,3	3,2	1,9	-1,5			2,4	2,3	3,2	1,9	-1,5			2,4	2,3	3,2	1,9	-1,5			2,4	2,3	3,2	1,9	-1,5		
OKT		-1,0	-0,4	0,2	0,2	-1,9	-1,5	-3,1	-1,0	-1,7	-0,7	-0,8	0,9	1,5	0,8	0,1	1,2	0,9	0,6	1,3	0,6	-2,4			0,9	0,6	1,3	0,6	-2,4			0,9	0,6	1,3	0,6	-2,4			0,9	0,6	1,3	0,6	-2,4		
NOV		-0,6	0,5	0,4	-0,7	-0,7	0,1	-1,5	-0,3	-0,5	-0,4	-0,6	0,7	0,8	0,5	-0,4	-0,4	0,4	-0,2	0,8	0,6	-0,4			0,4	-0,2	0,8	0,6	-0,4			0,4	-0,2	0,8	0,6	-0,4			0,4	-0,2	0,8	0,6	-0,4		
DEC		0,5	1,7	2,0	1,3	0,2	1,2	-0,3	0,8	1,0	1,3	0,8	1,1	1,5	-0,1	0,6	0,4	0,5	1,0	0,9	1,4			0,5	1,0	0,9	1,4			0,5	1,0	0,9	1,4			0,5	1,0	0,9	1,4			0,5	1,0	0,9	1,4
Éves		0,8	0,6	2,0	1,7	0,2	0,5	-1,0	0,3	-0,4	-0,3	-0,2	1,7	1,7	1,4	0,6	2,4	1,9	2,1	2,4	1,7	-0,5			1,9	2,1	2,4	1,7	-0,5			1,9	2,1	2,4	1,7	-0,5			1,9	2,1	2,4	1,7	-0,5		

A vizsgálat során 21 kontroll-futást tekintettünk, melyek mindegyikéhez tartozik egy-egy A2 scenáriót figyelembe vevő jövőbeli futtatás, a B2 scenáriót viszont csak 10 modell tekintette, melyeket sárgával jelöltünk a táblázatban. A 2. táblázatból jól látszik, hogy a hőmérséklet legnagyobb felülbecslése (akár 2-6 °C-os mértékű) általában nyáron (főként júliusban és augusztusban) jelentkezik, míg a legtöbb nulla körüli hibaérték novemberben fordul elő. Sokkal ritkábban találunk hőmérsékleti alulbecslést: néhány modellfuttatás esetében (pl. ETH, GKSS, ICTP, CNRM, UCM) elsősorban a tavaszi hónapokban jelentkezik (s mintegy 1-4 °C-os mértékű).

Az átlagos havi és évi csapadékösszegek százalékban kifejezett hibaértékeit a 3. táblázat összegzi. A hibaértékeket a szimulált (CTL) és a CRU adatsorok felhasználásával az alábbi módon származtattuk: $(CTL-CRU)/CRU$.

Míg a hőmérséklet esetében +6,8 °C és -4,0 °C közötti hibaértékeket találtunk, addig a csapadék területi átlagban vett és százalékban kifejezett hibája már jóval nagyobb változékonyságot mutat: +109% (október, SMHI MPICTL) és -63% (augusztus, DMI ECC) között változik. A csapadék alulbecslése főként a nyári félévben jelentős: augusztusban a területi átlagos hiba abszolút értékben meghaladja a 9%-ot minden modellfuttatás esetén, s a DMI ECC kontroll-futtatás esetén csaknem eléri a 63%-ot. A

felülbecslés elsősorban a téli félévben jelentkeznek, de nem minden modellfuttatás esetén.

3. táblázat: A különböző kontroll-futások (1961-1990) havi és évi átlagos csapadék hibái (%) Magyarország területére

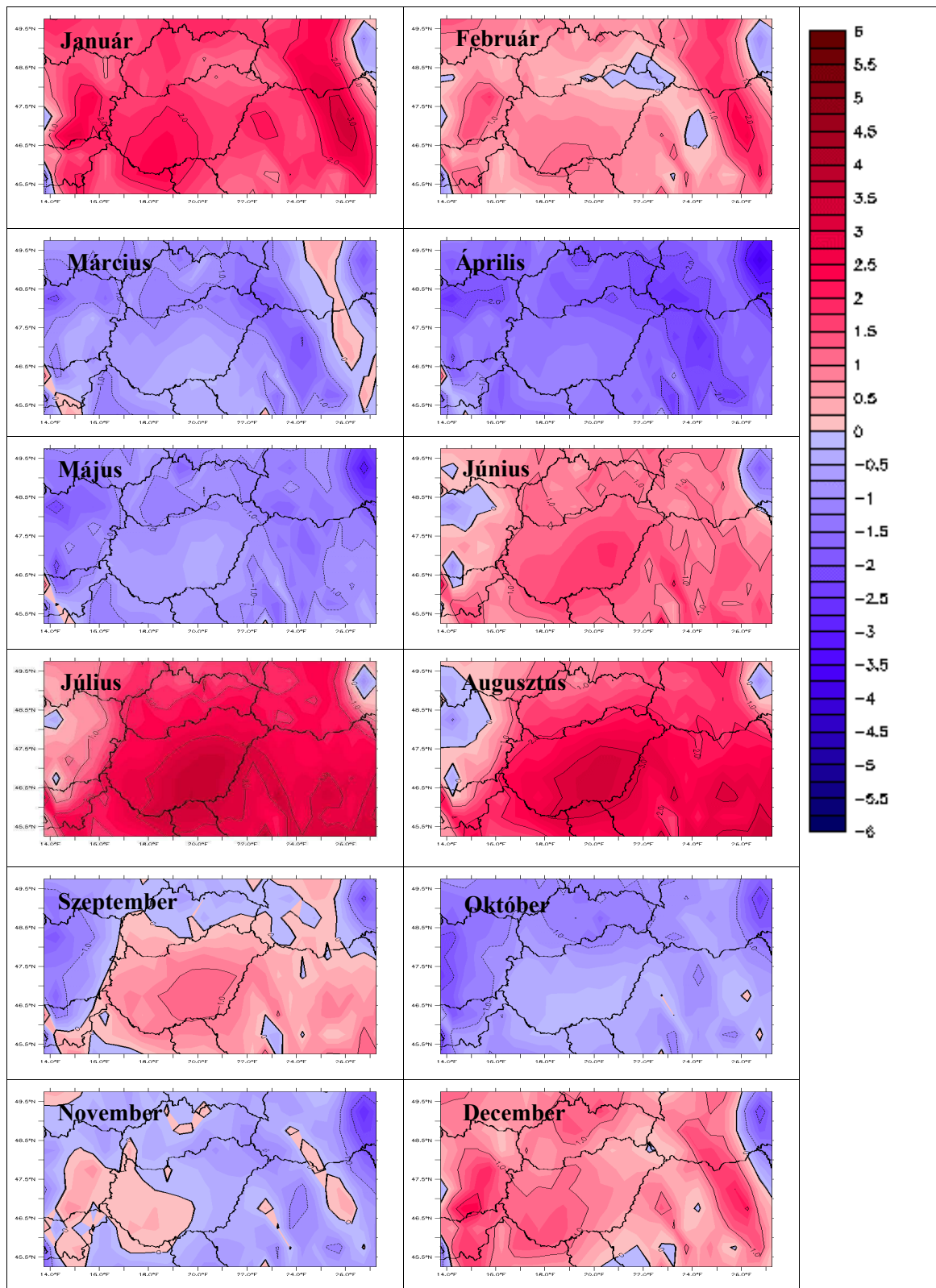
Azonosító	Intézet		SMHI		ETH	GKSS		ICTP	CNRM		DMI	DMI	DMI	DMI	DMI	HC		MPI	UCM		
	KHCI	KNMI	HADCN	METNO		HC_CTL	CTL		GKSS	REF						DA9	DE3			DE4	HC1
JAN	-4	41	21	61	8	40	21	32	27	21	45	8	-2	17	47	36	-11	-5	-11	11	-9
FEB	-18	35	4	27	-6	35	9	15	8	0	3	-12	6	17	39	32	-5	-19	-26	-2	-21
MÁR	16	66	13	45	20	78	40	70	25	16	24	10	22	46	57	27	26	16	12	26	-2
ÁPR	21	43	17	32	11	57	9	64	25	47	36	21	22	17	44	2	15	9	4	26	-9
MÁJ	-10	9	-19	-15	-11	2	-26	45	26	35	34	20	30	28	40	-1	15	-1	23	18	-29
JÚN	-31	-23	-41	-42	-37	-31	-48	-5	-3	0	1	1	9	-1	-2	-21	-13	-25	-32	-4	-37
JÚL	-43	-14	-50	-59	-58	-34	-54	-21	24	10	16	6	15	5	4	-35	-38	-39	-57	-6	-20
AUG	-39	-27	-54	-55	-59	-10	-54	-22	-30	-14	-32	-12	-10	-26	-10	-63	-46	-44	-51	-26	-37
SZEP	-1	34	-12	-5	-17	52	-6	27	4	-1	15	-6	4	-18	25	-41	3	-19	-25	-4	3
OKT	32	54	19	109	12	72	29	54	52	43	37	20	29	35	98	-2	11	25	-4	15	29
NOV	16	40	27	32	6	45	20	28	2	-13	23	7	-10	6	20	-13	-33	-23	-10	14	-8
DEC	5	37	29	44	7	37	21	22	24	14	10	0	6	12	19	-4	7	-10	-5	13	3
Éves	-5	25	-4	15	-10	29	-3	26	15	13	18	5	10	11	32	-7	-6	-11	-15	7	-11

Hőmérséklet esetében a CRU adatbázistól legkevésbé eltérő modell-szimuláció a METNO által futtatott HADCN, míg a legtöbb hónapban 2 °C-ot meghaladó hibát adó szimuláció az SMHI intézet HCCTL elnevezésű futása. A csapadékot tekintve a CRU adatbázistól abszolút értékben legkevésbé eltérő modellfuttatások a következők: HIRHAM (DMI HC1, DMI HC2), REMO (MPI 3003), PROMES (UCM CONTROL), míg a referencia időszakban a leginkább eltérő az SMHI által futtatott MPICTL.

A kompozittérképek elkészítéséhez csak azokat a szimulációkat használtuk fel, melyek a havi átlagos hőmérsékleteket és a havi átlagos csapadékösszegeket megfelelő mértékben reprodukálták. Ehhez két feltétel teljesülését vizsgáltuk. A hőmérséklet esetén az abszolút értékben 2 °C-ot meghaladó hibákat már nem tekintettük elfogadhatónak, a csapadék esetén pedig az elfogadhatóság határát a 40%-os eltéréssel azonosítottuk. Mivel több olyan szimuláció is van, amely kiemelkedően jó a csapadék esetében, ám a hőmérsékletnél nagy hibával terhelt (vagy fordítva), ezért a kontroll futásokban a két változót egyszerre, azaz 24 hónapot véve vizsgáltuk. Egy szimulációt akkor vettünk figyelembe a kompozittérképek elkészítésekor, ha legalább 18 hónapban a hibahatáron

belüli értéket mutatott. Például az UCM intézet CONTROL elnevezésű futása csupán 7 hónapra adott elfogadható havi középhőmérsékleti értéket, míg a csapadéknál a hibahatáron belülre esett mind a 12 hónapra a kapott eltérés: így bekerült a kompozit-térképeket meghatározó szimulációk közé, míg a DMI ECC a hőmérsékletre 7 hónapban, a csapadéokra 10 hónapban adott elfogadható hibát, így azt figyelmen kívül kellett hagynunk. Így tehát a kompozit számítások során figyelmen kívül hagyott szimulációk kontroll futásai a következők: SMHI HCCTL, SMHI MPICTL, DMI ECC, HC ADEHC, GKSS CTL. A kompozit-térképek kiszámításához az A2 scenáriót alkalmazó futások közül a következő 17 szimulációt vettük figyelembe: HC ADHFA, HC ADHFE, MPI 3006, UCM A2, DMI ECSCA2, CNRM DE6, CNRM DE9, ETH HC_A2, GKSS SA2SN, ICTP A2, KNMI HA2, METNO HADA2, DMI HS1, DMI HS2, DMI HS3, CNRM DE7, CNRM DE8. A B2 scenáriót alkalmazó futások közül pedig a következő 8 szimulációt vettük figyelembe: UCM B2, DMI ECSCB2, CNRM DE5, CNRM DC7, ICTP B2, CNRM DC9, CNRM DC2, DMI HB1. A DMI ECSCA2, illetve a DMI ECSCB2 szimulációnál nem állt rendelkezésre minimum- és maximumhőmérsékleti mező, ezért e két paraméter esetén a kompozit-térképekhez 16, illetve 7 szimulációt használtunk fel. Az A2 esetén a CNRM DE6 és a CNRM DE9, illetve a B2 esetén a CNRM DE5 és a CNRM DC7 szimulációkhoz azonos kontroll-futást használtunk az 1961-1990 referencia időszakban.

Az A2 scenárió elemzéséhez felhasznált 16 modell-szimuláció eltéréseiből átlagolt havi hőmérsékletkülönbségeket a 2. ábrán szemléltetjük. A rácsponti hibaértékeket az 1961-1990-es időszakban a szimulált idősorok havi átlagai és a CRU havi átlagok eltéréseként kaptuk. A térképsorozatból kitűnik, hogy a tavaszi hónapokban a modell-szimulációk alábecslik a hőmérsékletet, a hegyvidéki területeken akár 2 °C-kal is, míg Magyarország területén belül 1 °C körül. A nyári hónapokban az 1 °C és 3 °C körüli felülbecslés július hónapban a legnagyobb mértékű és a legkiterjedtebb: az Alföld közepén akár 3,5 °C-os felülbecslést is megfigyelhetünk. Az ősz már nem mutat ilyen egységes képet: míg szeptemberben még a nyárhoz hasonló eloszlást láthatjuk alacsonyabb fölébecslő értékekkel, addig októberben újra 1 °C körüli alábecslést figyelhetünk meg. Az alacsonyabb értékek Magyarország területére esnek. Míg a novemberi hónapban 0 °C körüli hibák a jellemzők, addig decemberben már újra 1 °C feletti felülbecsléseket láthatunk. A téli hónapok közül januárban figyelhetjük meg a legnagyobb, 2 °C körüli fölébecslést, ezen belül is az Alföld délnyugati részén és a hegyvidéki területeken a magasabb értékeket.

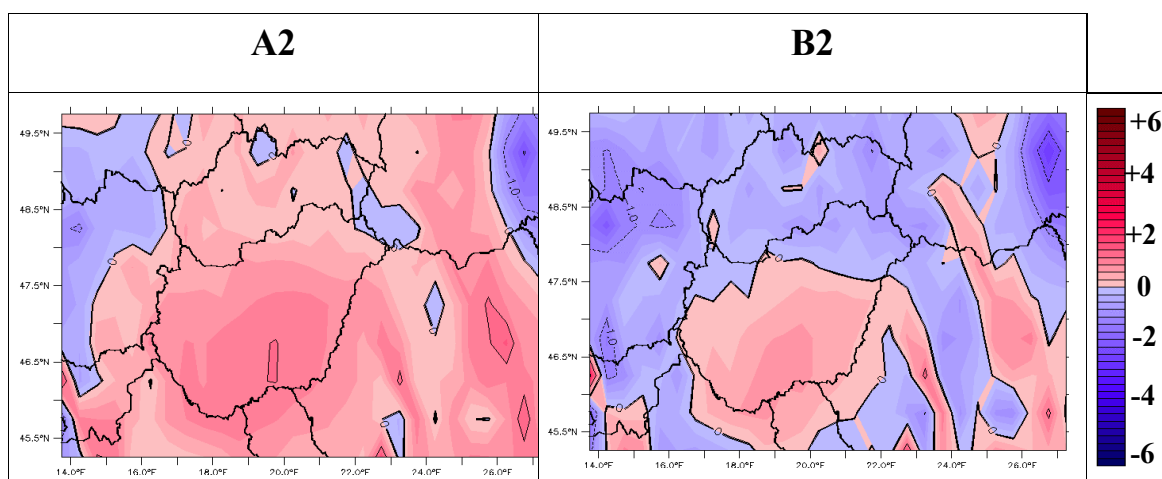


2. ábra: A szimulált havi átlaghőmérsékleti mezők átlagos eltérése ($^{\circ}\text{C}$) a CRU havi átlagmezőktől a referencia időszakban (1961-1990) 16 modellfuttatás alapján.

A B2 forgatókönyvet alkalmazó szimulációk kompozittérképeinek meghatározásában figyelembe vett modellek 7 kontroll futásának havi hiba-átlagmezői általában hasonló szerkezetűek, mint a 2. ábrán bemutatott mezők (hiszen a térképek előállításánál 9 szimulációt nem vettünk figyelembe). A hőmérséklet esetén a következő néhány eltérést

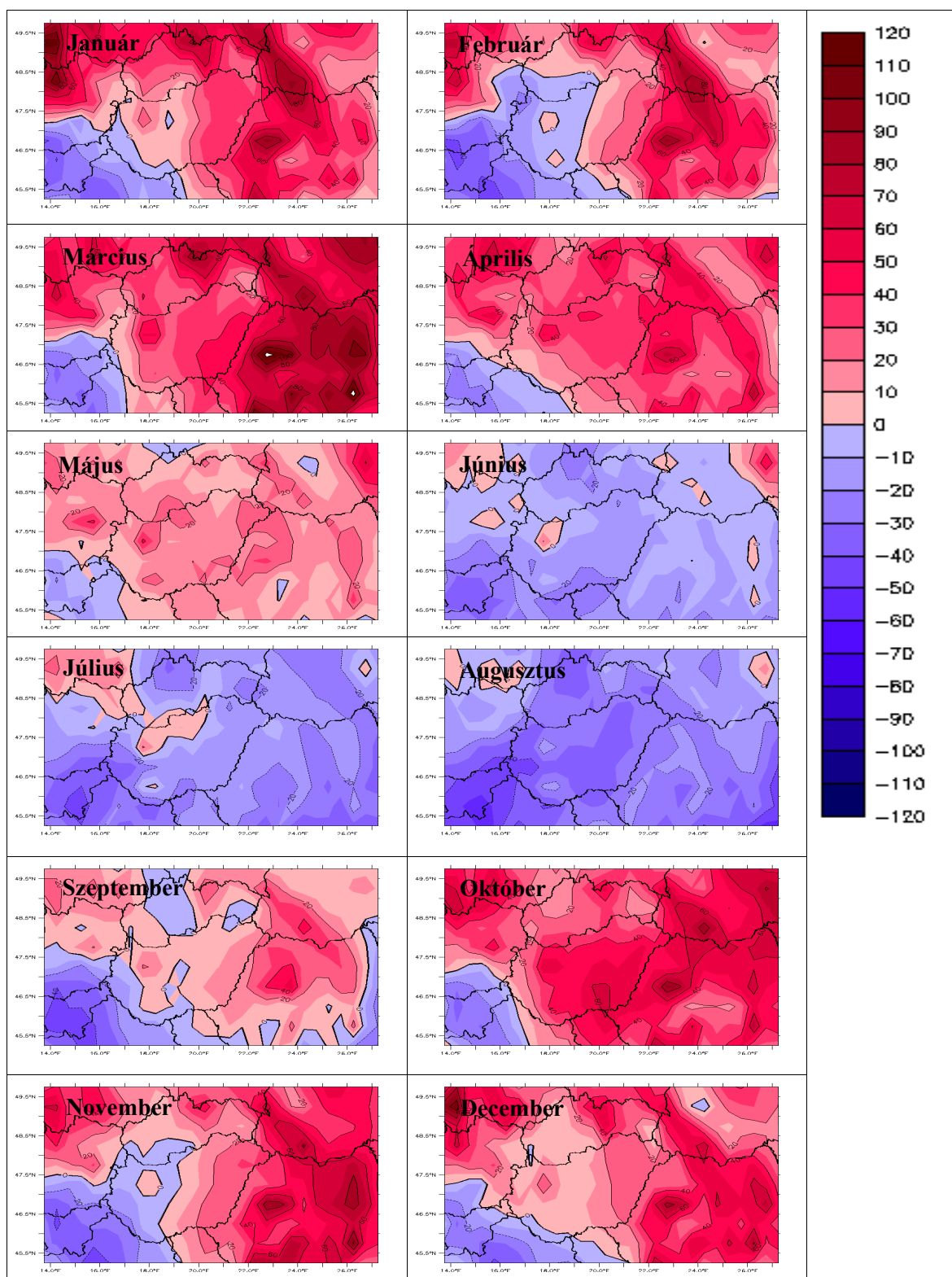
foglalhatjuk össze: (1) Tavasszal az alábecslés 1 °C-kal (hegyvidéken akár 2 °C-kal is) nagyobb, mint a 16 szimuláció esetében. (2) Nyáron nagyobb az alábecsült terület és kb. 0,5 °C-kal nagyobb alábecslés mértéke, mint a 16 szimuláció hibamezői esetében. (3) Ősszel a 16 szimuláció átlagos hibáihoz képest magasabb alulbecsléseket láthatunk, de abszolút értékben véve a hibák ugyanakkorák mindkét esetben. (4) A téli eltérések szinte megegyeznek, kivéve februárban: a 7 kontroll szimuláció átlagos hibamezője esetén valamivel kisebbek az értékek.

Éves átlagban az A2 scenáriót alkalmazó szimulációkhoz felhasznált modellek 16 kontroll futásának átlaga Magyarország területén jobban felülbecsli a hőmérsékletet a CRU adatbázishoz viszonyítva, mint a B2-t alkalmazó 7 modell, míg a Magyarországon kívüli területeken a kevesebb számú (7 kontroll futás) alábecslése nagyobb mértékű (3. ábra).



3. ábra: A szimulált éves átlaghőmérsékleti mezők eltérése (°C) a CRU éves átlagmezőktől a referencia időszakban (1961-1990). A jobb/bal oldali térkép az A2/B2 scenárió vizsgálatához használt 16/7 modellfuttatás alapján készült.

A csapadék esetében is hasonlóan jártunk el: a felhasznált 16 modell-szimuláció (A2) átlagából számított havi csapadékmezők eltérését a CRU havi csapadékhoz viszonyítva az 1961-1990-es időszakban a 4. ábrán mutatjuk be. A tavaszi hónapokban Magyarország délnyugati határán a legkisebb az eltérés a CRU adatbázis csapadék mezőitől: ettől délnyugati irányban 20%-os alábecslést, míg északkelet felé növekvő felülbecslést figyelhetünk meg. Ezek az értékek főleg márciusban és főleg Románia területén elérhetik az akár 100%-os felülbecslést jelentő csapadék-különbséget is (éves szinten ekkor figyelhetjük meg a legnagyobb felülbecslést). A nyári hónapokban a negatív értékek a dominánsak: főleg Ukrajna területén láthatunk még pozitív értékeket, míg déldélnyugat felé egyre nagyobb, 20-40%-os alábecslést figyelhetünk meg. Magyarországot



4. ábra: A szimulált havi csapadékösszeg mezők százalékban kifejezett átlagos eltérése a CRU havi átlagos csapadékmezőktől a referencia időszakban (1961-1990), 16 modellfuttatás alapján

tekintve augusztus hónapban térnek el leginkább (akár 40%-os alábecslést is adva) a modellek átlagában az értékek a CRU adatbázistól. Az ősz eltér a nyári képtől, és megint a délnyugati területek alábecslései és az északkeleti régió felülbecslései a jellemzőek.

Magyarországot tekintve 0% körüli értékeket figyelhetünk meg, kivéve az októberi hónapot, hiszen ekkor akár 60%-ot jelentő felülbecslést is láthatunk. Télen a három hónap nagyon hasonló képet mutat: délnyugaton 20-40%-os alábecslést, északkeleti irányba haladva és a Kárpátokban a magassággal növekvő fölébecslési értékeket, akár 80%-ot is megfigyelhetünk.

A B2 forgatókönyvet alkalmazó szimulációk kompozittérképeinek meghatározásában figyelembe vett modellek 7 kontroll futásának havi hiba-átlagmezői általában hasonló szerkezetűek, mint a 4. ábrán bemutatott mezők (hasonló oknál fogva, mint a hőmérséklet esetében). A következő néhány eltérést foglalhatjuk össze: (1) Márciusban kevésbé, májusban jobban eltérnek a mezők a CRU adatbázistól, mint a 16 szimuláció esetében. (2) Nyáron akár 20%-os felülbecslést is megfigyelhetünk. (3) Ősszel és télen hasonló az átlagos hibamezők szerkezete, kivéve januárban a hegyekben, illetve októberben az Alföldön, amikor nagyobb fölébecslést láthatunk, mint a 16 szimuláció esetén.

3.2 A 2071-2100-ra várható hőmérsékleti- és csapadék-változások becslése

A PRUDENCE projekt eredményei alapján a Kárpát-medencére 2071-2100-ra várható hőmérséklet- és csapadék-változás első becslései évszakos felbontású adatsorok felhasználásával évszakos mezők képében már rendelkezésünkre állnak (Bartholy et al., 2007a, 2007b, 2007c). E szakdolgozatban a havi és a napi felbontású adatsorokat dolgoztuk fel az éghajlatváltozás pontosabb becslése érdekében. A havi mezősorokból kompozittérképek segítségével a várható átlagos változást mutatjuk be, a napi adatsorokat pedig az éghajlati szélsőségek elemzésekor használtuk fel.

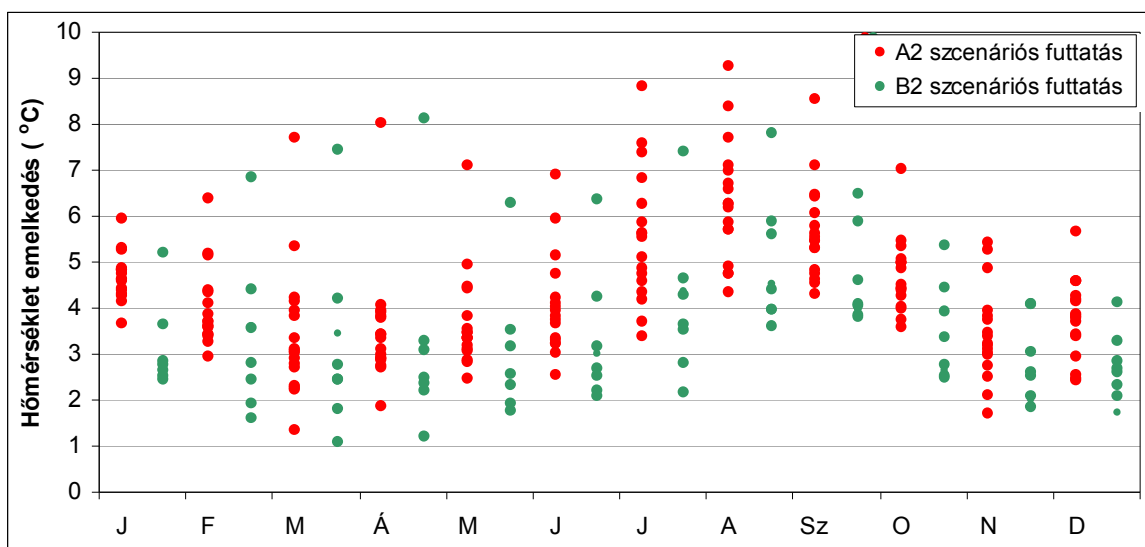
3.2.1 A Kárpát-medencében várható hőmérsékletváltozás

Elsőként a napi középhőmérséklet várható havi átlagos megváltozását elemezzük az A2, illetve a B2 scenárió esetén 2071-2100-ra. Majd a napi maximum- és a minimum-hőmérsékleti mezőkben várható változásokat mutatjuk be.

3.2.1.1 A napi középhőmérséklet várható változása

Először a 3.1 fejezetben kiválasztott 17 (az A2 scenárió esetén), illetve 8 (a B2 scenárió esetén) modellszimuláció által előrejelzett várható változást (melegedést) elemezzük területi átlag formájában, majd ezen szimulációkból a várható melegedés területi szerkezetét mutatjuk be a teljes Kárpát-medencére térképes formában. A magyarországi (16,75 °K és 22,25 °K közötti, valamint a 45,75 °É és 48,25 °É közötti) rácspontokban meghatároztuk minden egyes modellszimuláció esetén a 2071-2100-ra várható havi középhőmérséklet-változást. Az 5. ábrán e rácsponti értékekből kiszámított területi átlagot mutatjuk be az A2 scenáriót tekintő 17 szimuláció, illetve a B2 scenáriót tekintő 8 szimuláció esetén. A legszembetűnőbb különbség az A2 és B2 scenáriót alkalmazó szimulációk között, hogy a 17 A2 modellfutás esetében minden hónapban nagyobb melegedés várható, mint a B2 esetében. Szinte minden hónapban találunk egy, a többinél legalább 2 °C-kal nagyobb melegedést előrejelző futást: B2 esetében februártól augusztusig, míg A2 esetében a tavaszi hónapokban. Érdekes, hogy áprilisban a B2 scenáriót figyelembe vevő szimulációk az A2-nél jóval nagyobb mértékben szórnak (az

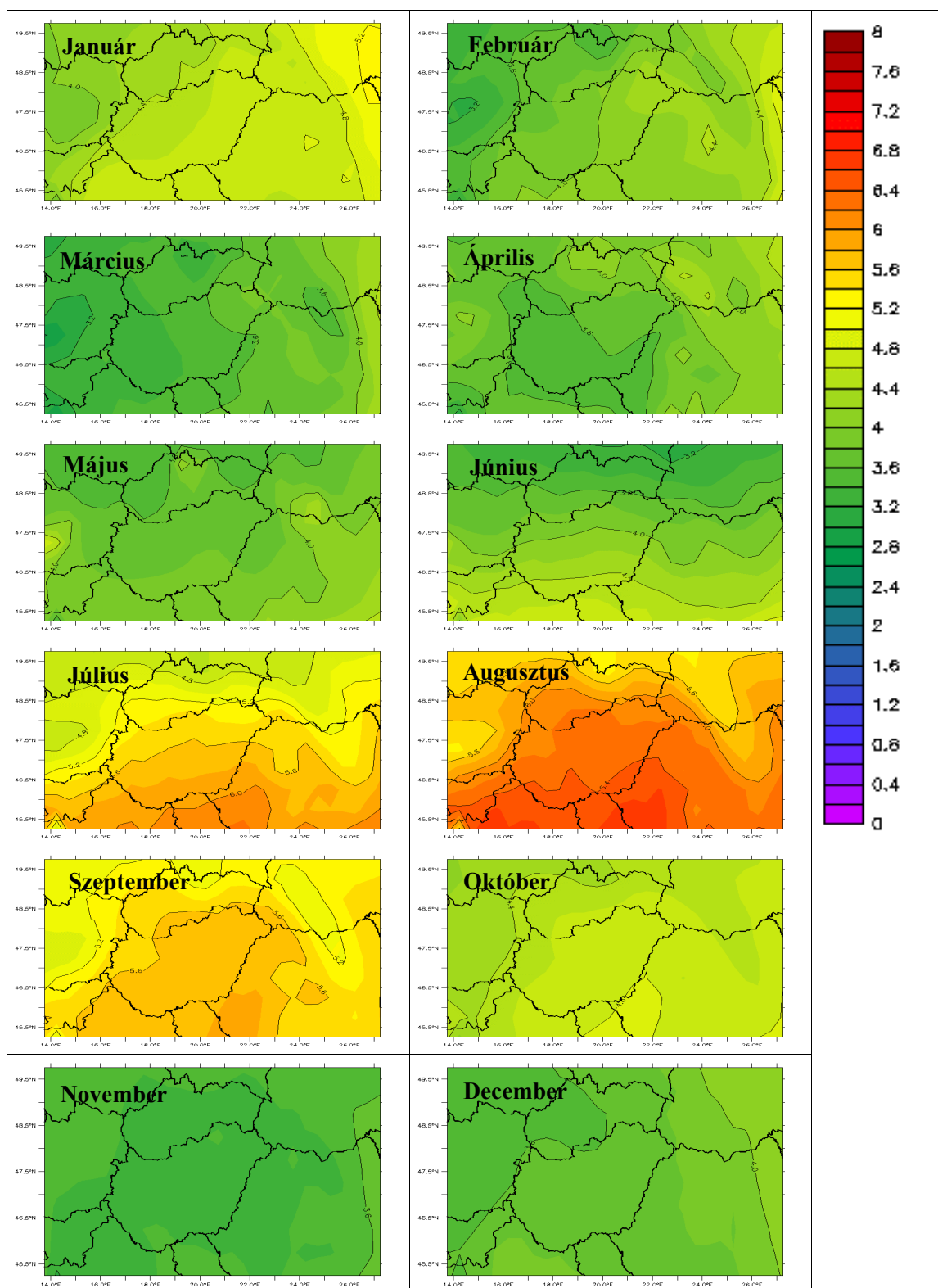
A2-t felülről és alulról is közrefogva), míg novemberben az A2 futások adnak a B2-nél magasabb és alacsonyabb értéket. A várható átlaghőmérséklet növekedés legkisebb szórása januárban figyelhető meg az A2 esetében, míg novemberben a B2 esetében.



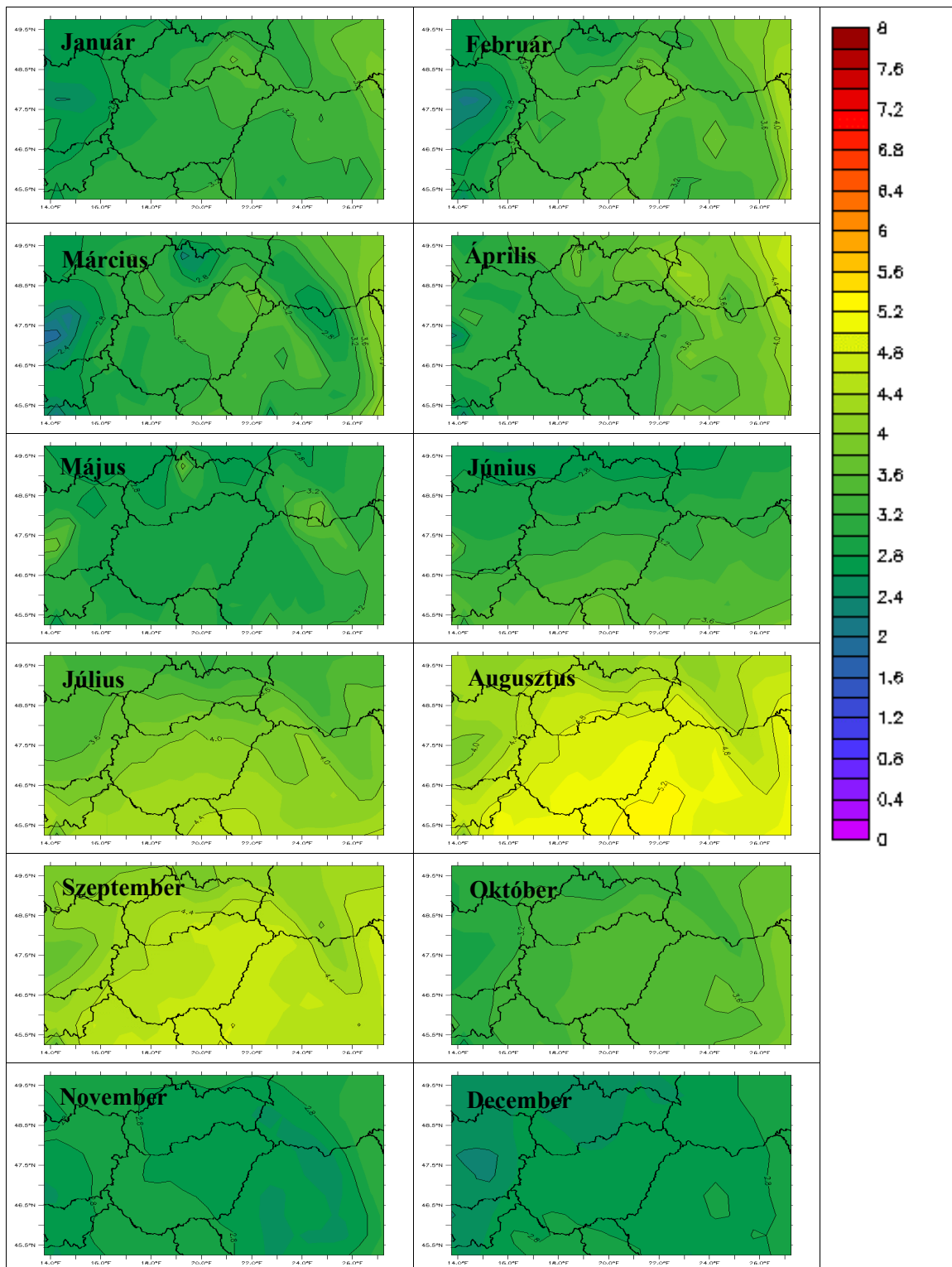
5. ábra: A magyarországi rácspontok havi középhőmérsékletének területi átlagra vonatkozó modellszimulációkénti 2071-2100-ra várható változása az A2 illetve a B2 scenáriók esetén

A havi középhőmérsékletben 2071-2100-ra várható változás becslését a 6. és a 7. ábrán láthatjuk az A2, illetve a B2 scenárió esetén (rendre 17, illetve 8 modelfuttatás átlaga alapján). Az A2 scenáriót tekintve a várható hőmérsékletnövekedés térbeli szerkezete a Kárpát-medence térségében az alábbiak szerint alakul (6. ábra):

- Tavasszal a kontinentalitás, azaz a nyugatról kelet felé növekvő hőmérséklet-emelkedés a jellemző. 3,6 °C körüli az átlagos melegedés, ám májusban ennél magasabb, 3,8 °C-os változás a jellemző. Ugyanekkor a zonális-jellegű változás is erősödni kezd.
- Nyáron a zonalitás a jellemző: északról dél felé erősödő, a hegyvidékekben a környezetüknél kisebb mértékű melegedés a jellemző. Míg júniusban 3,4-4,4 °C-os változás, addig augusztusban az évi maximális, azaz a 6,0-6,4 °C a jellemző.
- Szeptemberben még viszonylag nagy, 5,6 °C-os változás a jellemző, ám októberben és novemberben már alacsonyabb, 4,6 °C-os illetve 3,4 °C-os melegedés várható. Ezekben a hónapokban a területi gradiens a legkisebb az év folyamán.
- Decemberben folytatódik az őszi trend, ám januárban újra a kontinentalitás lesz a jellemző. Ekkor újra erőteljesebb, 4,6 °C-os melegedés várható, míg decemberben ez az érték 3,7 °C körül volt.



6. ábra: A havi középhőmérsékletben 2071-2100-ra várható változás (°C) becslése az A2 szcenárió esetén, 17 modellfuttatás eredményei alapján



7. ábra: A havi középhőmérsékletben 2071-2100-ra várható változás (°C) becslése a B2 scenárió esetén, 8 modellfuttatás eredményei alapján

A B2 scenáriót alkalmazó szimulációk által 2071-2100-ra várható havi átlagos melegedésről (7. ábra) a következőket mondhatjuk azon felül, hogy minden hónapban az A2-nél alacsonyabb értékeket figyelhetünk meg:

- Tavasszal a nyugatról kelet felé növekvő, várhatóan 3-3,2 °C körüli melegedés a jellemző.

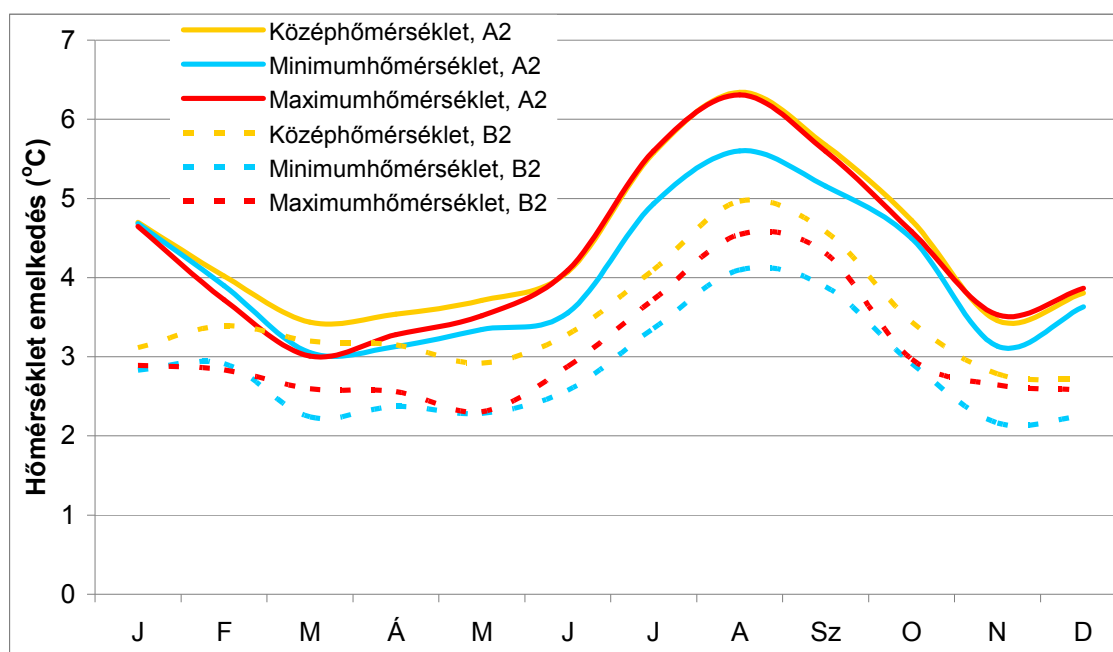
- Nyáron északról dél felé erősödő melegedésre számíthatunk: júniusban 3,2 °C, júliusban 4,0 °C, augusztusban 5,0 °C körüli értékekkel. A legerősebb felmelegedés ekkor várható.

- Szeptemberben még erős, jellemzően 4,6 °C körüli felmelegedésre számíthatunk, míg a rá következő két hónapban egységesebb területi szerkezetet mutató és alacsonyabb mértékű változások várhatóak.

- A decemberre várható melegedés szerkezete megegyezik a novemberre várhatóéval: hasonlóan alacsony, 2,8 °C-os felmelegedés és kicsi területi változékonyság várható. Januárban és februárban ennél magasabb, 3,1 °C illetve 3,4 °C körüli értékekre számíthatunk. A kontinentalitás várhatóan ismét erősebben jelentkezik.

3.2.1.2 A minimum- és maximumhőmérséklet várható változása

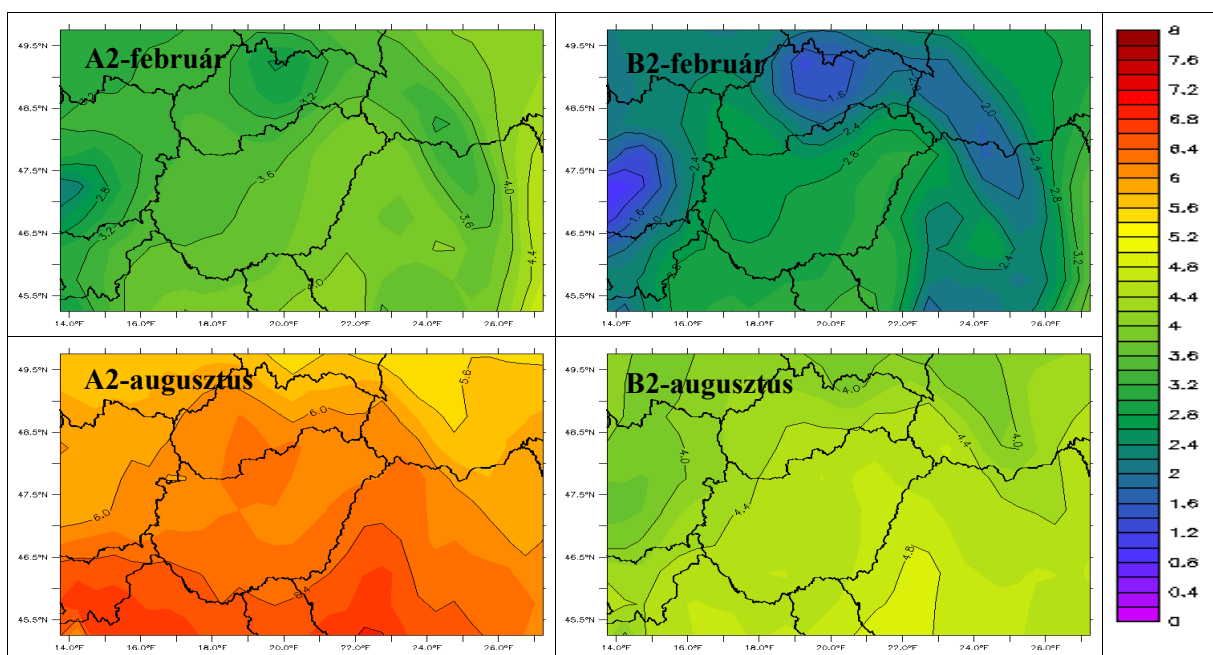
A magyarországi (16,75 °K és 22,25 °K közötti, valamint a 45,75 °É és 48,25 °É közötti) rácspontokra a minimum- és maximumhőmérsékletekben várható területi átlagban vett változásra is végeztünk elemzéseket. A napi közép-, minimum- és maximumhőmérsékletekben területi átlagban 2071-2100-re várható változást az A2 és a B2 szcenáriókra a 8. ábrán szemléltetjük.



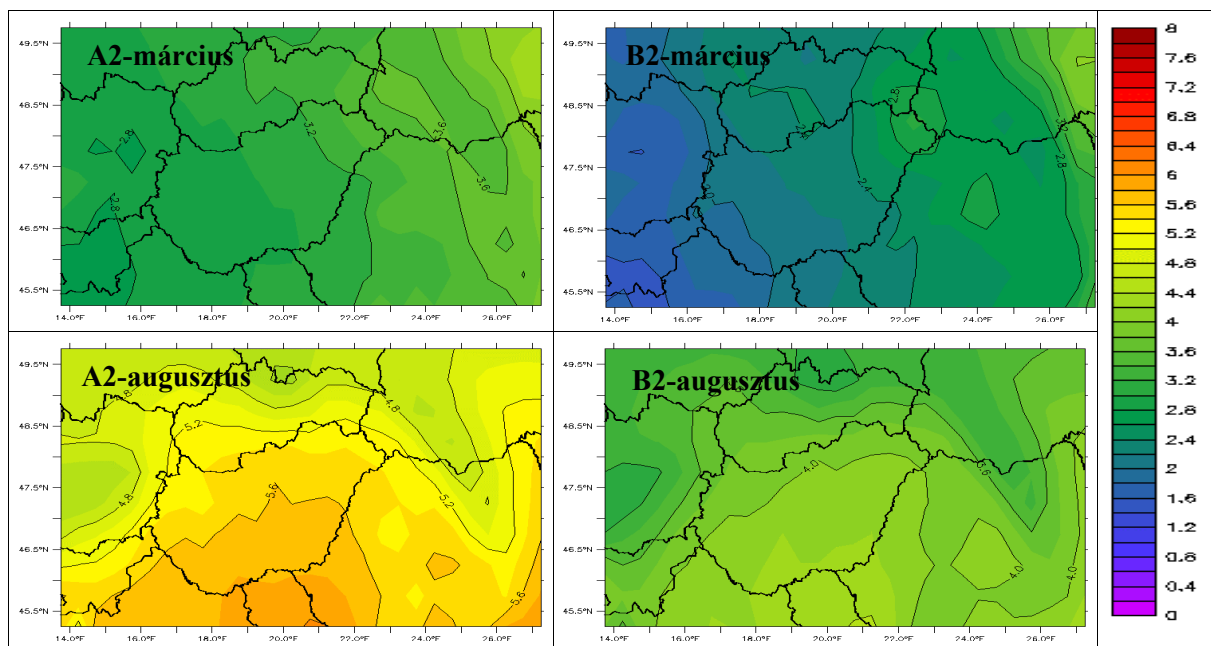
8. ábra: A magyarországi rácspontok napi közép-, minimum- és maximumhőmérsékletek átlagaiban várható változás a 2071-2100 időszakra az A2 illetve B2 szcenárió esetén (17 illetve 8 modellfuttatás figyelembevételével)

A maximum- és minimumhőmérséklet 2071-2100-ra várható havi változásai közül két-két jellemző hónapot emelünk ki az A2 és a B2 scenárió esetén: a maximumhőmérséklet esetében a februárt és az augusztust (9. ábra), míg a minimumhőmérséklet esetében a március és augusztus hónapot (10. ábra). A kapott kompozittérképek alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- A napi maximumhőmérsékletek nyáron mindenhol várhatóan erősebben emelkednek, mint a minimumok, míg télen csak a Kárpát-medence középső területein.
- A maximumhőmérséklet várható emelkedésének térbeli szerkezetében télen jóval gyengébb a kontinentalitás hatása és erősebb a domborzat hatása, mint a minimumhőmérsékletnél.
- A B2 scenárió esetén várható maximum- és minimumhőmérséklet-növekedés márciusban tér el legkevésbé az A2 scenárió esetén várható melegedéstől.
- Az A2 scenárió esetén várhatóan jobban jelentkezik a melegedés zonális jellegű szerkezete, mint a B2 esetén.



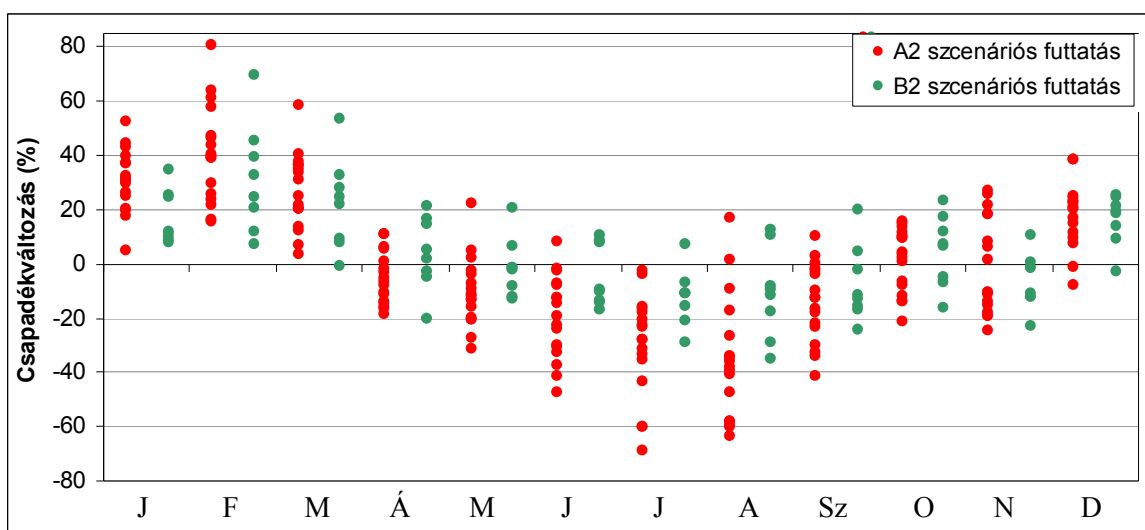
9. ábra: A napi maximumhőmérsékletek február és augusztus hónap átlagában 2071-2100-ra várható változás (°C) becslése az A2 illetve a B2 scenárió esetén, 17 illetve 8 modellfuttatás eredményei alapján



10. ábra: A napi minimumhőmérsékletek március és augusztus hónap átlagában 2071-2100-ra várható változás (°C) becslése az A2 illetve a B2 scenárió esetén, 17 illetve 8 modellfuttatás eredményei alapján

3.2.2 A Kárpát-medencében várható csapadékváltozás

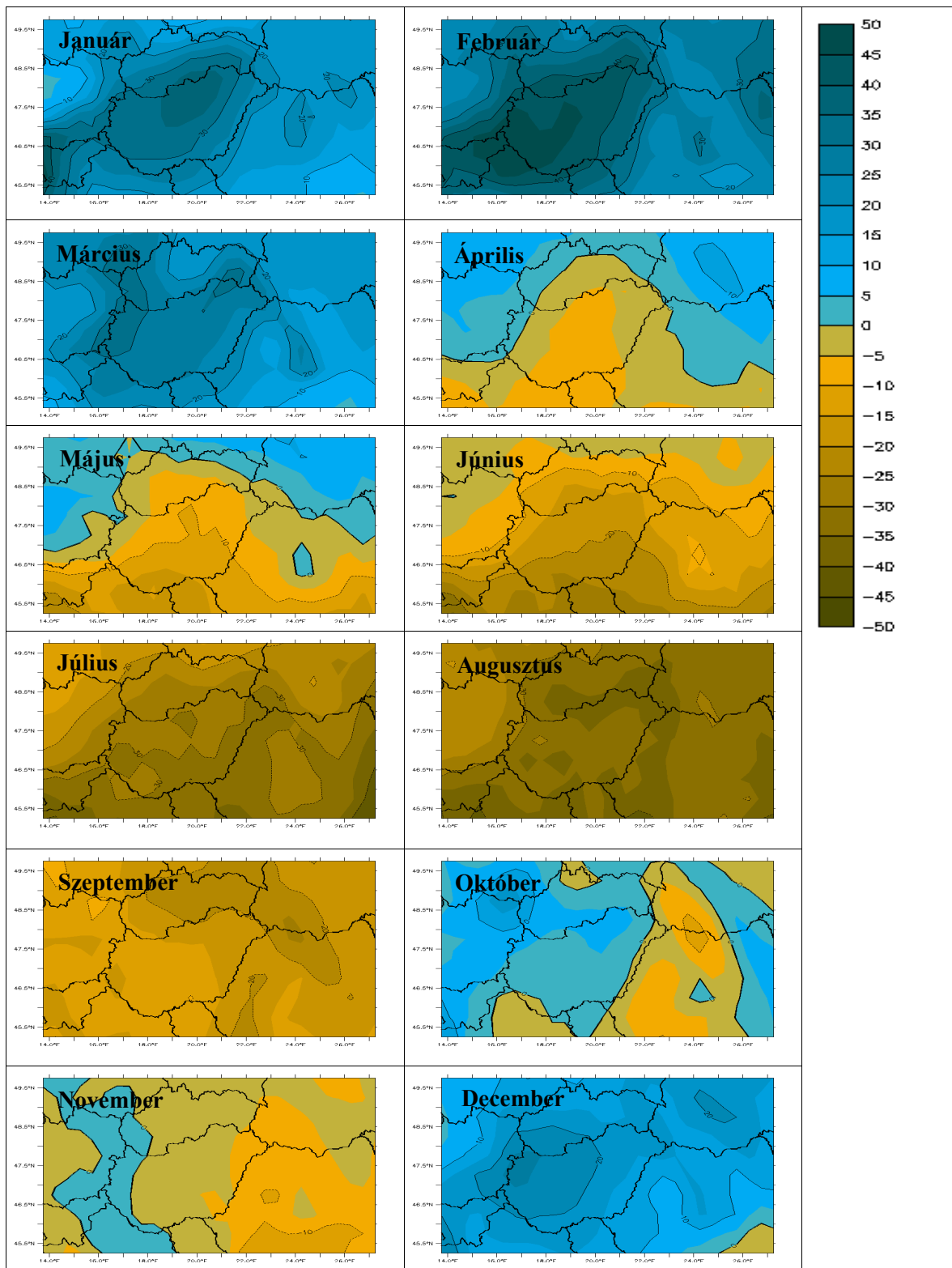
A hőmérséklethez hasonlóan a csapadéknál is a 3.1 fejezetben kiválasztott 17 (az A2 scenárió esetén), illetve 8 (a B2 scenárió esetén) modellszimuláció által előrejelzett várható változást elemezzük területi átlag formájában, majd ezen szimulációkból a 2071-2100-ra várható csapadékváltozás területi szerkezetét mutatjuk be a teljes Kárpát-medencére térképes formában. A magyarországi rácspontokban meghatározott modellszimulációnkénti várható havi csapadékváltozás területi átlagát a 11. ábrán mutatjuk be az A2 scenáriót tekintő 17 szimuláció, illetve a B2 scenáriót tekintő 8 szimuláció esetén. Alapvetően két szélsőség jellemzi a modellszimulációk által adott csapadékváltozást: februárban mind az A2, mind a B2 esetén az összes szimuláció pozitív változást jelez, míg júliusban egy kivételével mind csökkenő csapadékösszeg-értékeket jelez. A B2 scenárió esetén a futások április, május, szeptember, október hónapokban adnak 0% körüli (bizonytalanságot jelző) változást, míg az A2 esetében ez április, október és november hónapokra jellemző. A grafikonból kitűnik, hogy a B2 scenáriós futások minden hónapban általában közelebb vannak a 0% körüli értékhez, azaz kevésbé szélsőséges változást jeleznek, mint az A2 scenáriós modellszimulációk. A szimulációk által becsült csapadékváltozás mértéke leginkább februárban és augusztusban szóródik, míg legkevésbé áprilisban és októberben.



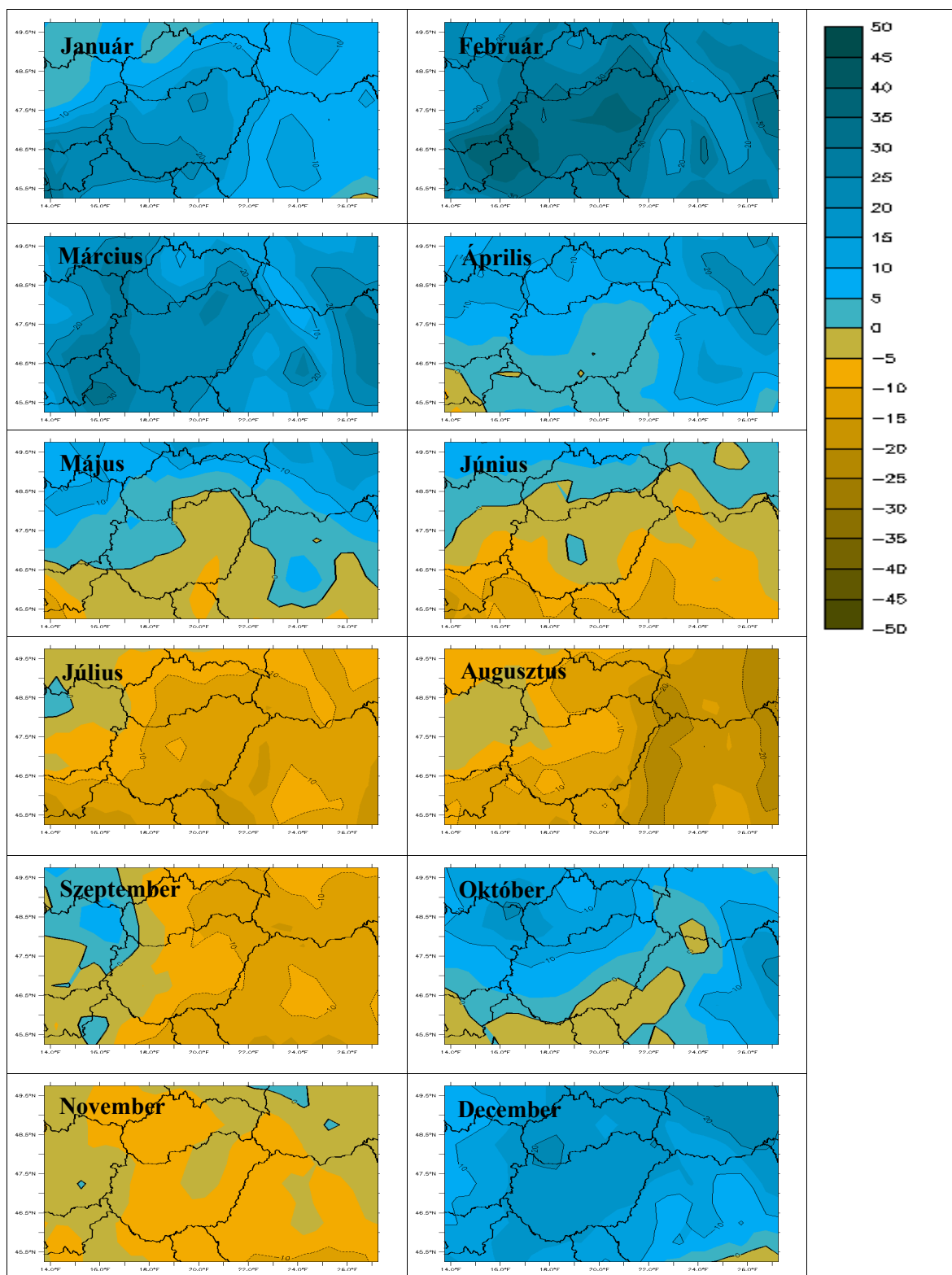
11. ábra: A magyarországi rácspontok havi csapadékösszegének területi átlagra vonatkozó modellszimulációnkénti 2071-2100-ra várható változása az A2 illetve a B2 scenáriók esetén

A havi kompozittérképek segítségével az átlagos csapadékváltozások térbeli szerkezetét elemezzük. Az A2 scenáriót alkalmazó 17 modellszimuláció alapján átlagolt havi csapadékváltozást a 12. ábrán mutatjuk be, a térképsorozat alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- Márciusban erőteljes, nyugaton akár 30%-os növekedés is várható. Április és május számít az átmeneti évszaknak a téli és nyári csapadék-változások között, ha az előjeleket tekintjük: északon még növekedés, délen csökkenés várható a csapadékban
- Nyáron egyértelműen csökkenés várható a csapadékban, mely északnyugatról délkelet felé haladva erősödik: a legnagyobb mértékű (30-35%-os) csökkenésre várhatóan augusztusban számíthatunk.
- Míg szeptemberben kelet felé erősödő csökkenés várható (a legnagyobb csökkenés elérheti akár a 15-20%-ot), addig októberben az ország egész területén csapadék-növekedésre számíthatunk. Novemberben viszont csak csekély mértékű változás várható.
- Télen várhatóan minden hónapban növekszik a csapadék: leginkább februárban, ekkor a Dunántúlon 45% feletti növekedés várható. Mivel a téli hónapokban hullik a legkevesebb csapadék, ezért ez a változás nem tudja kompenzálni a nyári, legcsapadékosabb hónapok csapadék-csökkenéséből adódó hiányt.



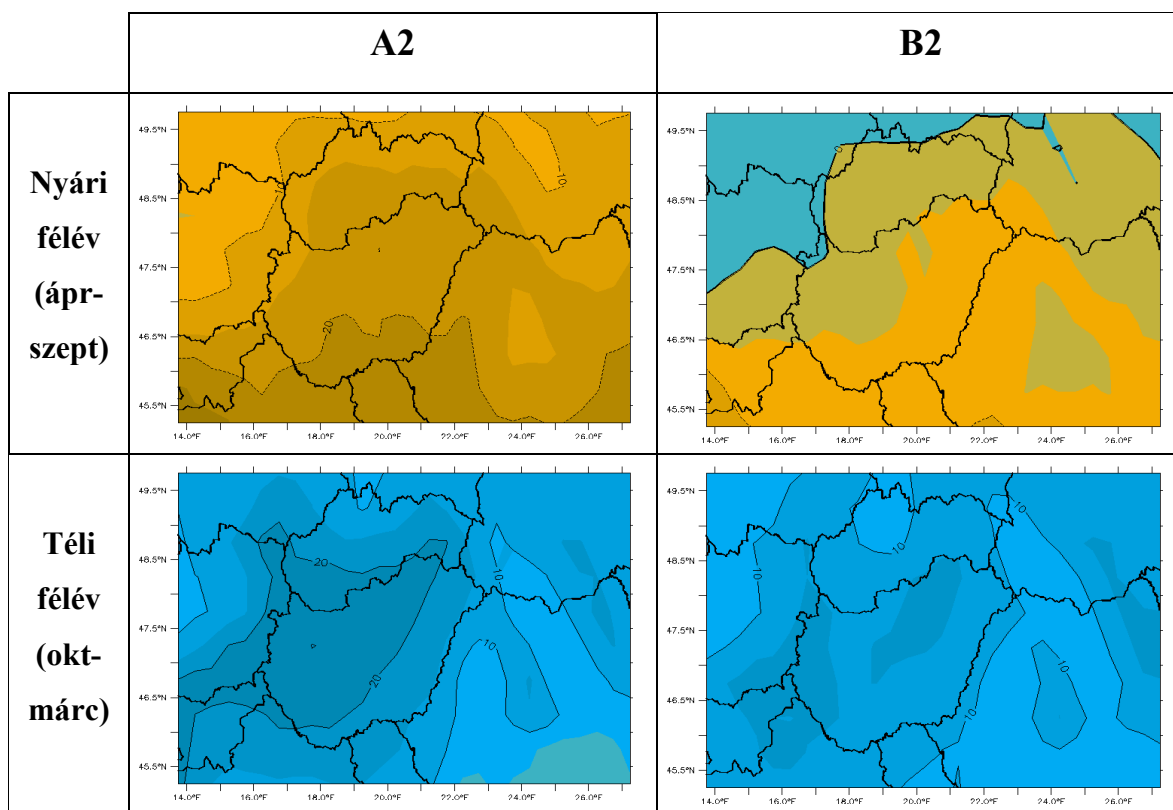
12. ábra: A havi csapadékösszegekben 2071-2100-ra várható változás (%) becslése 17 modellfuttatás A2 scenárióra vonatkozó eredményei alapján



13. ábra: A havi csapadékösszegekben 2071-2100-ra várható változás (%) becslése 8 modellfuttatás B2 scenárióra vonatkozó eredményei alapján

A B2 kibocsátási forgatókönyvet figyelembe vevő 8 modellfuttatás havi csapadékösszegben várható átlagolt változását a 13. ábrán mutatjuk be, mely alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- Tavasszal az A2 scenáriótól eltérő szerkezeti képet láthatunk: a csapadék-növekedési trend még áprilisban is jelenkezhet, mely délnyugatról északkelet felé erősödik.
- A június a májushoz hasonlóan szintén átmeneti évszagnak tekinthető, hiszen északon várhatóan még gyengén növekszik, délen pedig csökken a csapadék.
- Július, augusztus és szeptember hónapokban északnyugatról délkelet felé erősödő mértékben a csapadék csökkenése várható, de az értékek a Kárpát-medence közepén csupán 10% körül vannak.
- Októberben átmeneti növekedés várható (talán az őszi ciklontevékenységek erősödése miatt), míg novemberben egy 5%-ot jelentő csökkenés várható a csapadékösszegekben.
- A téli hónapokban várhatóan mindenhol növekszik a csapadék: legnagyobb mértékben a középső területeken. A legerősebb (35%-os) növekedésre februárban számíthatunk.



14. ábra: A féléves csapadékösszegekben 2071-2100-ra várható változás (%) az A2 (balra) illetve a B2 (jobbra) scenárió esetén. A kompozittérképek 17 illetve 8 modellfuttatás alapján készültek.

Végezetül a nyári (áprilistól szeptemberig) és a téli (októbertől márciusig) félévben várható csapadékváltozást hasonlítjuk össze az A2, illetve a B2 scenárióra (14. ábra). Jól

látszik, hogy mindkét félévben az A2 scenárió esetén számíthatunk nagyobb mértékű változásra. Az A2 scenárió esetén a téli félév csapadéka a Kárpát-medence közepén 10-20%-kal növekszik, B2 esetén pedig 10-15% közötti mértékben. A nyári félévben ellenkező előjelű a várható csapadékváltozás: az A2 esetén 15-20%-os csapadékcsökkenésre számíthatunk, a B2 esetén a várható csökkenés mértéke csak 5% körüli a Kárpát-medence közepén, s a Kárpát-medence északnyugati részén a csapadék gyenge növekedése várható.

3.3 Az éghajlati szélsőségekben 2071-2100-ra várható változások becslése

Az éghajlati változók átlagértékeinek változása együtt jár a szélsőséges éghajlati események gyakoriságának és intenzitásának módosulásával. Ezen szélsőséges klímaesemények számszerűsítése céljából az 1990-es évek végén nemzetközi összefogással definiáltak közel harminc extrém hőmérsékleti és csapadék indexet (Karl et al., 1999).

Az extrém éghajlati indexek XX. század második felére vonatkozó trendvizsgálatát mért adatokat felhasználva már elvégezték a Kárpát-medencére (Bartholy és Pongrácz, 2005, 2007). A dolgozatban a PRUDENCE-projekten belül futtatott modellek által adott eredmények alapján határozzuk meg ezen indexeket mind az 1961-1990, mind a 2071-2100 közötti időszakokra, majd ezeket összehasonlítva következtetünk a változás mértékére. Az indexek számítását a hibák alapján legjobbnak ítélt négy modell-szimulációt felhasználva végezzük (4. táblázat).

4. táblázat: Az extrém indexek vizsgálatához használt kontroll- és scenárió-futások azonosítói

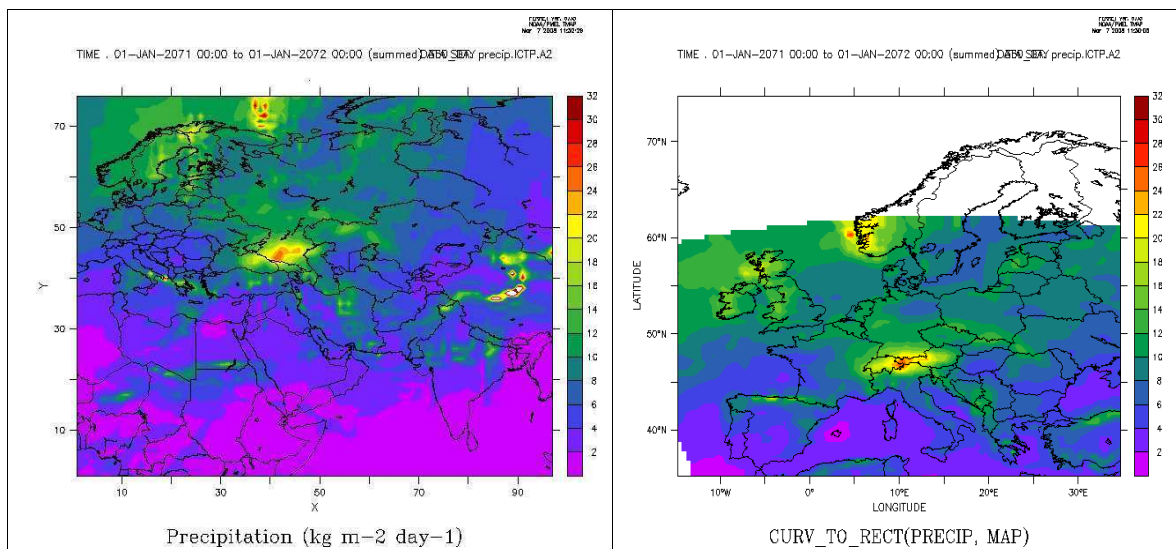
<i>Kontroll futás (1961-1990)</i>	<i>Jövőbeli futás (2071-2100)</i>
ETH HC_CTL	ETH HC_A2 (A2)
KNMI HC1	KNMI HA2 (A2)
DMI HC1	DMI HS1 (A2)
DMI HC1	DMI HB2 (B2)
ICTP ref	ICTP A2 (A2)
ICTP ref	ICTP B2 (B2)

A napi adatsorok mezőit a PRUDENCE projektben résztvevő intézetek nem alakították át a CRU adatbázis említett területére, ahogy azt a havi és évszakos adatsoroknál tették, hanem mindegyik intézet más és más területen, elforgatott koordináta-rendszerben végezte számításait. Az általunk felhasznált négy intézet modelljének számítási területének részleteit az 5. táblázatban találjuk.

5. táblázat: Az alkalmazott négy modell számítási területének leírása

Modell neve	Hosszúsági körök száma	Szélességi körök száma	Rácstávolság (°)	Déli sark helye
ETH	65	75	0,5	10 °K; -32,5 °É
KNMI	94	80	0,44	23 °K; -28 °É
DMI	90	84	0,44	27 °K ; -37 °É
ICTP	97	76	0,44	Nincs adat

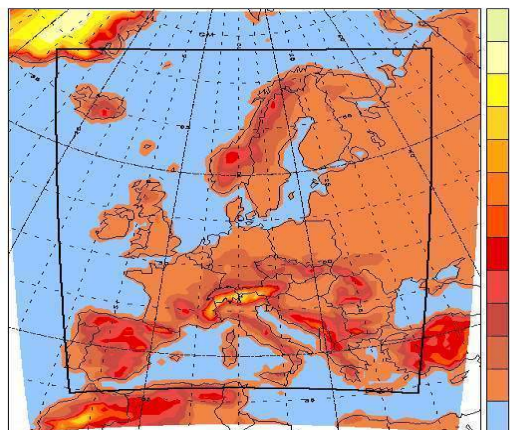
Az elforgatott koordináta-rendszer használatával elkerülhetjük a földrajzi fókálózat okozta torzításokat, ám hátránya, hogy görbevonalú (azaz nem szabályos és nem fél fokos) koordinátákat használ. Ahhoz, hogy a térképeket a mezőkre helyesen illesszük, és fél fokos rácson gyorsan végezhessük a számításokat, át kellett alakítanunk az elforgatott rendszerben vett mezők (rotated longitude, rotated latitude) koordinátáit egyenesvonalú rácshálózatot lefedő (longitude, latitude) koordinátákká. A 15. ábrán az ICTP intézet modelljének eredeti számítási területét és az átrácsozás utáni, helyes koordinátákkal leírt mezőt láthatjuk.



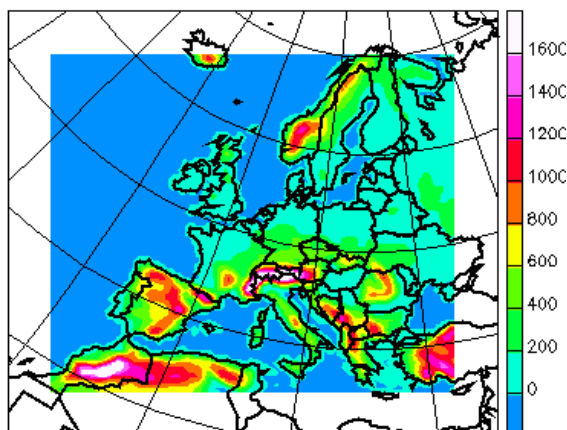
15. ábra: Az ICTP intézet modelljének eredeti számítási területe (balra), majd az átrácsozás utáni terület, amely már Európára vonatkozó területet fed le. Példaként egy év csapadékösszegét mm/nap-ban kifejezve ábráztuk.

A modellekből mind a szélességi és hosszúsági körök mentén kétszer vett 8-11 határpontot levágtak. A három intézet (ETH, KNMI, DMI) modelljének átrácsozás utáni területét, a határ menti levágott sávot és a figyelembe vett domborzatot az 16. ábrán láthatjuk.

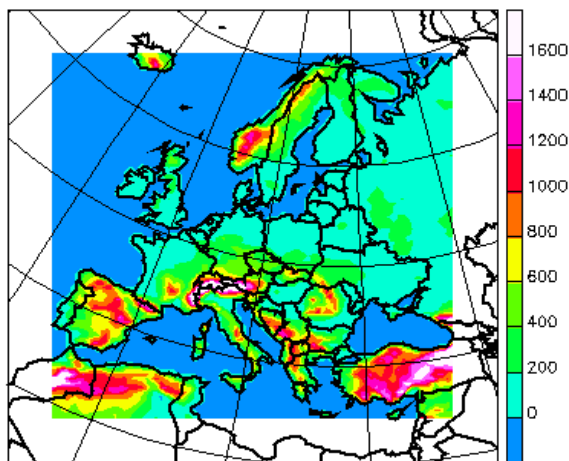
ETH modelltartománya



KNMI modelltartománya



DMI modelltartománya



16. ábra: Az ETH (fent, balra), a KNMI (fent, jobbra) és a DMI (lent) intézet modelljének számítási területe, vetülete és a figyelembe vett domborzat m-ben kifejezve (mindhárom modell nagyjából 50 km-es felbontású)

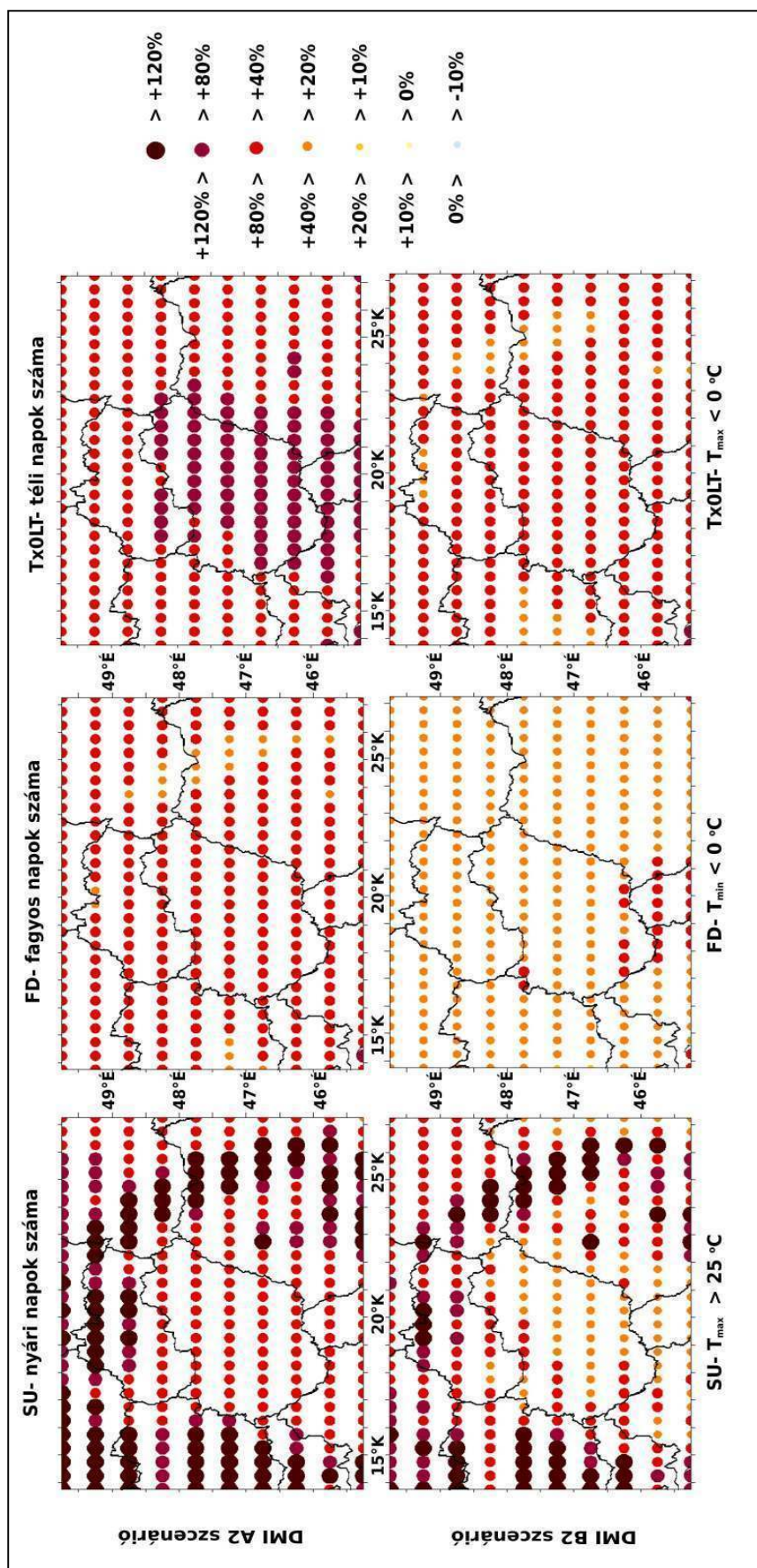
3.3.1 Hőmérsékleti extrémindexek elemzése

A 6. táblázatban összefoglalt legfontosabb hőmérsékleti extrémindexeket (és azok változását) a rendelkezésünkre álló minimum-, maximum- és átlaghőmérsékleti idősorok alapján számolhatjuk. Az indexek éves értékét tekintve az 1961 és 1990 közötti időszakra (X20), továbbá a 2071 és 2100 közötti intervallumra (X21), majd ezek relatív eltérését $((X21-X20)/X20 \cdot 100)$ véve megkapjuk az extrémindexek várható alakulását százalékban kifejezve.

6. táblázat: A hőmérsékleti extrémindexek definíciói, jelei és egységei
(Bartholy és Pongrácz, 2005 alapján)

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

A hőmérsékleti extrémindexek mindegyike melegedő éghajlatra utaló változást mutat. Először vizsgáljunk meg főleg a mezőgazdaságot érintő néhány kevésbé szélsőséges indexet: a nyári napok és a fagyos napok számának változását. A 17. ábrán láthatjuk a DMI intézet A2 és B2 scenáriót figyelembe vevő futása szerint a nyári napok (SU), a fagyos napok (FD) és a téli napok (Tx0LT) számának várható változását.

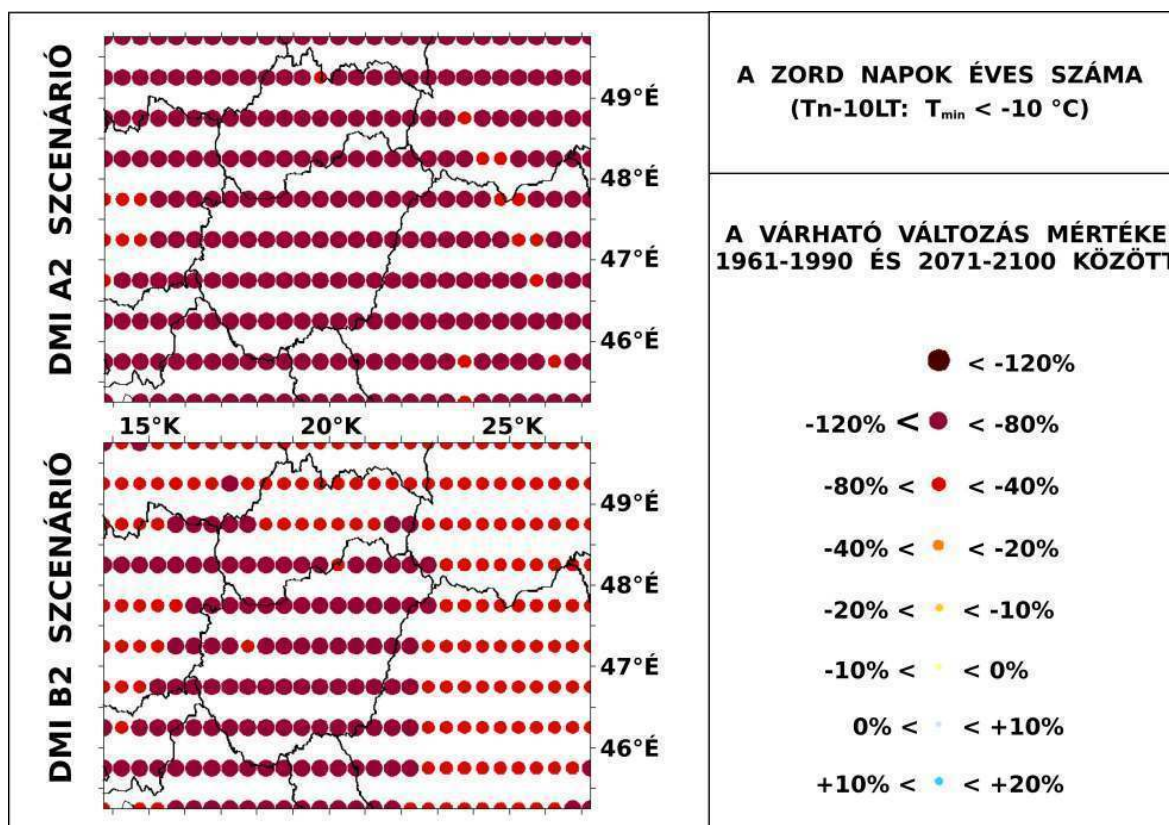


17. ábra: A nyári napok számának (SU), a fagyos napok számának (FD) és a téli napok számának (Tx0LT) várható változása 1961-1990 és 2071-2100 között a DMI intézet modelljének A2 és B2 forgatókönyvű szimulációja alapján

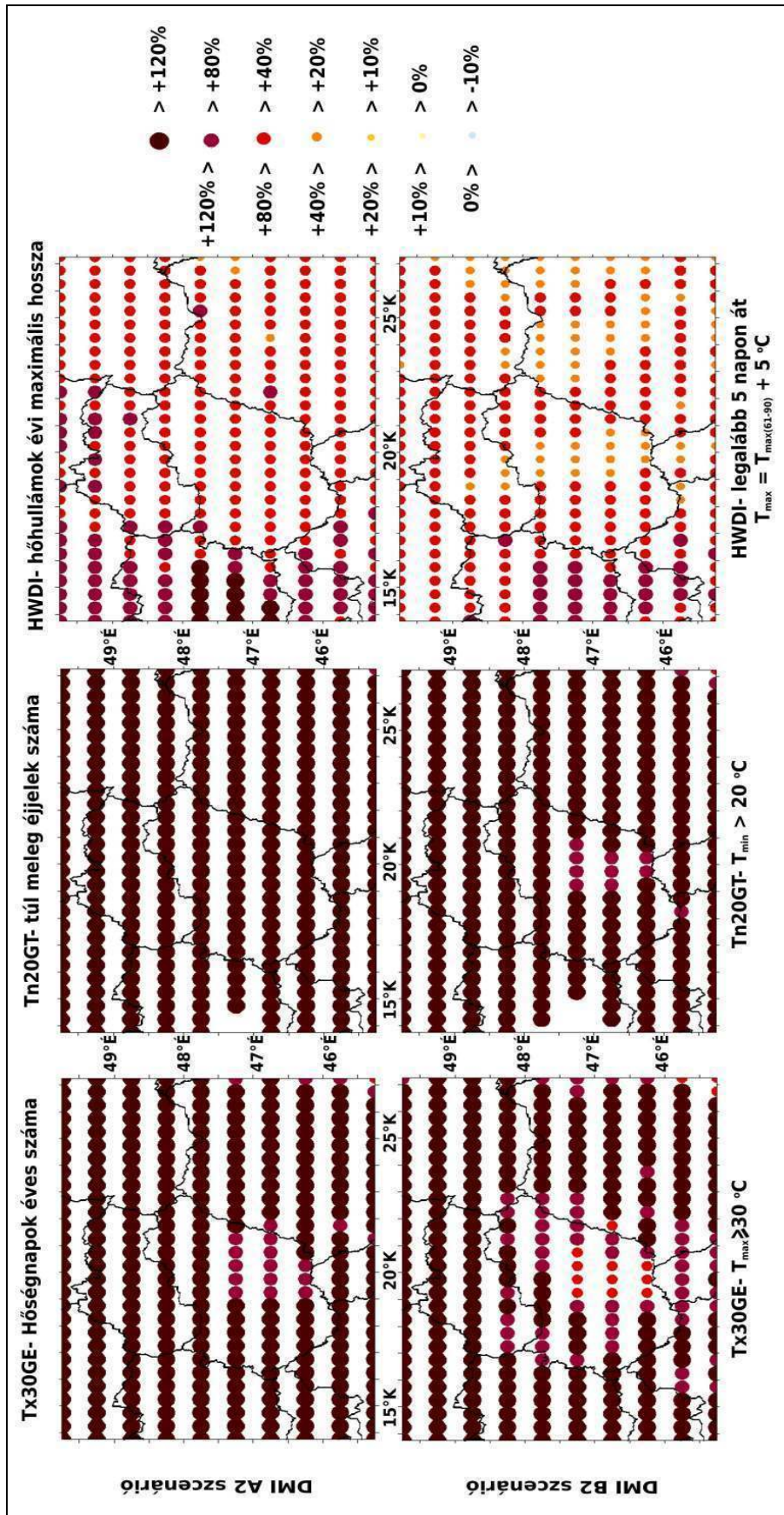
A nyári napok számának változásában jelentős különbség várható a síkságok és a hegyvidékek között: az A2 és B2 scenárió esetében is a domborzattal együtt növekszik a nyári napok számának várható változása. A B2 esetében 40%-nál kisebb növekedés is előfordulhat a Kárpát-medence közepén, míg az A2 esetében jellemzően a 40% és 80% közötti értékekre számíthatunk. A fagyos napok számának várható változásában nem figyelhetünk meg ilyen jelentős változékonyságot: a B2 scenáriós futás esetében a 40%-nál kisebb mértékű növekedés, míg az A2 esetében a 40% feletti a jellemző.

Hasonló tendenciát figyelhetünk meg a téli napok számának (Tx0LT) vizsgálatakor, melyet szintén a 17. ábrán láthatunk. A térképek szerint az A2 scenáriót figyelembe vevő futtatás esetében a Kárpát-medence középső részén a téli napok számában drasztikus, 80% és 120% közötti, míg a B2 esetében 40% és 80% közötti csökkenésre számíthatunk. A B2 esetében az Alpok egy kis területén 40% alatti csökkenés is előfordulhat.

Tovább vizsgálva az extrém alacsony hőmérsékletek változását, a 18. ábrán láthatjuk a zord napok számában (Tn-10LT) várható még erőteljesebb csökkenést az előző két, negatív hőmérsékletet vizsgáló indexhez viszonyítva. Magyarország egész területén várhatóan 80% és 120% között csökken a zord napok száma mind a két scenárió esetében. Az egyetlen lényeges különbség, hogy a B2 esetén kisebb területen találunk 80%-nál nagyobb csökkenést.



18. ábra: A zord napok éves számának várható változása 1961-1990 és 2071-2100 között a DMI intézet modelljének A2 illetve B2 scenáriót tekintő szimulációja alapján



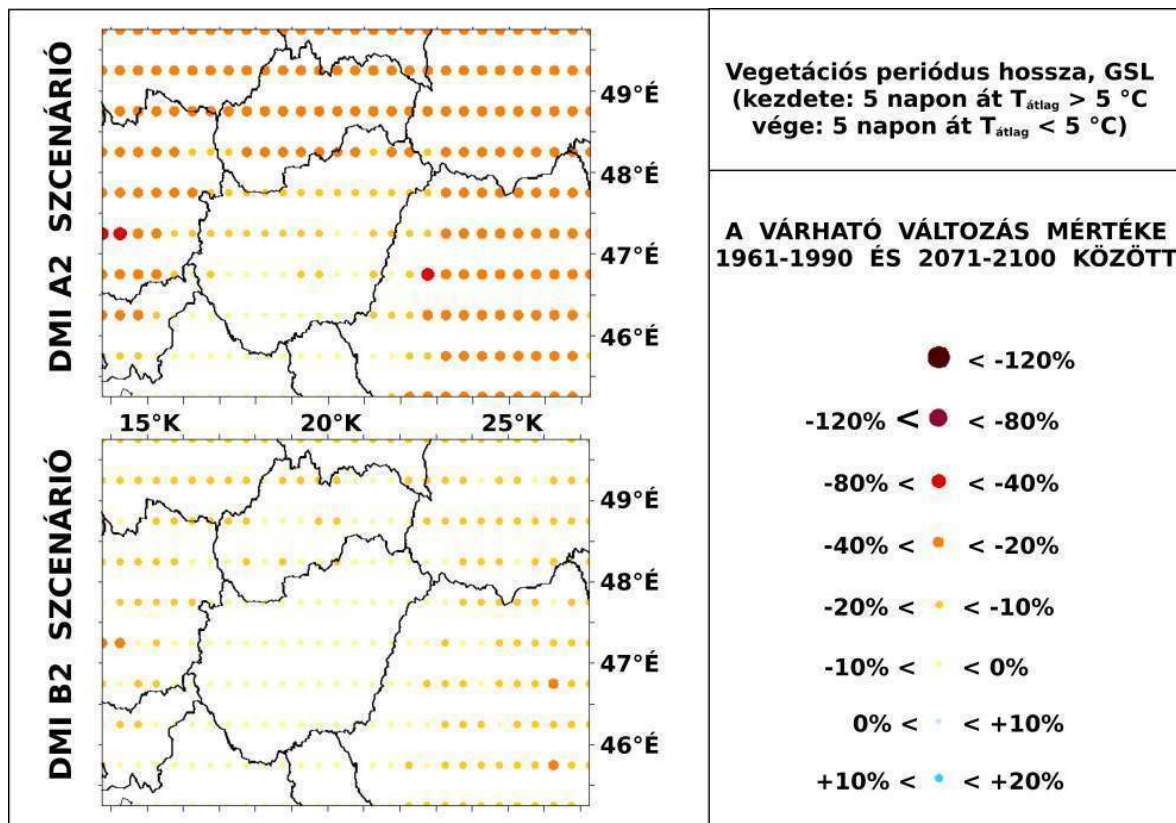
19. ábra: A hőségnapok éves számának (Tx30GE), a túl meleg éjjelek számának (Tn20GT) és a hóhullámok évi maximális számának (HWDI) várható változása 1961-1990 és 2071-2100 között a DMI intézet modelljének A2 illetve B2 forgatókönyvet figyelembe vevő szimulációja alapján

Vizsgáljuk most az extrém magas hőmérsékletekkel kapcsolatos indexeket: a hőségnapok számának (Tx30GE), a túl meleg éjszék számának (Tn20GT) és a hóhullámok maximális számának (HWDI) várható változását a 19. ábrán mutatjuk be a DMI intézet modelljének A2 és B2 scenárióját figyelembe vevő futásai alapján. A túl meleg éjszék száma szinte az egész Kárpát-medencében legalább 120%-kal növekszik, kivétel ez alól az Alföld közepe a B2 scenárió futtatás esetén: itt ugyanis kisebb növekedésre számíthatunk. A hőségnapok száma várhatóan az Alföld közepén növekszik legkisebb mértékben: B2 esetében 40%-80%, míg az A2 esetében 80%-120% közötti értékkel. A Kárpát-medence nagy részén jellemzően 120%-nál nagyobb növekedést jelez a modell.

Az előző két indextől eltérő tendenciát figyelhetünk meg a hóhullámok éves maximális hosszának változását vizsgálva, mely szintén az 19. ábrán látható. Ez az index az 1961-1990-es időszak maximum-hőmérsékleteinek átlagától legalább 5 napon át legalább 5 fokkal magasabb maximum-hőmérsékletű időszakai közül az éves maximumot véve számolható mind a referencia, mind a jövőbeli időszekekre. Az indexbeli növekedés mértéke nyugatról kelet felé csökken (átlagosan 40%-80% a növekedés mértéke). Az A2 esetén erőteljesebb növekedés várható a nyugati területeken, azon belül is az Alpok térségében, mint a B2 scenárió futás esetében, míg Magyarország területén a két scenárió közötti különbség nem túl jelentős. Tehát a magas hőmérsékletek száma várhatóan a hegyekben relatíve erőteljesebben növekszik.

Végezetül nézzük meg egy szintén mezőgazdasági jelentőséggel bíró index, a vegetációs periódus hosszának (GSL) változását. Az 20. ábra alapján elmondhatjuk, hogy Magyarország területén a vegetációs periódus hossza a B2 scenárió esetében várhatóan 10%-nál kisebb mértékben növekszik, míg az A2 esetében 10% és 20% között. A hegyekben ennél kicsivel erőteljesebb növekedésre számíthatunk. A vegetációs periódus az A2 és B2 scenáriókat figyelembe vevő futtatás esetében is délről észak felé erőteljesebben növekszik, tehát a zonalitásból adódó vegetációs periódus hosszának különbsége az északi és déli területek között várhatóan csökken.

A hőmérsékleti indexekben történő változások területi átlagban vett értéke kvantitatívabb képet ad az éghajlatról és változásáról, mint a térképes ábrázolási mód. Az extrém indexek Magyarország területén belül kiválasztott 10 rácspontra történő átlagolása mind az 1961-1990-es, mind a 2071-2100-as időszekekre és a várható változás mértéke a svájci ETH intézet A2 scenárió futása alapján a 7. táblázatban látható (Bartholy et al., 2007c).



20. ábra: A vegetációs periódus hosszának várható változása 1961-1990 és 2071-2100 között a DMI intézet modelljének A2 illetve B2 szcenárióit tekintő szimulációja alapján

7. táblázat: Extrém hőmérsékleti indexek változása a Magyarország területén található 10 rácsponton a svájci ETH intézet A2 szcenárióra futatott modelljének alapján. (Bartholy et al., 2007c)

Index jele	Extrém index neve és definíciója	Kontroll-futás (1961-1990)	A2 szcenárió (2071-2100)	Változás mértéke
SU	Nyári napok száma ($T_{\text{max}} > 25\text{ °C}$)	98 nap/év	136 nap/év	+39%
Tx30GE	Hőségnapok száma ($T_{\text{max}} \geq 30\text{ °C}$)	47 nap/év	90 nap/év	+91%
Tx35GE	Forró napok száma ($T_{\text{max}} \geq 35\text{ °C}$)	13 nap/év	45 nap/év	+250%
Tx0LT	Téli napok száma ($T_{\text{max}} < 0\text{ °C}$)	24 nap/év	6 nap/év	-75%
Tn-10LT	Zord napok száma ($T_{\text{min}} < -10\text{ °C}$)	8 nap/év	1 nap/év	-83%
FD	Fagyos napok száma ($T_{\text{min}} < 0\text{ °C}$)	74 nap/év	26 nap/év	-65%
Tn20GT	Túl meleg éjjelek száma ($T_{\text{min}} > 20\text{ °C}$)	5 nap/év	36 nap/év	+625%
Tx10	Hideg napok száma ($T_{\text{max}} < T_{\text{max},10\%}$)	36 nap/év	10 nap/év	-72%
Tx90	Meleg napok száma ($T_{\text{max}} > T_{\text{max},90\%}$)	36 nap/év	78 nap/év	+116%
Tn10	Hideg éjszakák száma ($T_{\text{min}} < T_{\text{min},10\%}$)	36 nap/év	9 nap/év	-76%
Tn90	Meleg éjszakák száma ($T_{\text{min}} > T_{\text{min},90\%}$)	36 nap/év	79 nap/év	+120%

3.3.2 Csapadék extrémindexek elemzése

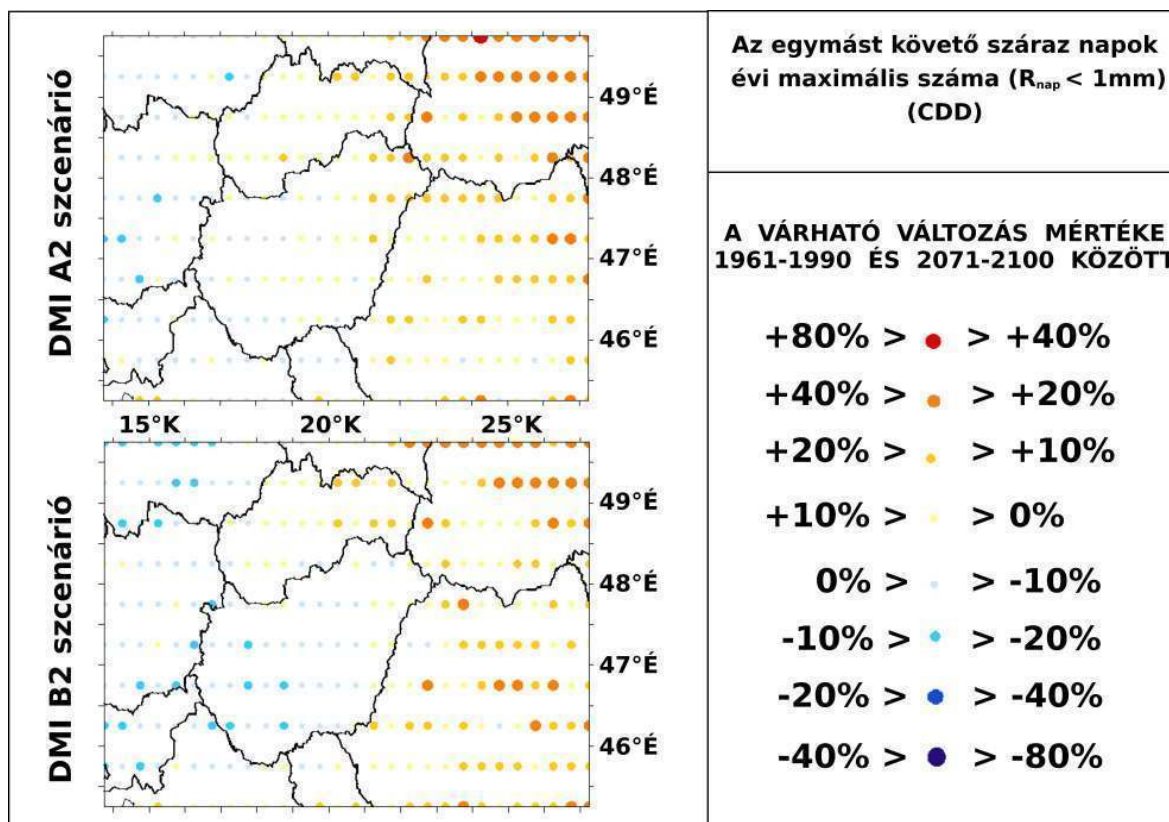
A csapadéokra vonatkozó extrémindexeket a hőmérsékleti indexekhez hasonlóan számoltuk, ám itt a januári és júliusi csapadék indexek elemzésének külön figyelmet szenteltünk, hiszen azok várhatóan eltérő előjellel változnak majd. A számított csapadék extrémindexek jeleit, definícióit, egységeit a 8. táblázatban láthatjuk.

8. táblázat: A csapadék extrémindexek jelei, definíciói, egységei (Bartholy és Pongrácz, 2005 alapján)

Jelölés	A csapadék extrémindexek definíciója	Egység
CDD	Az egymást követő száraz napok maximális száma ($R_{nap} < 1$ mm)	nap
Rx1	Az év során mért legnagyobb 1 nap alatt lehullott csapadékmennyiség	mm
Rx5	Az év során mért legnagyobb 5 nap alatt lehullott csapadékösszeg	mm
SDII	Napi csapadékontenzitás index (teljes csapadékösszeg / összes csapadékos ($R_{nap} \geq 1$ mm) napok száma)	mm/nap
R95T	Nagyon csapadékos napok csapadékösszegének évi aránya az 1961-90-es időszak 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 csapadéku napok száma ($R_{nap} \geq 10$ mm)	nap
RR20	Extrém csapadéku napok száma ($R_{nap} \geq 20$ mm)	nap
R75	Mérsékelten csapadékos napok száma ($R_{nap} > R_{75\%}$, ahol $R_{75\%}$ az 1961-90-es időszak napi csapadékainak felső kvartilise)	nap
R95	Nagyon csapadékos napok száma ($R_{nap} > R_{95\%}$, ahol $R_{95\%}$ az 1961-90-es időszak napi csapadékainak 0.95-ös kvantilise)	nap
RR5	Adott csapadéku napok száma ($R_{nap} \geq 5$ mm)	nap
RR1	Adott csapadéku napok száma ($R_{nap} \geq 1$ mm)	nap
RR0.1	Adott csapadéku napok száma ($R_{nap} \geq 0,1$ mm)	nap

A csapadékot két szempont szerint vizsgáltuk: a lakosságra és vagyona is veszélyes nagy csapadéku napok számának (Rx5 és RR10 indexeket vizsgálva) és főleg a mezőgazdaságot érintő csapadékos/száraz napok számának (RR1 és CDD indexeket vizsgálva) várható változását elemezzük.

A szárazság vizsgálatára legalkalmasabb index az egymást követő száraz napok (amikor a napi csapadék 1mm alatti) évi maximális számát leíró (CDD) index. A DMI intézet modelljének A2 és B2 forgatókönyvet alkalmazó szimulációja alapján vett CDD-indexben 1961-1990 és 2071-2100 között várható változást a 21. ábrán láthatjuk.

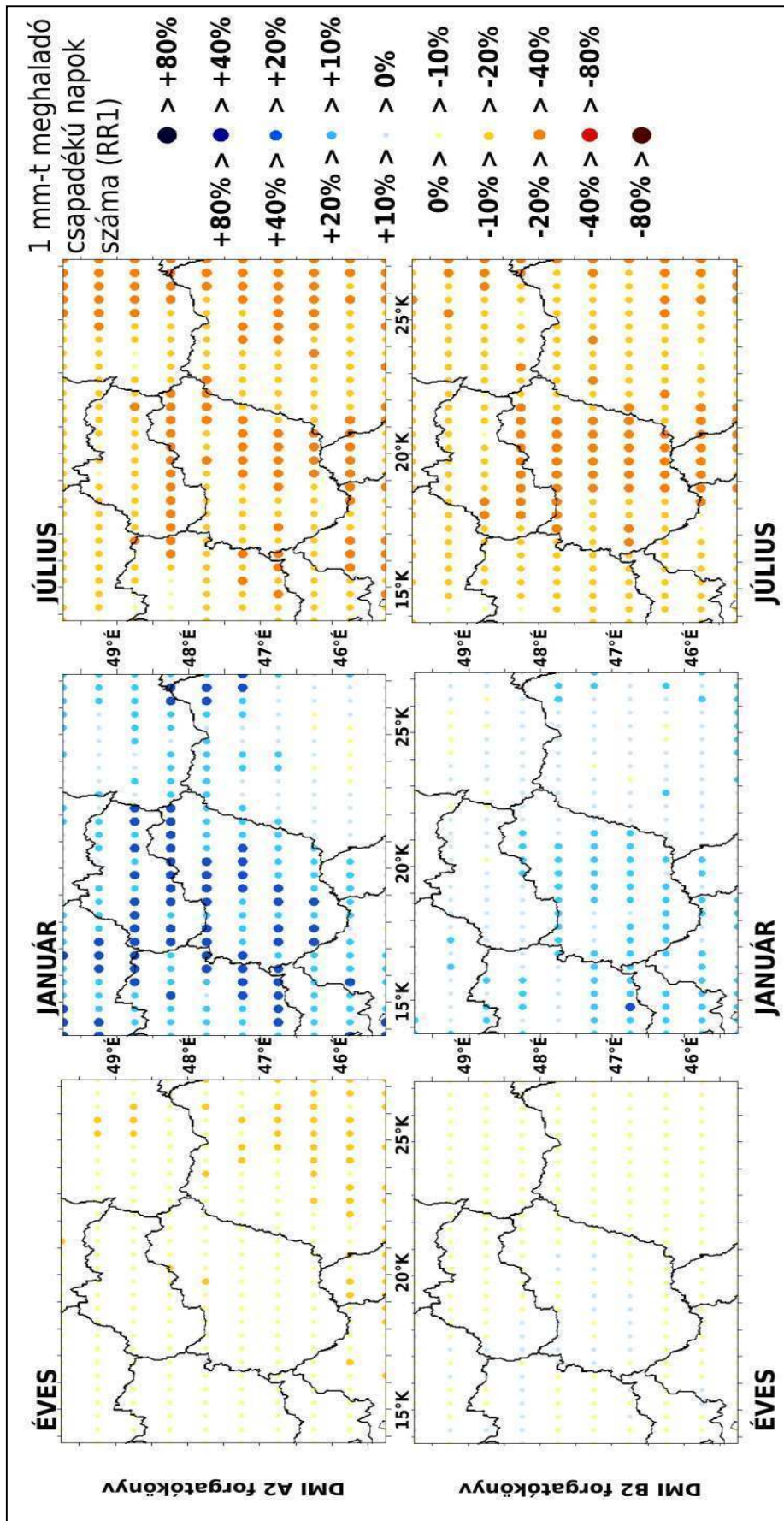


21. ábra: Az egymást követő száraz napok évi maximális hosszának várható változása 1961-1990 és 2071-2100 között a DMI intézet modelljének A2 és B2 forgatókönyvet alkalmazó szimulációja alapján

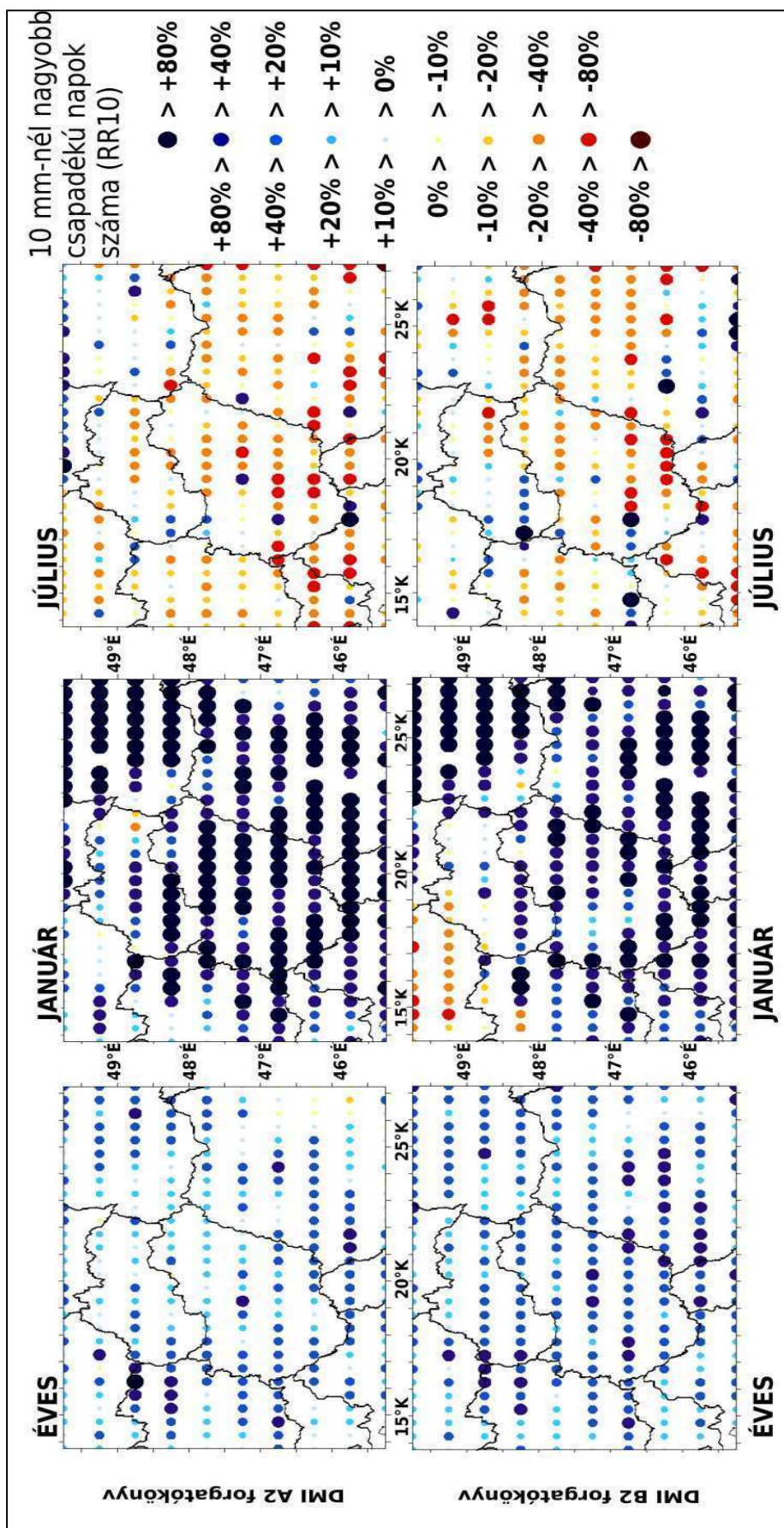
A Kárpát-medence nyugati térségében gyenge csökkenésre számíthatunk (csupán néhány helyen éri el a 10%-os értéket), míg a keleti felében (több helyen 20% feletti értékkel) várhatóan növekszenek a száraz periódusok maximális hosszai.

Vizsgáljuk most a csapadékos napokat: a DMI intézet A2 és B2 forgatókönyvet tekintő szimulációi alapján az 1 mm-nél nagyobb, gyakorlatilag a csapadékos napokat jelentő napok (RR1) és a 10 mm-nél nagyobb, azaz a nagy csapadéku napok (RR10) éves, januári és júliusi számának változását rendre a 22. ábrán, illetve a 23. ábrán figyelhetjük meg. Általánosságban kijelenthetjük, hogy a nagy csapadéku napok száma éves szinten várhatóan növekszik, míg a csapadékos napok száma várhatóan enyhén csökken a Kárpát-medencében.

Az A2 scenárió esetén az RR1-index 10%-ot éppen elérő mértékben, várhatóan csökken, míg a B2 esetén ez az érték nem mindenhol negatív, és inkább 0%-hoz közeli. A csapadékos napok száma januárban az éves szintnél erőteljesebb mértékben fog növekedni: A2 esetén 10%-40% között, B2 esetén pedig 10%-20% között. Júliusban az RR1-index az éves változáshoz képest várhatóan még jobban csökken, melynek maximuma várhatóan a Kárpát-medence közepén jelentkezik (20%-40%) mindkét scenárió esetében.



22. ábra: Az 1 mm-t meghaladó csapadékú napok éves, januári és júliusi számának várható változása 1961-1990 és 2071-2100 között a DMI intézet modelljének A2 illetve B2 forgatókönyvet tekintő szimulációja alapján

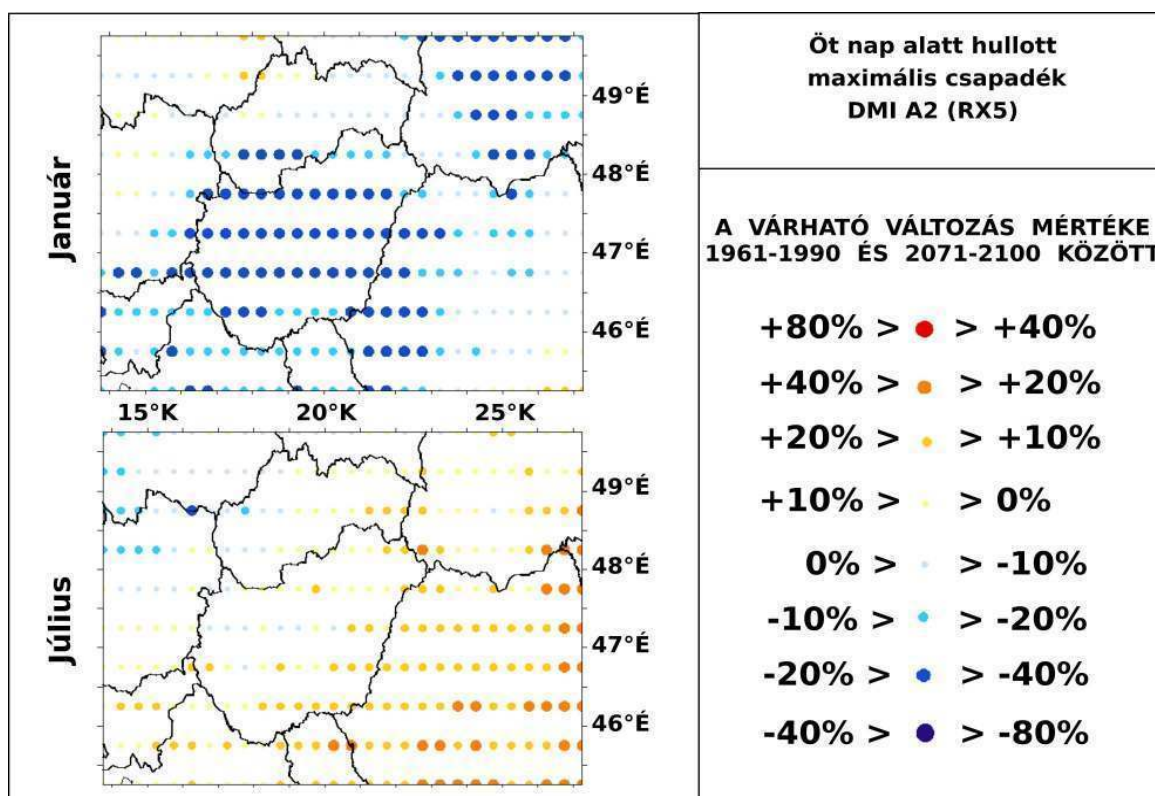


23. ábra: A 10 mm-t meghaladó csapadékú napok éves, januári és júliusi számának várható változása 1961-1990 és 2071-2100 között a DMI intézet modelljének A2 és B2 forgatókönyvű szimulációja alapján

A nagy csapadékú napokat vizsgálva elmondhatjuk, hogy azok éves és januári száma várhatóan növekedni fog mindkét scenárió esetén: éves szinten átlagosan az A2 esetén 20%-hoz, B2 esetén 40%-hoz közeli mértékben. A januári nagy csapadékú napok száma a legtöbb helyen legalább 80%-kal növekszik, ám a B2 scenárió esetében az északnyugati területeken (Csehországban) csökkenő tendenciára számíthatunk. A nagy csapadékok júliusi száma nem mutat ilyen egységes képet: a csökkenő tendenciára utaló értékek többsége mellett találhatunk pozitív értékeket is. Talán ez a fokozódó konvektivitásból adódó területi változékonyságnak tudható be.

Végezetül vizsgáljunk meg egy csapadékösszegre vonatkozó indexet: a januárban és júliusban mért legnagyobb öt nap alatt hullott csapadék (RX5) változását a DMI intézet modelljének A2 scenáriós futására a 24. ábrán láthatjuk. Az RX5-index a többi, nagy csapadékot jellemző indexhez hasonló tendenciát mutat: várhatóan január esetében növekedni, júliusban pedig csökkenni fog. A maximális relatív növekedésre januárban Magyarország középső részén, míg a maximális csökkenésre júliusban a délkeleti területeken számíthatunk.

Összefoglalásként elmondhatjuk, hogy a január és a július csapadékában várhatóan nem lesz akkora eltérés, mint jelenleg: a modellszimulációk alapján a januári, főleg nagy csapadékok növekedni, míg a júliusi csapadékok csökkenni fognak.



24. ábra: A januárban és júliusban mért legnagyobb 5 nap alatt lehullott csapadékösszeg várható változása 1961-1990 és 2071-2100 között a DMI intézet modelljének A2 scenáriót alkalmazó szimulációja alapján

4. Összefoglalás

Jelen dolgozatban az Európai Unió V. keretprogramja által 2001 és 2004 között támogatott PRUDENCE projekt eredményeit dolgoztuk fel. Az előállított eredmények elsősorban az A2 kibocsátási forgatókönyvre vonatkoznak, de egyes intézetek készítettek B2-re vonatkozó szimulációkat is. Az alkalmazott regionális éghajlati modellek horizontális felbontása mintegy 50 km-es volt. Először a havi adatmezők felhasználásával a modellszimulációk hibáit értékeltük az 1961-1990 közötti referencia időszakban, majd kompozittérképek készítésével a napi közép-, minimum- és maximumhőmérséklet, valamint a havi csapadék 2071-2100-ra várható változását elemeztük a Kárpát-medence térségében. Végül a napi adatsorok felhasználásával a szélsőséges éghajlati események gyakoriságának és intenzitásának várható változását vizsgáltuk extrém éghajlati indexek felhasználásával.

I. A dolgozatban bemutatott eredményeink alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le a hőmérséklettel kapcsolatban:

- Az 1961-1990 közötti időszak szimulációi alapján a modellek éves átlagban felülbecslik a hőmérsékletet a Kárpát-medence középső térségében, mely nyár közepén a legnagyobb mértékű (a hiba eléri a 3 °C-ot), a környező hegyekben viszont tél közepén kaptuk a legnagyobb mértékű felülbecslést (mintegy 2 °C-ot). Az átmeneti évszakokban, főleg áprilisban és októberben a modellek átlagosan 1-2 °C-kal alábecslik a hőmérsékletet.
- A Kárpát-medencében a globális átlagnál várhatóan nagyobb mértékben növekszik a közép-, a maximum- és a minimumhőmérséklet is. A XXI. század végére várhatóan a középhőmérséklet növekszik a legnagyobb mértékben és a minimumhőmérséklet a legkisebb mértékben mind az A2, mind a B2 scenárió esetén.
- A hőmérsékletemelkedés éves menetében az A2 esetében két lokális maximum van (januárban és augusztusban), míg a B2 esetében inkább csak augusztusban.
- A 2071-2100-ra várható átlagos havi hőmérsékletnövekedést bemutató kompozittérképek alapján nyáron zonális jellegű, azaz északról dél felé erősödő melegedés, míg télen kontinentális, azaz nyugatról kelet felé növekvő melegedés várható, főként az A2 scenárió esetén. A B2 scenárió esetén a domborzat hatása várhatóan erőteljesebben jelentkezik. Mindkét scenárió esetén az őszi hónapokban számíthatunk a legkisebb területi változékonyságra.

- A hőmérsékleti extrémindexek mindegyike egyöntetűen (az A2 esetén erőteljesebben) melegedő éghajlatra utaló változást mutat 2071-2100-ra.
- A negatív hőmérsékleti szélsőségre utaló extrémindexek értékei várhatóan az alacsonyabban fekvő területeken növekednek erőteljesebben. Az extrém alacsony hőmérsékletek, különösen a zord napok száma Magyarország egész területén várhatóan 80% és 120% között csökken.
- A magas hőmérsékleteket vizsgáló indexek (pl.: forró napok száma, hóhullámok száma, túl meleg éjjelek száma) várhatóan a hegyekben relatíve erőteljesebben növekednek az 1961-1990 közötti referencia időszakhoz viszonyítva, mint a sík területeken.
- A vegetációs periódus hossza az A2 és a B2 scenárió esetén egyaránt délről észak felé várhatóan erőteljesebben növekszik a XXI. század végére.

II. A csapadékkal kapcsolatban bemutatott elemzések alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- A nyári csapadékot a modellek átlagosan 0-40%-kal alábecslik, míg a többi évszakban jobbra kettősség jellemző: délnyugaton alábecslés, északkeleten felülbecslés figyelhető meg - mely Magyarországot tekintve elsősorban márciusban és októberben tapasztalható.
- Ami a 2071-2100-ra várható csapadékváltozást illeti, januártól márciusig mind az A2, mind a B2 esetén az összes regionális éghajlati szimuláció pozitív változást jelez hazánk területére, míg nyáron, különösen júliusban, szinte mind csökkenő csapadékösszeget vár. A modellszimulációk által becsült csapadékváltozás mértéke leginkább februárban és augusztusban szóródik, míg legkevésbé áprilisban és októberben.
- A téli és a nyári félévben is az A2 scenárió esetén számíthatunk nagyobb mértékű változásra. Az A2 scenárió esetén télen (decembertől márciusig) számíthatunk egyértelmű növekedésre, míg nyáron (májustól szeptemberig) csapadékcsökkenés várható. A B2 scenárió tekintő modellszimulációk alapján októberben, valamint decembertől ápriliséig csapadéknövekedésre számíthatunk, míg novemberben, továbbá júniustól szeptemberig csapadékcsökkenés várható.
- A csapadékos napok évi száma mindkét scenárió esetén várhatóan kis mértékben csökken, ám a B2 esetében egyes térségekben gyenge növekedés is előfordulhat.

Júliusban egyöntetűen nagy mértékű csökkenésre számíthatunk, míg januárban ellentétes előjelű változás várható, azaz a csapadékos napok számának növekedését jelzik előre a modellek.

- Az A2 és a B2 scenáriót tekintő modellszimulációk alapján egyaránt elmondhatjuk, hogy a téli (januári) extrém nagy csapadékesemények száma várhatóan növekedni fog, a legtöbb helyen 80%-ot is meghaladó mértékben. Míg a nyári (júliusi) extrém csapadékok várhatóan csökkenni fognak.
- Az egymást követő száraz napok évi maximális hossza várhatóan a Kárpát-medence keleti felében csökkenni fog a XXI. század végére, míg a nyugati területeken gyengén növekedni.

5. Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat támogatta az Magyar Tudományos Akadémia Támogatott Kutatóhelyek Irodája *Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz* című, 2006/TKI/246 számú programja, az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA) T-049824, K-67626 és K-69164 számú pályázata, a Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program (NKFP) 3A/0082/2004 és 6/079/2005 pályázata. További segítséget nyújtott a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, s az EU VI. keretprogram által finanszírozott CECILIA projekt (GOCE-037005).

A regionális éghajlatváltozási modellszimulációk adatbázisát az EU EVK2-CT2001-00132 számú szerződésében támogatott PRUDENCE projekt keretében állították elő. A hibamezők előállításához felhasznált CRU TS 2.1 adatbázist T. D. Mitchell és munkatársai állították össze.

Köszönet illeti dr. Bartholy Juditot, dr. Pongrácz Ritát és Gelybó Gyögyit is, akikkel az ELTE Meteorológiai Tanszékén közösen végeztem kutatásaimat. Személyes köszönet illeti dr. Pongrácz Ritát, akivel éjszakákba nyúlóan próbáltuk tökéletesíteni a dolgozatot.

Irodalomjegyzék:

- Anthes, R. A., Hsie, E.-Y., Kuo, Y.-H., 1987: Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4). NCAR Technical Note - 282. NCAR, Boulder, CO 80307.
- Bartholy J., Pongrácz R., 2005: Néhány extrém éghajlati paraméter globális és a Kárpát-medencére számított tendenciája a XX. században. *AGRO-21 Füzetek* 40: 70-93.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., 2007: Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. *Global and Planetary Change* 57: 83-95. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.002
- 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.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy., 2007a: Regional climate change expected in Hungary for 2071-2100. *Applied Ecology and Environmental Research* 5: 1-17.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., 2007b: A 21. század végén várható regionális éghajlatváltozás Magyarországon. *Földrajzi Értesítő* LVI: 147-168.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy., Szabó, P., 2007c: A hőmérsékleti extrémumok várható alakulása a Kárpát-medence térségében a XXI. század végén. *Klíma-21* 51: 3-17.
- Bartholy J., Pongracz R., Torma Cs., Pieczka I., Kardos P., Hunyady A., 2008: Comparison of regional climate models in the Carpathian basin using control run experiments. *Geophysical Research Abstracts* 10: 09289. CD-ROM. EGU General Assembly 2008.
- Bougeault P., 1985: A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection, *Mon. Wea. Rev.* 113: 2108-2121.
- Castro, M., Fernández, C., Gaertner, M. A., 1993: Description of a mesoscale atmospheric numerical model. (szerk.: Díaz J. I., Lions J. L.) *Mathematics, Climate and Environment*. Rech. Math. Appl. Ser. Mason, 230--253.
- Christensen, J. H., 2005: Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects. Final Report. DMI, Copenhagen. 269p.
- Christensen, J. H., Christensen, O.B., Lopez, P., Van Meijgaard, E., Botzet, M., 1996: The HIRHAM4 Regional Atmospheric Climate Model. Scientific Report 96-4, DMI, Copenhagen. 51p.
- Christensen, J. H., Carter, T. R., Rummukainen, M., Amanatidis, G., 2007: Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change* 81: 1-6.

- Davies, H.C., 1976: A lateral boundary formulation for multi-level prediction models, *Quart. J. R. Meteor. Soc.* 102: 405-418.
- Déqué M., Marquet P., Jones R.G., 1998: Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation mode. *Climate Dyn.* 14: 173-189.
- Döscher, R., Willén, U., Jones, C., Rutgersson, A., Meier, H. E. M., Hansson, U. and Graham, L. P., 2002: The development of the coupled regional ocean-atmosphere model RCAO. *Boreal Env. Res.* 7: 183-192.
- Ducoudré, N., Kaval, K., Perrier, A., 1993: SECHIBA, a new set of parameterizations of the hydrologic exchanges at the land-atmosphere interface within the LMD atmospheric general circulation model. *J. Climate*, 6: 248-273.
- Garand, L., 1983: Some improvements and complements to the infrared emissivity algorithm including a parameterization of the absorption in the continuum region. *J. Atmos. Sci.* 40: 230-244.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate* 3: 941-963.
- Giorgi, F., Marinucci M.R., Bates G.T., 1993a: Development of a second generation regional climate model (REGCM2). Part I: Boundary layer and radiative transfer processes. *Monthly Weather Review* 121: 2794-2813.
- Giorgi, F., Marinucci M.R., Bates G.T., DeCanio G., 1993b: Development of a second generation regional climate model (REGCM2). Part II: Cumulus cloud and assimilation of lateral boundary conditions. *Monthly Weather Review* 121: 2814-2832.
- Giorgi, F., Huang, Y., Nishizawa, K., Fu, C., 1999: A seasonal cycle simulation over eastern Asia and its sensitivity to radiative transfer and surface processes. *Journal of Geophysical Research* 104: 6403-6423.
- Gregory, J.M., 1999: Representation of the radiative effect of convective anvils. Hadley Centre Technical Note, 9, Hadley Centre, The Met. Office.
- Hagemann, S., Botzet, M., Machenhauer, B., 2001: The summer drying problem over south-eastern Europe: Sensitivity of the limited area model HIRHAM4 to improvements in physical parameterization and resolution. *Phys. Chem. Earth (B)* 26: 391-396.
- Hankin, S., Callahan, J., Manke, A., O'Brien, K., Li, J., 2007: FERRET User's Guide Version 6.02. NOAA PMEL, Seattle, Washington, p. 592.
- Hibler, W. D., 1979: A dynamic thermodynamic sea ice model. *J. Phys. Oceanogr.* 9: 817-846.
- 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, 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 (szerk.: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L.). Cambridge University Press, Cambridge, UK - New York, NY. 996p.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (szerk.: Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C. A.). Cambridge University Press, Cambridge, UK - New York, NY. 881p.
- Jacob, D., 2001: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics* 77: 61-73.
- Jones, C. G., Willén, U., Ullerstig, A. and Hansson, U., 2004: The Rossby Centre Regional Atmospheric Climate Model Part I: Model Climatology and Performance for the Present Climate over Europe. *Ambio* 33 4-5:199-210.
- Jones, P. D. and Moberg, A., 2003: Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An Extensive Revision and an Update to 2001. *J Clim* 16: 206–223
- Jones, R., Murphy, J., Hassell, D., Taylor, R., 2001: Ensemble mean changes in simulation of the European climate of 2071-2100 using the new Hadley Centre regional modelling system HadAM3H/HadRM3H. Research Report, UK Met Office Hadley Centre. Bracknell, UK. 19p.
- Jones, R.G., Murphy, J.M., Noguer, M., 1995: Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 121: 1413-1449.
- Kain, J. S., Fritsch, J. M., 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models. *Meteor. Monogr.* 46: *Amer. Meteor. Soc.* 165-170.
- 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.
- Kiehl, J. T., Hack, J., Bonan, G. B., Boville, B. A., Briegleb, B. P., Williamson, D. L., Rasch, P. J., 1996: Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). NCAR Tech. Note, NCAR TN-420+STR. Nat. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo., U.S.A.
- Lenderink, G., Hurk, B. van den, Meijgaard, E. van, Ulden, A. van, Cuijpers, H., 2003: Simulation of present-day climate in RACMO2: first results and model development. KMNI, Technical Report TR-252
- Lin Y.-L., Farley, R.D., Orville, H.D., 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, *J. Clim. Appl. Meteorol.* 22: 1065-1095.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. and Bergström, S., 1997: Development and test of the distributed HBV-96 model. *J. Hydr.* 201: 272-288.

- Louis, J.F., 1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Bound.-Layer Meteor.* 17,187-202.
- Majewski, D., and Schrodin, R., 1994: Short description of the Europa-Modell (EM) and Deutschland-Modell (DM) of the DWD. *Quarterly Bulletin* (April).
- Majewski, D., 1991: The Europa Modell of the Deutscher Wetterdienst. Proc. ECMWF Seminar on Numerical Methods in Atmospheric Models, 1991, Reading UK, VOL II., 147-191.
- Manabe, S., and K. Bryan, 1969: Climate calculations with a combined ocean-atmosphere model. *Journal of the Atmospheric Sciences* 26(4): 786-789.
- Meier, H. E. M., Döscher, R., Faxén, T., 2003: A multiprocessor coupled ice-ocean model for the Baltic Sea: Application to salt inflow. *J. Geophys. Res.* 108:C8, 3273, doi:10.1029/2000JC000521.
- Mitchell, T. D., Carter, T. R., Jones, P. D., Hulme, M., New, M., 2003: A comprehensive set of climate scenarios for Europe and the globe. Tyndall Centre Working Paper 55.
- Morcrette, J.J., 1990: Impact of changes to the radiation transfer parameterizations plus cloud optical properties in the ECMWF model, *Mon. Wea. Rev.* 118: 847-873.
- New, M., Lister, D., Hulme, M., Makin, I., 2002: A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research* 21: 1–25
- New, M., Hulme, M., Jones, P.D., 2000: Representing twentieth century space-time climate variability. Part 2: development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate* 13, 2217-2238
- New, M., Hulme, M., Jones P., 1999: Representing twentieth-century space-time climate variability. Part 1: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *J. Climate* 12: 829-856.
- Omstedt, A. 1999. Forecasting ice on lakes, estuaries and shelf seas. In J. S. Wettlaufer, J. G. Dash and N. Untersteiner (eds), *Ice Physics in the Natural and Endangered Environment*, NATO ASI Vol I 56, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 185-208.
- Pal, J.S., Small, E.E. and Eltahir, E.A.B., 2000: Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *Journal of Geophysical Research* 105: 29579-29594.
- Ricard J.L., and J.F. Royer, 1993: A statistical cloud scheme for use in an AGCM, *Ann. Geophysicae* 11: 1095-1115.
- Ritter, B., and Geleyn, J.-F., 1992: A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations, *Mon. Wea. Rev.* 120: 303-325.
- Rodi, W., 1980: Turbulence models and their application in hydraulics - a state-of-the-art review. *Int. Assoc. for Hydraul. Res.*, Delft, Netherlands, 104 p.

- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U., Schulzweida, U., 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate, Report No. 218, 90 p., Max-Planck-Institut für Meteorologie, MPI, Hamburg.
- Rummukainen, M., Räisänen, J., Bringfelt, B., Ullerstig, A., Omstedt, A., Willén, U., Hansson, U., Jones, C., 2001: A regional climate model for northern Europe: model description and results from the downscaling of two GCM control simulations. *Clim. Dyn.* 17: 339-359.
- Stappeler, J., Doms, G., Schättler, U., Bitzer, H. W., Gassmann, A., Damrath, U., Gregoric, G., 2003: Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM. *Meteorol. Atm. Phys.* 82: 75-96.
- Stevens, D. P., 1990: On open boundary conditions for three dimensional primitive equation ocean circulation models. *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics* 51: 103-133.
- Szepszo, G., 2008: Validation of the REMO regional climate model for the past climate over the Carpathian Basin. EGU2008-A-06384. *Geophysical Research Abstracts* 10: 06384. CD-ROM. EGU General Assembly 2008.
- Tiedtke, M., 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1779-1800.
- Uppala, S. M.; Kallberg, P. W.; Simmons, A. J.; Andrae, U.; Bechtold, V. D.; Fiorino, M.; Gibson, J. K.; Haseler, J.; Hernandez, A.; Kelly, G. A.; Li, X.; Onogi, K.; Saarinen, S.; Sokka, N.; Allan, R. P.; Andersson, E.; Arpe, K.; Balmaseda, M. A.; Beljaars, A. C. M.; Van De Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Cairns, S.; Chevallier, F.; Dethof, A.; Dragosavac, M.; Fisher, M.; Fuentes, M.; Hagemann, S.; Holm, E.; Hoskins, B. J.; Isaksen, I.; Janssen, P. A. E. M.; Jenne, R.; McNally, A. P.; Mahfouf, J. F.; Morcrette, J. J.; Rayner, N. A.; Saunders, R. W.; Simon, P.; Sterl, A.; Trenberth, K. E.; Untch, A.; Vasiljevic, D.; Viterbo, P.; Woollen, J., 2005: The ERA-40 reanalysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 131: 2961-3012.
- Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Seneviratne, S., Schär, C., 2003: Predictability and uncertainty in a regional climate model. *J. Geophys. Res.* 108(D18): 4586, doi: 10.1029/2002JD002810
- Webb, D. J., Coward, A.C., de Cuevas, B.A. and Gwilliam, C. S., 1997: A multiprocessor ocean circulation model using message passing. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 14: 175-183.