

Csapadékindexek XXI. századra becsült trendjei Közép-Kelet-Európában korrigált csapadékmezők felhasználásával

OTDK dolgozat



Készítette: Kis Anna

II. éves Meteorológus MSc hallgató, éghajlatkutató szakirány

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Témavezető: Dr. Pongrácz Rita

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Földrajz- és Földtudományi Intézet

Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2013.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. A regionális klímaváltozást vizsgáló fő európai projektek	6
3. Adatok és módszerek bemutatása	9
3.1. Az elemzésekhez használt regionális klímamodellek	9
3.2. Az E-OBS adatbázis	11
3.3. A hibakorrekción	12
3.4. A vizsgált csapadékindexek bemutatása.....	14
4. Az eredmények elemzése	15
4.1. A 10 mm-nél nagyobb csapadékú napok számának várható változása	15
4.2. A 20 mm-nél nagyobb csapadékú napok számának várható változása	18
4.3. Az egy nap alatt lehullott maximális csapadékmennyiség várható változása	21
4.4. Az öt nap alatt lehullott maximális csapadékmennyiség várható változása	24
4.5. A csapadékkintenzitás várható változása	26
5. Összefoglalás.....	30
Köszönetnyilvánítás	31
Irodalomjegyzék.....	32

1. Bevezetés

Az időjárás meghatározza hétköznapijainkat, az éghajlat viszont hosszabb távon befolyásolja életünket, ezért fontos, hogy rövid- és hosszútávra egyaránt készítsünk előrejelzéseket. Az éghajlat egy rendkívül összetett rendszer, hiszen számos alrendszer (atmoszféra, hidroszféra, litoszféra, bioszféra, krioszféra) kölcsönhatásainak eredményeképpen jön létre. Ma már tudjuk, hogy a XX. század közepe óta, korábban nem tapasztalt gyorsasággal növekszik Földünk átlaghőmérséklete, amelyért nagyrészt az antropogén hatások okolhatók. Az ipari forradalom kezdetétől jelentősen növekedett a szén-dioxid kibocsátás az emberi tevékenységnek köszönhetően, ez által pedig fokozódott az üvegházhatás. Tudjuk, hogy a földtörténet során előfordultak már magas CO₂ koncentráció értékek, ám jelenleg olyan gyors ütemben szennyezzük vele a levegőt, hogy a szén-dioxid természetes nyelői (pl. óceán, bioszféra) nem képesek ilyen iramban ellensúlyozni tevékenységünket (Horváth, 2011). Tapasztalhatjuk azonban, hogy a klímaváltozás nem csupán az üvegházhatás fokozódásával és magasabb hőmérsékleti értékekkel jár; napjainkban például egyre gyakoribbá válnak a szélsőséges időjárási események is (heves záporok, zivatarok, tartós aszályok és hőhullámok). Ezek az extrém viszonyok pedig számos természeti-, környezeti-, gazdasági- és egészségügyi kárt okozhatnak, ezért fontos, hogy minél pontosabb becsléseket készítsünk a jövőben várható trendekre vonatkozóan. A múltbeli és a jövőben várható éghajlatváltozással és ezek következményeivel részletesen foglalkoznak a nemzetközi kutatókat tömörítő Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC¹) rendszeresen megjelentetett helyzetértékelő jelentései (IPCC 2007a, 2001, 1995, 1990).

A csapadék kulcsfontosságú meteorológiai elem, hiszen például a talaj – és ezáltal a növényzet – vízellátottságának meghatározásával jelentős hatást gyakorol a mezőgazdasági termelésre. Az éghajlatváltozás következtében hazánkban az utóbbi években jelentősen módosult a csapadék eloszlása. Magyarországon az éves csapadékösszeg 2010-ben 169%-kal haladta meg az 1971–2000-es normálidőszak átlagát, míg 2011-ben (ez év novembere az elmúlt 111 év legszárazabb novembere volt) 72%-kal a 30 éves referencia időszak átlaga alatt maradt (Móring, 2011, 2012). Magyarországon, 2010-ben a májusi és júniusi rendkívüli esőzések következtében hatalmas árvíz pusztított, elsősorban a Bódva, a Hernád és a Sajó környéki területeken, amely több milliárd forintos károkat okozott. Az idei év (2012) eddig szintén szárazabbnak bizonyult a sokévi átlagnál, amely a mezőgazdaságban okozott jelentős

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch/>

károkat, és közvetve a gazdaságban is, a dráguló élelmiszerek által (http://index.hu/gazdasag/magyar/2012/08/29/aszaly_megoldas/). A fenti példák hangsúlyozzák a jövőben várható trendek pontos becslésének fontosságát. Így ha megelőzni nem is tudjuk, de a megfelelő intézkedésekkel lehetővé válik a potenciális károk mérséklése.

A csapadékindexek vizsgálatába három éve kapcsolódtam be. BSc szakdolgozatom (Kis, 2011) keretében három regionális klímamodell (RCM; ALADIN, RegCM, PROMES) hibakorrigált szimulációt elemeztem a Kárpát-medence térségére. A 2012-ben megrendezett OFKD során egy jelentősen bővített adatbázissal dolgoztam: 11 RCM outputját töltöttem le, majd a korábbi dolgozatommal ellentétben – amelyben a letöltött adatokon már elvégeztek egy hibakorrekciót – most a Formayer és Haas (2009) által leírt hibakorrekciós eljárást én végeztem el, és öt csapadékindex (CDD, RR1, RR10, RX1, SDII) várható trendjeit vizsgáltam (Kis, 2012). Jelen dolgozatban szintén a korábban általam már hibakorrigált 11 regionális modellszimulációval dolgoztam, ám most a vizsgált területet bővítettem jelentősen (1. ábra): már nem kizárólag Magyarországra koncentráltam, hanem a környező térségeket is bevontam az elemzésbe. Ez a térség (é. sz. 43,625–50,625; k. h. 13,875–26,375) Európa északi és déli részét elválasztó tengely mentén fekszik. A jövőben Észak-Európában várhatóan több, Dél-Európában pedig kevesebb csapadékra számíthatunk. Kontinensünkön tehát feltehetően két igen eltérő éghajlat válik majd uralkodóvá, éppen ezért az általam vizsgált régióban várható változások bizonytalanok. A teljes vizsgált területet kilenc országra/régióra (Kelet–Ausztia, Délkelet–Csehország, Horvátország, Magyarország, Románia, Szerbia, Szlovákia, Szlovénia, Délnyugat–Ukrajna) bontottam és kilenc indexet (CDD, DD, RR1, RR5, RR10, RR20, RX1, RX5, SDII) vizsgáltam, amelyekből a következőkben a nagy csapadékú napokra és a csapadékinzintázásra vonatkozó eredményeket mutatom be. A korábbi dolgozataimmal ellentétben a térképeket a meghajtó globális klímamodellek (GCM) szerinti súlyozással készítettem el, hogy kiküszöböljem az egyes GCM-ek hatásainak egyenetlen megoszlását.



1. ábra. A korábbiakban (terület1) vizsgált és a jelenlegi, kibővített (terület2) terület

A dolgozat következő fejezeteiben először a regionális klímaváltozást vizsgáló fő európai projekteket, majd a felhasznált adatokat és módszereket ismertetjük. A 3. fejezet alfejezeteiben mutatjuk be az elemzésekhez alkalmazott regionális klímamodelleket és a referencia adatbázist, az általunk elvégzett hibakorrekciós eljárást, valamint a vizsgálatban szereplő csapadékkal kapcsolatos éghajlati indexek definícióját. Ezután az elvégzett elemzések eredményeit mutatjuk be táblázatok, térképek és diagramok segítségével. Az utolsó fejezetben összefoglaljuk a vizsgálat alapján levonható legfontosabb következtetéseket.

2. A regionális klímaváltozást vizsgáló fő európai projektek

Az antropogén tevékenység következtében – az ipari forradalom kezdete óta – jelentősen megnövekedett az üvegházhatású gázok koncentrációja (IPCC, 2007b). Ez a koncentráció-növekedés nem csak globális, de regionális skálán is jelentős hatást gyakorol az éghajlatra. Az ENSEMBLES projekt (van der Linden és Mitchell, 2009) célja az európai régióban várható klímaváltozás vizsgálata volt, amelyhez a legújabb klímamodelleket és elemzési eljárásokat használták fel. Az Európai Unió által finanszírozott kutatás 2004 szeptemberétől 2009 decemberéig tartott a Brit Meteorológiai Szolgálat vezetésével. A kutatásban 20 ország 66 intézete vett részt, legfőképp Európából, de az egész világról (pl. USA, Japán, Ausztrália) csatlakoztak támogató partnerek. A vizsgálatokat a résztvevőkön kívül további 30 (főként európai) szervezet munkatársai végezték. Az ENSEMBLES számos korábbi Európai Unió által támogatott hasonló témakörű projekt tapasztalatait felhasználta (1. táblázat). Elsőként a PRUDENCE projekt (Christensen et al., 2007) értékelte regionális scenáriók összeállításával a klímaváltozással járó regionális hatásokat és kockázatokat Európára nézve. Ezt kiegészítve a STARDEX projekt (Goodess, 2005) az extrém időjárási események gyakoriságának és intenzitásának változásait vizsgálta a XXI. század végére vonatkozóan. A MICE projekt (Hanson et al., 2007) szintén a hőmérséklet, a csapadék, valamint a szél extrémumaira fókuszált, azonban ezeknek a gazdasági szektorra vonatkozó várható hatásait helyezte előtérbe. A CECILIA (Halenka, 2008) és a CLAVIER (Jacob et al., 2008) projekt ugyancsak vizsgálta az extrém időjárási eseményeket, a levegőminőséget, valamint a hidrológiai következményeket, ám a vizsgálatok során egy kisebb területet emeltek ki, s a Közép– Kelet–Európai térségre koncentráltak. A két projekt között az alkalmazott regionális modellekben volt lényegi eltérés. A CECILIA az ALADIN (Gibelin és Déqué, 2003) és a RegCM (Giorgi és Bi, 2000) modellt, a CLAVIER pedig a REMO-t (Jacob és Podzun, 1997) alkalmazta. Az ENSEMBLES projekt újszerűségét elsősorban a folyamatos, finom (25 km-es) térbeli felbontású, egész Európára kiterjedő, több évtizedet felölelő klímaszimulációk előállítása, kutatási célokra történő rendelkezésre bocsátása jelenti (van der Linden és Mitchell, 2009).

1. táblázat. Korábbi EU projektek vezetői és futamidei

<i>A projekt rövid neve</i>	<i>Vezető intézet</i>	<i>Vezető kutató</i>	<i>Futamidő</i>
PRUDENCE ²	DMI ³	J. H. Christensen	2001.11.–2004.10.
STARDEX ⁴	CRU ⁵	C. Goodess	2001.02.–2004.05.
MICE ⁶	CRU	C. E. Hanson	2002.01.–2005.01.
DEMETER ⁷	ECMWF ⁸	T. N. Palmer	2000.04.–2003.09.
CECILIA ⁹	Prágai Károly Egyetem	T. Halenka	2006.06.–2009.11.
CLAVIER ¹⁰	MPI ¹¹	D. Jacob	2006.09.–2009.09.

Az utóbbi időben, hazánkban és a Föld számos térségében egyre gyakoribbá váltak a szélsőséges időjárási események (Bartholy és Pongrácz, 2007), amelyek komoly környezeti és gazdasági károkat okozhatnak. A károk megelőzése, illetve mérséklése érdekében fontos, hogy kidolgozzuk a megfelelő stratégiákat; ám ehhez szükség van az extrém időjárási események jövőben várható gyakoriság-, illetve intenzitásváltozásainak becslésére. A belvíz- és árvízkárok megelőzésének, illetve csökkentésének céljával indult 2012-ben egy európai uniós támogatással megvalósuló kutatási projekt a szegedi és az újvidéki egyetem szakembereinek részvételével (MERIEXWA, 2012). A projekt várhatóan 2014-ben zárul, az eredményekről pedig egy összefoglaló kiadvány jelenik majd meg.

A XX. századi mérések alapján a Magyarországra és a környező térségre végzett elemzések (Bartholy és Pongrácz, 2005a, 2005b, 2007) azt mutatják, hogy a XX. század második felében az extrém csapadékindexek gyakorisága és intenzitása növekedett, ugyanakkor az összcsapadék mennyisége csökkent.

² Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects (Regionális scénáriók előrejelzése és bizonytalanságai az európai klímaváltozás kockázatainak és hatásainak definiálása céljából), <http://prudence.dmi.dk/>

³ Danmarks Meteorologiske Institut (Dán Meteorológiai Intézet)

⁴ STAtistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions (Az extrémumok statisztikus és regionális dinamikus leskálázása Európa térségére), <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>

⁵ Climate Research Unit (Klímakutató osztály)

⁶ Modelling the Impact of Climate Extremes (Az éghajlati extrémumok hatásának modellezése), <http://www.cru.uea.ac.uk/mice/>

⁷ Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal to interannual prediction (Európai ensemble modell-rendszer fejlesztése évszakos és éven túli előrejelzés céljából), <http://www.ecmwf.int/research/demeter/>

⁸ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Európai Középtávú időjáráselőrejelzési-központ)

⁹ Central and Eastern Europe Climate change Impact and vulnerability Assessment (Közép- és Kelet-Európa klímaváltozásának hatásai és a sérülékenység felmérése), <http://www.cecilia-eu.org/WP4.htm>

¹⁰ CLimate ChAnge and Variability: Impact on Central and Eastern Europe (Klímaváltozás és változékonyság: hatások Kelet- és Közép-Európára), <http://www.clavier-eu.org/>

¹¹ Max Planck Institut (Max Planck Intézet)

A jövőre vonatkozóan Jacob et al. (2008) regionális klímaszimulációi szerint Közép-Európában a XXI. század közepéig 50%-os, a Földközi-tenger térségében pedig még ennél is jelentősebb csökkenő trend várható mind a négy évszak csapadékmennyiségében. Ezzel ellentétben, Skandináviában csapadéknövekedés várható, amelyre nagyobb mértékben elsősorban a téli évszakban számíthatunk (Déqué et al., 2007). A XXI. század végére a Kárpát-medencében várható változásokat Bartholy et al. (2008) foglalta össze a PRUDENCE-szimulációk (Christensen et al., 2007) alapján az A2 és a B2 scenáriót (Nakicenovic és Swart, 2000) figyelembe véve. Az eredmények szerint az éves csapadékeloszlásban jelentős átrendeződés várható: a korábbiakban legcsapadékosabb évszakunk, a nyár válhat a jövőben a legszárazabbá, a jelenleg legszárazabb évszak, a tél, pedig a legcsapadékosabbá. Az extrém csapadéktevékenységek intenzitása és gyakorisága is várhatóan növekedni fog térségünkben (Bartholy et al., 2008).

3. Adatok és módszerek bemutatása

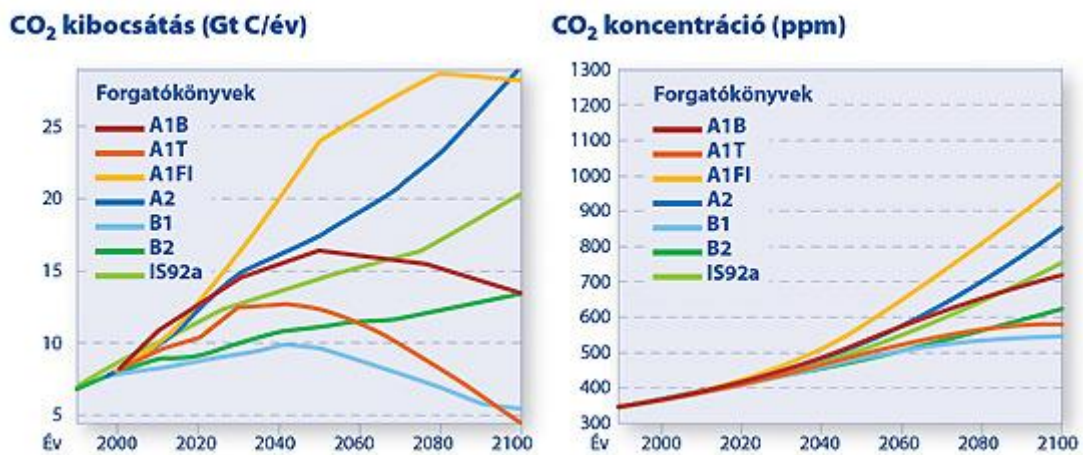
A csapadék az egyik legfontosabb meteorológiai elem, hiszen számos környezeti tényezőre hatást gyakorol. E dolgozatban a nagy csapadékú napok számára és a csapadékintenzitásra vonatkozó éghajlati indexek várható trendjeit vizsgáljuk Közép–Kelet–Európa térségére. A csapadékindexek elemzéséhez – az ENSEMBLES projekt keretében futtatott – kilenc regionális klímamodell napi csapadékmezőit használtuk fel. Először azonban egy hibakorrektíót végeztünk el, amelyhez az E-OBS adatbázis (Haylock et al., 2008) állt rendelkezésünkre referenciaként. A következő alfejezetekben a felhasznált regionális klímamodelleket, az E-OBS adatbázist, a hibakorrektíót, valamint a vizsgált éghajlati indexeket ismertetjük.

3.1. Az elemzésekhez használt regionális klímamodellek

Az elmúlt években nyilvánvalóvá vált, hogy a globális klímamodellek (GCM) nem elég pontosak regionális skálán, ezért kifejlesztették a regionális klímamodelleket (RCM). Ezek a korlátos tartományú modellek a futtatásukhoz szükséges kezdeti- és peremfeltételeket a GCM-ektől kapják. Az RCM-ek előnyei közé tartozik, hogy a GCM-ekkel ellentétben finom térbeli felbontással rendelkeznek, viszonylag jól közelítik az extrém időjárási események bekövetkezésének valószínűségét, valamint nem igényelnek nagy kapacitású szuperszámítógépeket a futtatáshoz. A dolgozatban az ENSEMBLES projekt keretében futtatott kilenc regionális klímamodell (ALADIN, CLM, HadRM3Q, HIRHAM, RACMO2, RCA, RCA3, RegCM, REMO) szimulációiból származtatott napi csapadékmezőket vizsgáljuk hazánk és a környező országok térségére.

Mivel a klímamodellek egy rendkívül összetett rendszert vizsgálnak, figyelembe kell venni többek közt a légkör, az óceán és az élővilág fizikai, kémiai folyamatait, valamint ezek kölcsönhatásait, visszacsatolásait is. A környezetünket óriási mértékben befolyásoljuk mi, emberek is, éppen ezért a modelleknek az antropogén hatásokat is számításba kell venni. Mivel az emberi tevékenységek jövőben várható alakulását, és ezek éghajlatmódosító hatásait nem tudjuk pontosan megjósolni, ezért több lehetséges forgatókönyv felhasználásával készítünk szimulációkat. A vizsgálatunkban szereplő 25 km-es horizontális felbontású klímamodellek egységesen az A1 forgatókönyv-család egyik közepesnek tekinthető

alaptípusát, az A1B scenáriót alkalmazták a futtatások során. Az A1 forgatókönyv-család szerint a jövőben gyors gazdasági növekedés és technológiai fejlődés várható (Nakicenovic és Swart, 2000). A becslések szerint a Föld népessége a XXI. század közepén eléri tetőpontját (2050-re a Föld lakosságának összlétszáma elérheti a 9 milliárdot), azután valamelyest csökkenni kezd. A forgatókönyv alapján jelentősen csökken az egy főre jutó jövedelemben meglévő regionális különbség, azaz kiegyenlítődnek az egyes régiók közti eltérések. Az A1B scenárió alapján a jövőben egyensúlyban lesznek a különböző energiaforrások: megközelítőleg fele-fele arányban fogjuk a megújuló- és atomenergiát, valamint a fosszilis energiaforrásokat használni. Az üvegházhatású gázok CO₂ egyenértékben kifejezett kibocsátása (2. ábra) 2050 körül éri el maximumát (megközelítően 16 Gt C/év), majd lassan csökkenni kezd: 2100-ra 15 Gt C/év alá esik; ekkor a koncentráció a légkörben nagyjából 717 ppm lesz (Nakicenovic és Swart, 2000).



2. ábra. A különböző üvegházhatású gázok CO₂ egyenértékben kifejezett kibocsátásának (Gt C/év) és koncentrációjának (ppm) alakulása különböző forgatókönyvek szerint a XXI. században

Forrás: OMSZ (http://met.hu/omsz.php?almenu_id=homepages&pid=numprog&pri=9&mpx=0)

Az általunk vizsgált regionális klímamodellek legfontosabb jellemzőit a 2. táblázatban foglaltuk össze. A szükséges kezdeti- és peremfeltételeket 1951–2100 között három különböző GCM szolgáltatta: a német ECHAM (Roeckner et al., 2003) öt modellnek (HIRHAM, RACMO2, RCA, RegCM, REMO), a brit HadCM (Gordon et al., 2000) négy modellnek (CLM, HadRM3Q, RCA, RCA3), a francia ARPEGE (Déqué et al., 1998) pedig két modellnek (ALADIN, HIRHAM).

2. táblázat. A kilenc vizsgált regionális klímamodell legfontosabb jellemzői

RCM	Alkalmazó intézet, ország	Referencia publikáció	Vezérlő GCM
CLM	ETHZ ¹² Svájc	Jaeger et al., 2008	HadCM3Q
HadRM3Q	METO-HC ¹³ Nagy-Britannia	Collins et al., 2010	HadCM3Q
RCA3	C4IR ¹⁴ Írország	Dunne et al., 2008	HadCM3Q
RCA	SMHI ¹⁵ Svédország	Raisanen et al., 2001	HadCM3Q ECHAM5
RACMO2	KNMI ¹⁶ Hollandia	Meijgaard et al., 2008	ECHAM5
RegCM	ICTP ¹⁷ Olaszország	Giorgi és Bi, 2000	ECHAM5-r3
REMO	MPI ¹⁸ Németország	Jacob és Podzun, 1997	ECHAM5
HIRHAM	DMI ¹⁹ Dánia	Christensen et al., 2007	ECHAM5 ARPEGE_RM5.1
ALADIN	CNRM ²⁰ Franciaország	Gibelin és Déqué, 2003	ARPEGE_RM5.1

3.2. Az E-OBS adatbázis

Az E-OBS adatbázist elsősorban az RCM-ek validálásának céljából, állomási mérések felhasználásával hozták létre az ENSEMBLES projekt keretében (Haylock et al., 2008). Az E-OBS 25 km-es horizontális felbontásban tartalmazza a napi minimum-, maximum- és átlaghőmérsékletet, illetve a napi csapadékadatokat az 1950–2006 közötti időszakra, amelyet folyamatosan bővítenek az újabb mérések alapján (Klok és Klein Tank, 2009). A jelenlegi 7.0 verzió már 2012. június 30-ig tartó rácsponti idősorokból áll, s a teljes európai térséget lefedi. A legújabb fejlesztés során a légnyomási idősorokkal is kiegészült a rácsponti adatbázis (van der Besselaar et al., 2011).

¹² Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Zürichi Szövetségi Technológiai Intézet)

¹³ Met Office Hadley Centre (Hadley Meteorológiai Központ)

¹⁴ Community Climate Change Consortium for Ireland (Írország Községi Klímaváltozási Konzorciuma)

¹⁵ Swedish Meteorological and Hydrological Institute (Svéd Meteorológiai és Hidrológiai Intézet)

¹⁶ Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (Holland Királyi Meteorológiai Szolgálat)

¹⁷ International Centre for Theoretical Physics (Nemzetközi Elméleti Fizikai Központ)

¹⁸ Max Planck Institut (Max Plack Intézet)

¹⁹ Danmarks Meteorologiske Institut (Dán Meteorológiai Intézet)

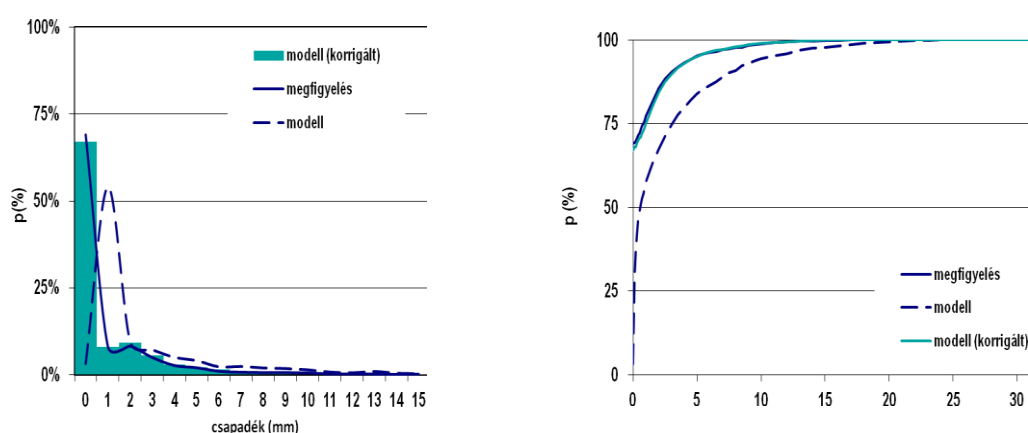
²⁰ Centre National de Recherches Météorologiques (Nemzeti Meteorológiai Kutatóközpont)

Mivel Európa területe megközelítően 10 millió km², ezért az RCM-ek pontos validálásához megfelelő sűrűségű mérőhálózathoz legalább 16 000 állomásra lett volna szükség. Habár Európában – a Föld más térségeihez viszonyítva – a meteorológiai mérőállomások sűrűsége jóval nagyobb, s messze meghaladja a Meteorológiai Világszervezet (WMO) ajánlásait, ilyen sok állomás nem létezik a térségben. Éppen ezért a rácspontri adatbázis összeállítása után megadták az interpolációból (Begert et al., 2008) eredő bizonytalanságok becslését is (Hofstra et al., 2009, 2010).

3.3. A hibakorrekción

A várható átlagos változások elemzésekor elegendő lehet a jövőbeli és a múltbeli időszakra vonatkozó szimulációk különbségeit tekinteni, s így megadni a valószínűsíthető éghajlatváltozás mértékét. Az extrém időjárási események vizsgálatakor azonban különösen fontos, hogy a lehető legpontosabb szimulációs értékekkel dolgozzunk, hiszen azt szeretnénk tudni, hogy egy-egy előre meghatározott küszöbértéket hányszor és mennyivel fog meghaladni az adott index. Annak érdekében, hogy a valóságot minél jobban közelítő idősorokkal dolgozhassunk, az általunk vizsgált RCM-eken elsőként egy hibakorrekción eljárást végeztünk el, majd a már korrigált adatokkal dolgoztunk tovább a csapadékindexek elemzésekor. A modellek által szimulált napi adatokat az E-OBS adatbázis referencia értékeihez (1951–2000) igazítottuk. Mivel két adathalmaz statisztikai szempontból közel egyezőnek tekinthető, ha eloszlásuk megegyezik, ezért az E-OBS adatbázis alapján kapott eloszlásfüggvényhez illesztettük a modell szimulációkból számított eloszlásokat. Az igazítás percentilisenként történt, meghatározott aránypárok segítségével. A hibakorrekción tehát a szimulált és a mért adatok empirikus eloszlásfüggvényének illesztésén alapul (Déqué et al., 2007). A módszer ún. korrekciós faktorokat alkalmaz, amelyek lehetnek additívak (pl. a hőmérséklet esetén) vagy multiplikatívak (pl. a csapadék esetén). A korrekción végrehajtásához a megfigyelt és a szimulált adatok empirikus eloszlásfüggvényeit kell meghatározni. Ezek ismeretében adhatjuk meg azokat a faktorokat, amelyek szükségesek ahhoz, hogy a szimulált adatsor eloszlását a megfigyelésekéhez igazítsuk, korrigáljuk (Formayer és Haas 2009). Eredményképpen a korrekción átesett szimulált adatok statisztikai eloszlása megegyezik a referencia időszakból kirajzolódó eloszlással. Illusztrációképpen a 3. ábrán mutatjuk be a csapadék esetén alkalmazott korrekción szükségességét és végrehajtását az é. sz. 47,625°; k. h. 19,625° földrajzi koordinátájú rácspontri januári napi adataira. A bal oldali grafikonon az empirikus sűrűségfüggvényeket hasonlítjuk össze, a jobb oldalon pedig az

ezekből származtatott empirikus eloszlásfüggvényeket. A jobb oldali grafikon x-tengelyén a csapadék-percentilisek vannak feltüntetve (az n%-os – vagy n-edik – percentilis értéke az a napi csapadékmennyiség, amelynél az adatok n%-a kisebb), az y-tengelyen pedig a valószínűségek. Jól látható, hogy a megfigyeléseken alapuló adatok és a modell által szimulált idősor eloszlása jelentősen eltér egymástól. Célunk ennek a becslési hibának a kiküszöbölése a korrekció alkalmazásával. A hibakorrekció során az eredeti, modell által szimulált mezők rácspontonként meghatározott empirikus eloszlásfüggvényét simítjuk rá a mért adatok empirikus eloszlásfüggvényére.



3. ábra. A megfigyelt, a szimulált és a korrigált adatsorok empirikus sűrűség- és eloszlásfüggvényei, 1951–2000

A korrekció szemléltetéséhez tekintsük a grafikon példáját! A teljes rácsponti idősorra mind a 12 hónapra külön-külön meghatározott F empirikus eloszlásfüggvények közül a januári esetén végezzük el a p valószínűség korrigálását. A megfigyeléseken alapuló percentilist jelöljük x_o -val, a modell-outputokból számított percentilist pedig x_m -mel. A példában $x_o > x_m$, de ez természetesen nem szükségszerű. A csapadék esetén multiplikatív faktort használhatunk az abszolút skála miatt. Ekkor

$$f_a(y) = F_o^{-1}(y) / F_m^{-1}(y) = x_o / x_m.$$

Ha korrigáljuk a modellszimuláció eredeti outputjait, akkor láthatjuk, hogy a hibakorrekció után eredményül kapott csapadék adat (x_c) megegyezik a megfigyelt adattal (x_o):

$$x_c = x_m \cdot f_a = x_m \cdot x_o / x_m = x_o.$$

Ha ezt minden p értékre ($p=1,\dots,100$) hasonlóképpen elvégezzük, akkor a modell által szimulált csapadékidősor empirikus eloszlását a megfigyelt adatsoréhoz illesztve elérjük a kitűzött célunkat.

3.4. A vizsgált csapadékindexek bemutatása

E dolgozatban bemutatott kutatás során öt csapadékindexet vizsgálunk, amelyeket a CLIVAR/WMO munkacsoport (Karl et al., 1999) ajánásaiban szereplő éghajlati indexek közül választottunk ki. A 3. táblázatban foglaljuk össze a vizsgált indexek jelét, pontos definícióját, mértékegységét. A táblázat első két sorában szereplő indexek (RR10, RR20) a lehullott csapadék mennyiségére vonatkoznak, és egy-egy meghatározott küszöbérték meghaladásával kapcsolatosak. A környezeti és gazdasági károk mérséklése szempontjából alapvető fontosságú, hogy a csapadékhullás intenzitását is ismerjük, ezért vizsgáltuk az RX1, az RX5, valamint az SDII indexet is.

3. táblázat. A vizsgált csapadékindexek jele, definíciója és egysége

Jel	Definíció	Egység
RR10	Azon napok száma, amelyeken a lehullott csapadék mennyisége meghaladja a 10 mm-t. ($R_{nap} \geq 10 \text{ mm}$)	nap
RR20	Azon napok száma, amelyeken a lehullott csapadék mennyisége meghaladja a 20 mm-t. ($R_{nap} \geq 20 \text{ mm}$)	nap
RX1	Az 1 nap alatt lehullott maximális csapadékösszeg. ($R_{max,1nap}$)	mm
RX5	Az 5 nap alatt lehullott maximális csapadékösszeg. ($R_{max,5nap}$)	mm
SDII (Simple Daily Intensity Index)	Csapadékindenzitás: a teljes csapadékösszeg és a csapadékos napok számának hányadosa. ($R_{sum}/RR1$) – a csapadékos napokon lehullott átlagos csapadékmennyiség	mm/nap

4. Az eredmények elemzése

Ebben a fejezetben a regionális klímamodellek hibakorrigált outputjaiból számított csapadékindexek várható változását mutatjuk be a jövőre vonatkozóan Közép–Kelet–Európa térségére, diagramok és térképek segítségével. Az egyes indexek külön alfejezetekben szerepelnek. A térképes ábrázolás során a teljes vizsgált területet, a diagramok esetén pedig az általunk választott kivágot ÉNY–DK tengelye mentén fekvő három országra/régióra (DK–Csehország, Magyarország, Románia) vonatkozó eredményeket mutatjuk be. A diagramokon az egyes régiók rácsponthoz viszonyított átlagos várható változása látható a 2071–2100 időszakra (esetenként, ha nem állt rendelkezésünkre a modellszimuláció 2100-ig, a meglévő utolsó 30 évet tekintettük). Amiként azt már korábban is említettük, az RCM-eket három különböző globális klímamodell vezérelte. Az ábrán háromszöggel jelöltük a német ECHAM, négyzettel a brit HadCM, és körrel a francia ARPEGE által meghajtott regionális modelleket; az egyes RCM-eket pedig különböző színekkel tüntettük fel az ábrán. Az eredményül kapott várható változásokra elvégeztük a statisztikai t-próbát (Dévényi és Gulyás, 1988); s a 95%-os szinten szignifikáns változásokat beszínezett szimbólumokkal jelöltük a grafikonokon. A térképes megjelenítés során a dolgozatban csak az évszakai változások mezőit ábrázoljuk, hiszen az éves változásokban ezek eredőjeként megjelenő tendenciák sokszor félrevezetőek lehetnek az egymással ellentétes évszakai változások miatt (Bartholy et al., 2008). Első lépésként meghajtott GCM-enként készítettük el az átlagos változásokat kirajzoló térképeket, majd ezek felhasználásával a három térkép kompozitjaként adjuk meg a prognosztizálható évszakai változásokat.

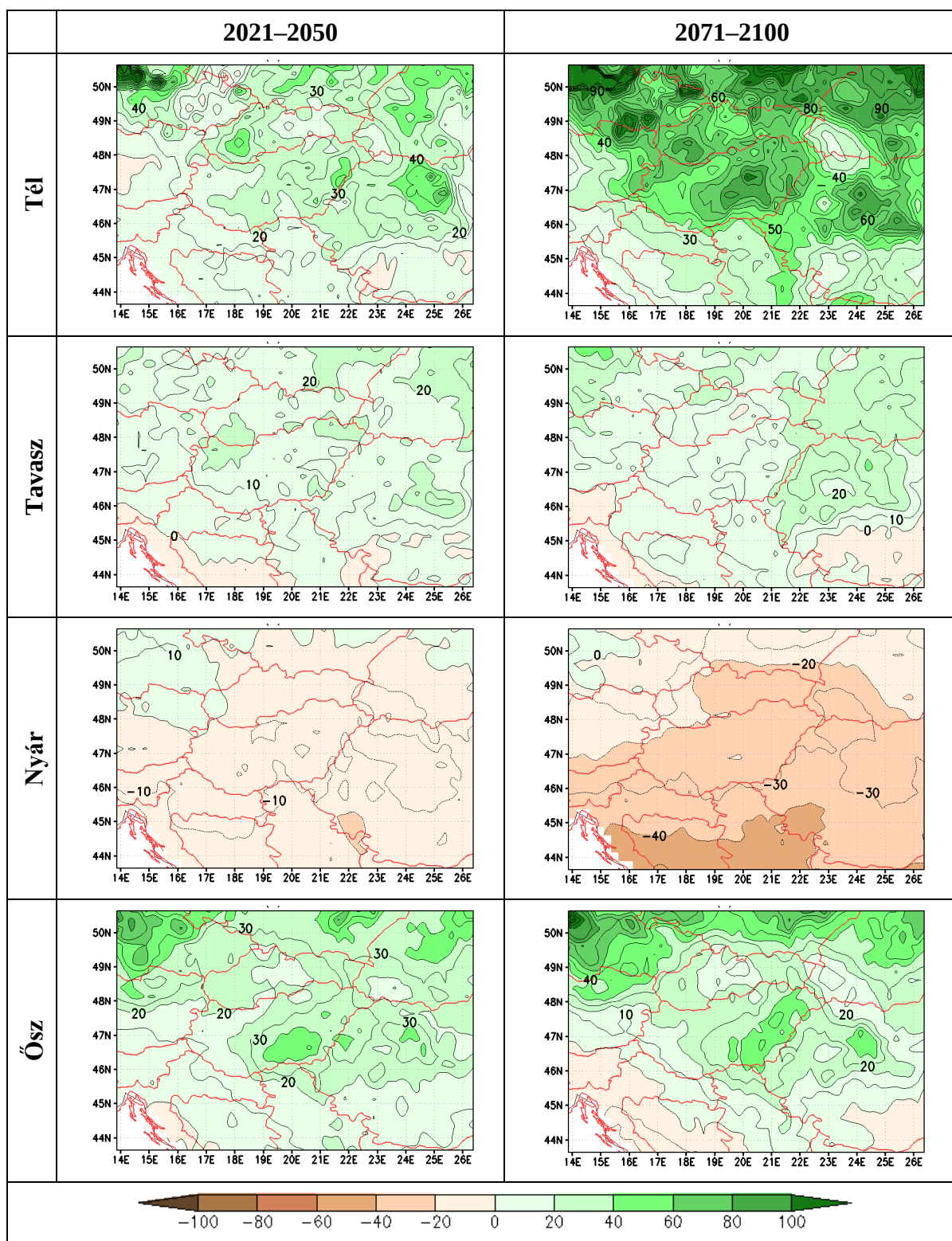
4.1. A 10 mm-nél nagyobb csapadékú napok számának várható változása

Elsőként a 10 mm-nél nagyobb csapadékú napok számának valószínűsíthető változását mutatjuk be. Az általunk vizsgált területen a legjelentősebb növekedés (54%) télen várható a távolabbi jövőben (4. táblázat). A teljes régióban várható átlagos változás alapján az átmeneti évszakokban kisebb mértékű (10–20%) növekedést valószínűsíthetünk, csökkenésre pedig csak nyáron számíthatunk.

4. táblázat. Az RR10 átlagos értékei (1961–1990) és a várható átlagos változás a teljes vizsgált területen

RR10	Tél	Tavaszi	Nyár	Ősz
1961–1990: átlagos érték (nap) E-OBS alapján	2	4	7	4
Átlagos változás 2021–2050 időszakra	21%	11%	-7%	24%
Átlagos változás 2071–2100 időszakra	54%	14%	-25%	23%

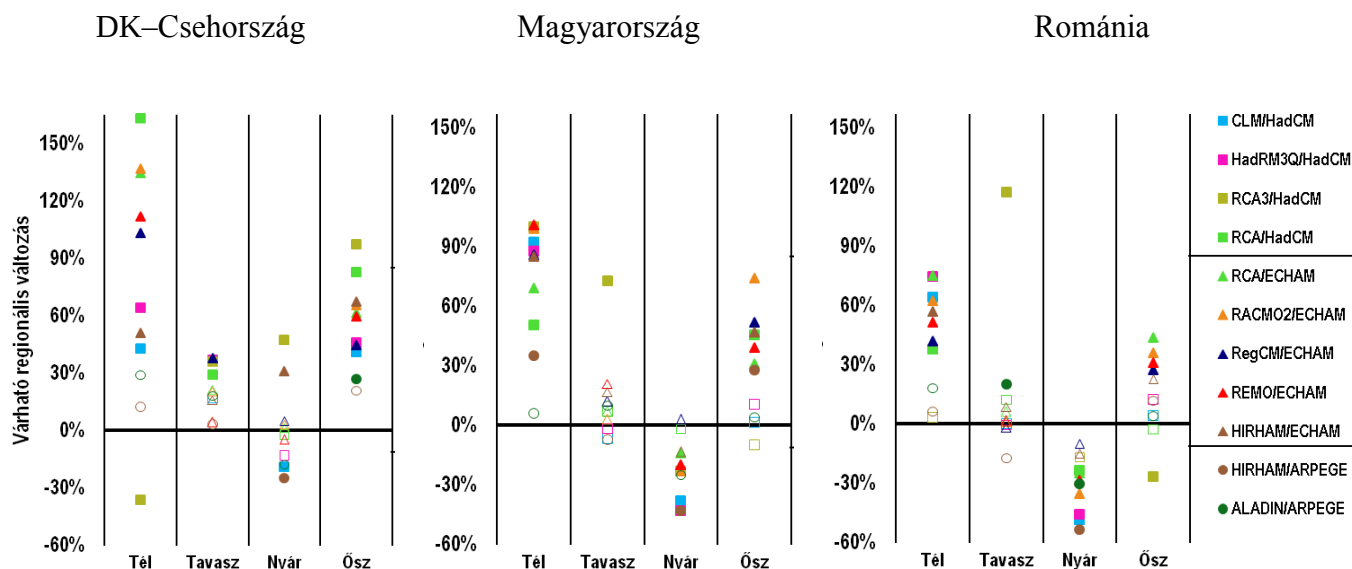
Az RR10 jövőben várható alakulásának térbeli szerkezetét a 4. ábrán láthatjuk. Télen a 2021–2050 időszakra vonatkozóan csupán Csehország, Románia és Szlovákia kisebb részterületein valószínűsíthető 40%-ot meghaladó változás, ám a XXI. század végén Ausztriában, Csehországban, Szlovákiában, Magyarországon, Ukrajnában és Romániában is megfigyelhetjük a magasabb értékeket. Télen a közelebbi jövőben még nem számíthatunk jelentős változásokra, ám 2071–2100-ban a vizsgált terület északi és keleti felén 50–90%-os növekedés prognosztizálható (a várható átlagos változás DK–Csehországban 91%, DNY–Ukrajnában 73%, Szlovákiában 66%). A 10 mm-nél nagyobb csapadékú napok száma tavasszal feltehetően a vizsgált terület keleti felén fog a legjelentősebben (kb. 20%-kal) megnövekedni. A 2021–2050 és a 2071–2100 időszakra valószínűsíthető változások mértéke és térbeli szerkezete hasonló. Nyáron csökkenésre számíthatunk, amely a közelebbi jövőben 10% körüli. 2071–2100-ban viszont a Kárpát-medencében 30%-nál is nagyobb változás valószínűsíthető, sőt, Horvátország és Szerbia déli területein akár a 40%-ot is meghaladhatja a csökkenés mértéke. Ősszel a vizsgált terület északi régióiban (Csehország, Ukrajna) valamint az Alföldön várhatunk nagyobb mértékű (40%) növekedést, amely az idő előrehaladtával egyre jelentősebb lesz (100%-ot is elérheti). A vizsgált terület ÉNY–DK tengelye mentén kiválasztott három országra vonatkozó diagram is (5. ábra) alátámasztja azt a megállapításunkat, miszerint a legnagyobb mértékű változás az RR10 értékeiben télen várható a távolabbi jövőben. A 11 modellszimuláció közül DK–Csehországban és Romániában nyolc, Magyarországon pedig tíz jelez szignifikáns növekedést (meg kell jegyezni azonban, hogy DK–Csehország esetén egy modell (RCA3) szignifikáns csökkentést jelez). A nyáron várható csökkenés Magyarországon és Romániában figyelhető meg (30–60%): rendre hét, illetve nyolc modellszimuláció becslése szignifikáns. DK–Csehországban a szignifikáns változások ellentétes irányba mutatnak (kettő nő és kettő csökken).



4. ábra. Kompozit térkép az RR10 index évszakonként várható relatív változásáról (%)

2021–2050-re és 2071–2100-ra a 11 RCM-szimuláció alapján.

Referencia időszak: 1961–1990



5. ábra. Az RR10 várható átlagos változása DK–Csehországban, Magyarországon és Romániában a XXI. század végére (Referencia időszak: 1961–1990)

Tavasszal nem számíthatunk jelentősebb változásokra (maximum 30% – kivéve Magyarországon az RCA3: 80%), ősszel pedig átlagosan 60%-os növekedés várható. A három kiválasztott országban tehát a változások hasonló irányúak, ám feltehetőleg DK–Csehországban nagyobb mértékű növekedésre számíthatunk a 10 mm-nél nagyobb csapadékú napok számában télen, tavasszal és ősszel is.

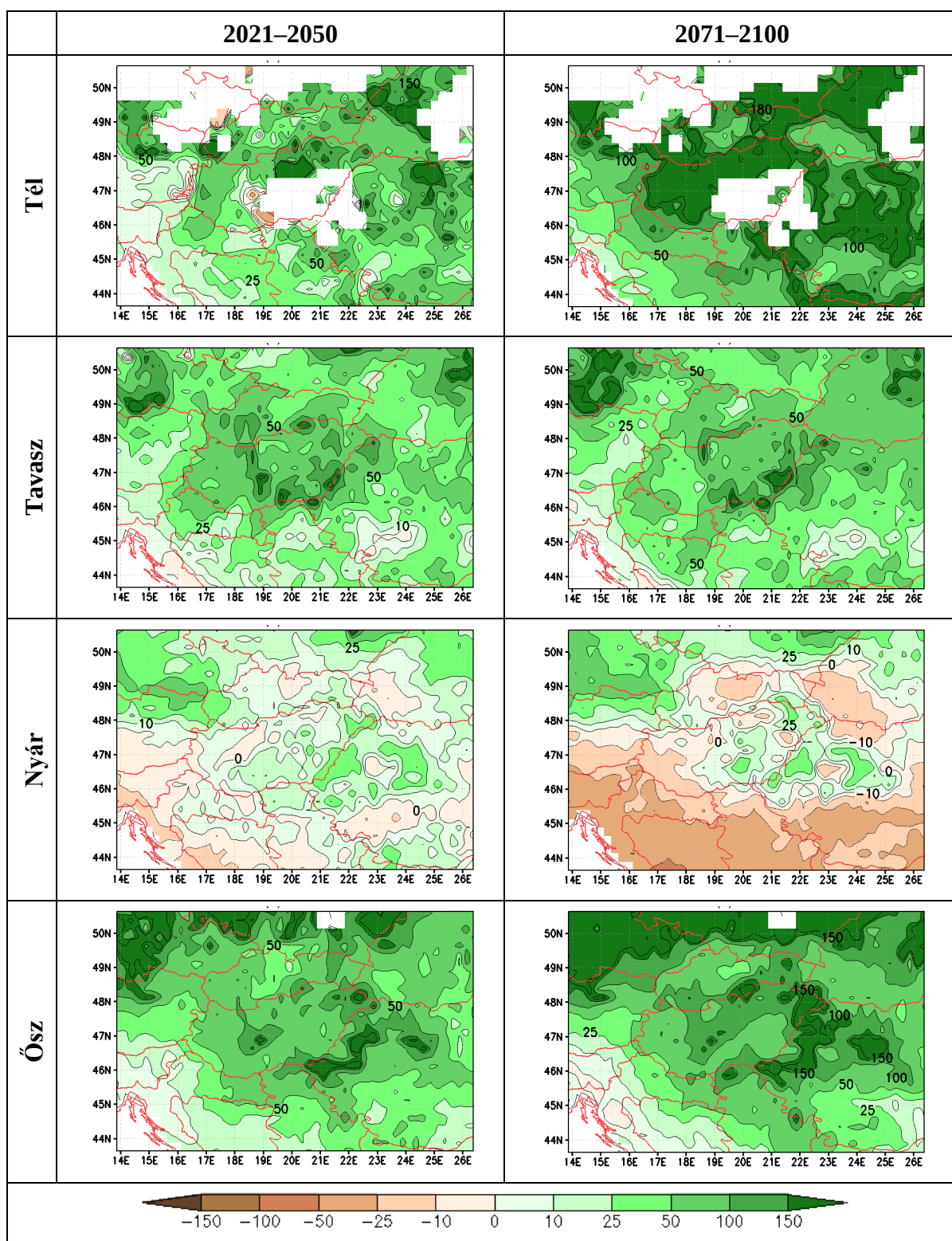
4.2. A 20 mm-nél nagyobb csapadékú napok számának várható változása

A következőkben a 20 mm-nél nagyobb csapadékú napok számának várható alakulását elemezzük. Láthatjuk az 5. táblázat alapján, hogy a regionális klímamodellek szerint az RR20 változása télen és ősszel lesz a legjelentősebb (a távolabbi jövőben meghaladja a 100%-ot). Az 1961–1990 referencia időszakban télen háromévente egyszer fordult elő 20 mm-nél nagyobb csapadék a vizsgált területen, ám a XXI. század végére 139%-os növekedés prognosztizálható.

5. táblázat. Az RR20 átlagos értékei (1961–1990) és a várható átlagos változás a teljes vizsgált területen

RR20	Tél	Tavasz	Nyár	Ősz
1961–1990: átlagos érték (nap) E-OBS alapján	0,36	0,59	1,49	0,95
Átlagos változás 2021–2050 időszakra	61%	49%	11%	73%
Átlagos változás 2071–2100 időszakra	139%	57%	-2%	103%

A 6. ábrán az RR20 valószínűsíthető változásainak térbeli szerkezetét láthatjuk; a fehérrel jelzett területek azokat a térségeket jelzik, ahol a referencia időszakban egyszer sem fordult elő RR20. Télen DK–Csehországban, Ukrajna egyes területein, valamint az Alföldön egyszer sem fordult elő 20 mm-nél nagyobb csapadék az 1961–1990-es referencia időszakban (ezeket a térségeket fehérrel jelöltük a térképeken). A közelebbi jövőben átlagosan 61%-os növekedés várható, ám a XXI. század végén már nem ritkák a 100%-ot meghaladó értékek. A legnagyobb mértékű átlagos növekedés Magyarországon (202%) és Romániában (151%) várható. Tavasszal DK–Csehországban (átlagosan 70%, majd 105%) és Magyarországon (átlagosan 84%, majd 76%) várhatunk jelentősebb változást, a teljes régióban átlagosan 57%-os növekedés prognosztizálható a XXI. század végére. Nyáron 25%-nál nagyobb növekedést csak DK–Csehországban, K–Ausztria északi részén, az Alföldön, Erdélyben és DNY–Ukrajna északi területén figyelhetünk meg; a déli országokban és a Kárpátok mentén csökkenés várható. A közelebbi jövőben feltehetően még csak –10% körüli lesz ez a változás, ám 2071–2100-ban már jelentősebb csökkenésre számíthatunk az RR20 értékeiben (Horvátországban 32%-os, Szlovéniában 28%-os átlagos csökkenés valószínűsíthető). Ősszel a vizsgált terület egészén növekedést várhatunk a 20 mm-nél nagyobb csapadékú napok számában. A két vizsgált időszakban hasonló változások feltételezhetőek: az északi területeken és Románia keleti felén valószínűsíthető a legnagyobb mértékű (150% feletti) növekedés. A 7. ábrán is szembejűnik, hogy a legjelentősebb változások télen várhatóak (a legtöbb modellszimuláció becslése szignifikáns), akár 340%-os növekedés is lehetséges az RCM-ek szerint (DK–Csehország: REMO, Magyarország: CLM). Az átmeneti évszakokban szintén növekedés várható a szignifikáns becslést adó modellszimulációk szerint. Ősszel nagyobb mértékű lesz ez a növekedés, a HIRHAM/ECHAM modellszimuláció alapján DK–Csehországban akár a 240%-ot is elérheti a becsült változás. Nyáron különbséget figyelhetünk meg az országok között a változás irányát illetően. DK–Csehországban 46%-os, Magyarországon átlagosan csupán 1%-os növekedés, míg Romániában 8%-os csökkenés valószínűsíthető. DK–Csehországban hat modell (az összes ECHAM által meghajtott RCM és az RCA3), Magyarországon egy modell (HIRHAM/ARPEGE) valószínűsít szignifikáns növekedést, Romániában pedig három (HIRHAM/ARPEGE, HadRM3Q, CLM) jelez szignifikáns csökkenést.

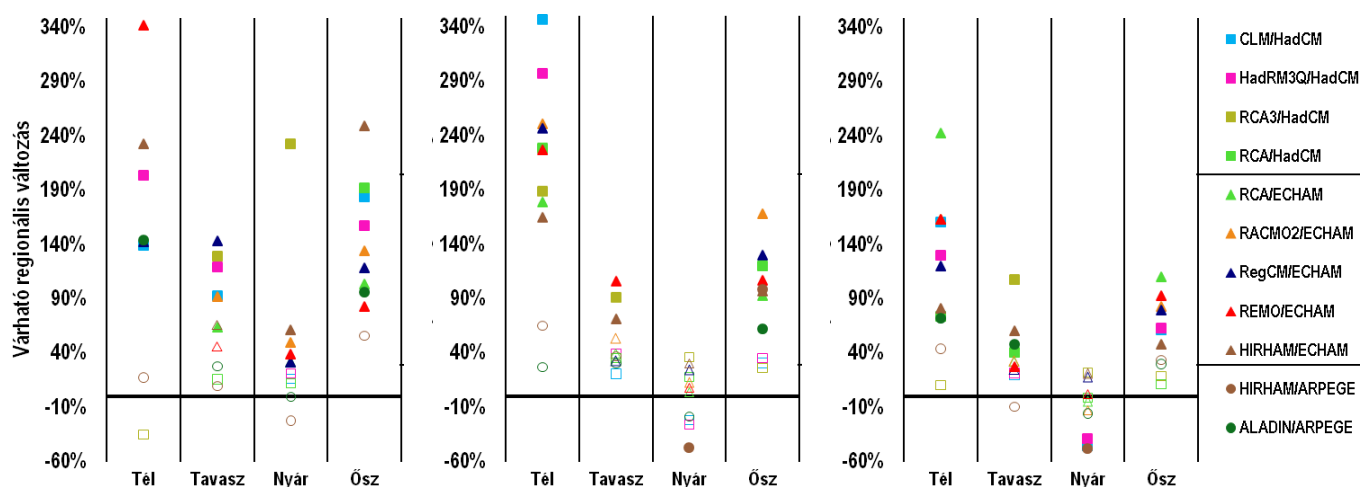


6. ábra. Kompozit térkép az RR20 index évszakonként várható relatív változásáról (%)
2021–2050-re és 2071–2100-ra a 11 RCM-szimuláció alapján.
Referencia időszak: 1961–1990

DK–Csehország

Magyarország

Románia



7. ábra. Az RR20 várható átlagos változása DK-Csehországban, Magyarországon és Romániában a XXI. század végére (Referencia időszak: 1961–1990)

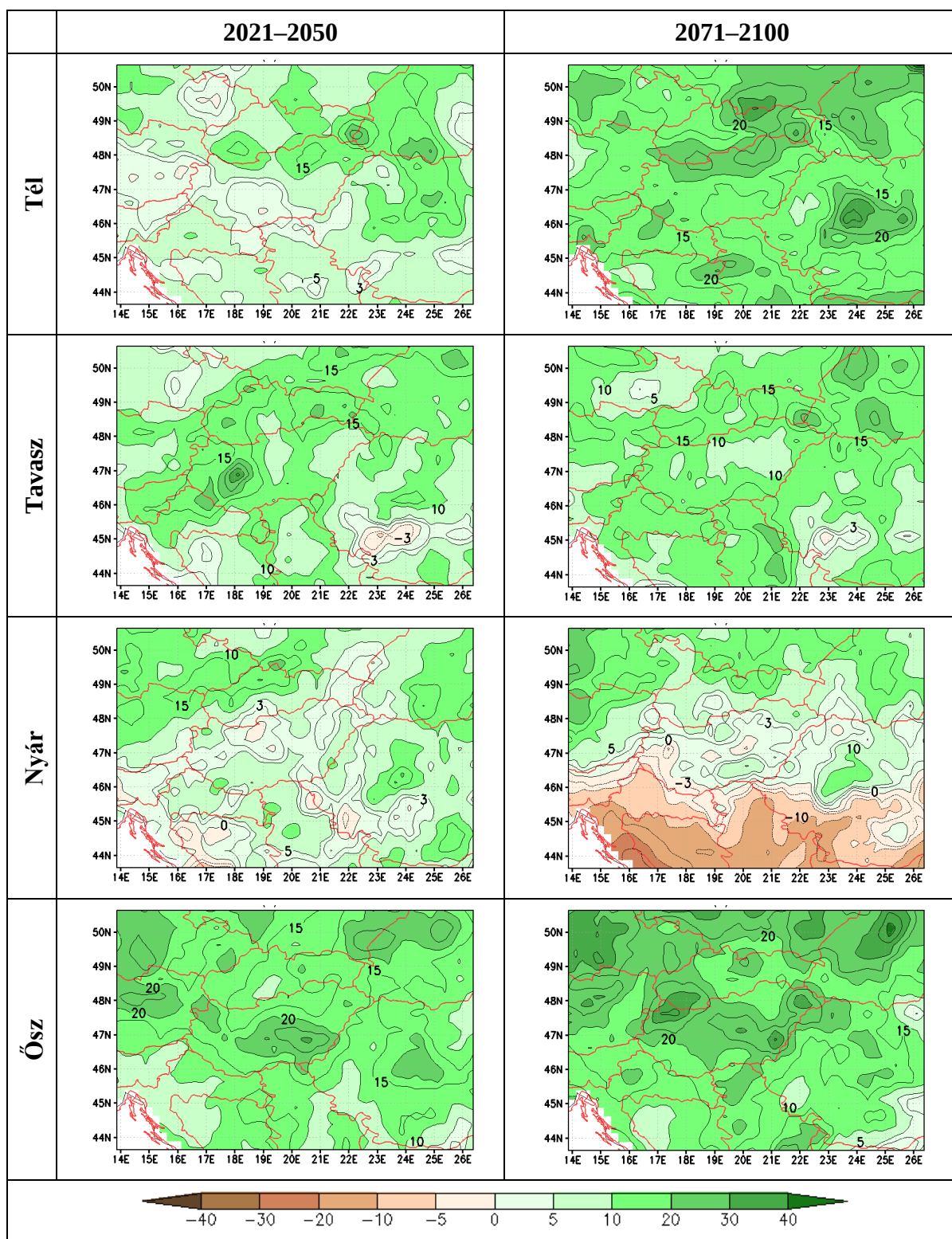
4.3. Az egy nap alatt lehullott maximális csapadékmennyiség várható változása

Ebben a fejezetben az egy nap alatt lehullott maximális csapadékmennyiségre vonatkozó eredményeinket mutatjuk be. Mind a négy évszakban növekedésre számíthatunk az általunk vizsgált régióban (6. táblázat), amely összességében a legjelentősebb: a referencia időszakban jellemző 20 mm a XXI. század végére 24 mm-re nőhet (19%-os változás). Nyáron valószínűsíthető a legkisebb mértékű változás: 1961–1990 időszak 25 mm-e helyett, 2071–2100-ra 25,5 mm várható. Tehát láthatjuk, hogy a referencia időszakban nyáron volt a legnagyobb az RX1 értéke, ám a XXI. század végére feltételezhetjük, hogy az őszi érték csaknem meghaladja majd a nyárit.

6. táblázat. Az RX1 átlagos értékei (1961–1990) és a várható átlagos változás a teljes vizsgált területen

RX1	Tél	Tavasz	Nyár	Ősz
1961–1990: átlagos érték (mm) E-OBS alapján	14	19	25	20
Átlagos változás 2021–2050 időszakra	8%	10%	7%	15%
Átlagos változás 2071–2100 időszakra	18%	12%	2%	19%

Télen 2021–2050-re Szlovákia, Románia és hazánk északi régiójának kivételével nem számíthatunk jelentős változásokra (8. ábra). A XXI. század végén azonban már a teljes területen 10%-ot meghaladó növekedés feltételezhető a modellszimulációk szerint.

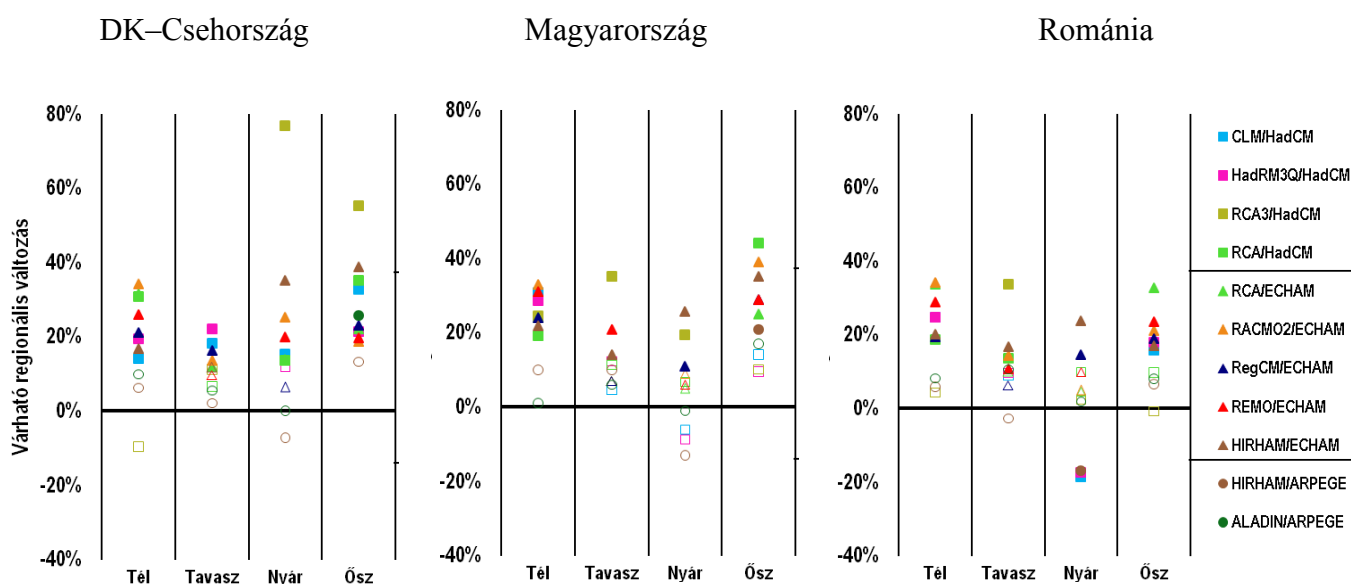


8. ábra. Kompozit térkép az RX1 index évszakonként várható relatív változásáról (%)

2021–2050-re és 2071–2100-ra a 11 RCM-szimuláció alapján.

Referencia időszak: 1961–1990

Az egy nap alatt lehullott maximális csapadékmennyiség tavasszal várhatóan az egész régióban növekedni fog, mintegy 10%-kal. A legnagyobb változás 2021–2050-re vonatkozóan a Dunántúlon, 2071–2100-ban pedig DNY–Ukrajnában valószínűsíthető. Nyáron a közelebbi jövőben csak DK–Csehországban, K–Ausztriában, Románia kisebb részén és DNY–Ukrajnában várhatunk jelentősebb (10%-ot meghaladó) növekedést. A távolabbi jövőben az említett területeken szintén 10% körüli növekedés várható, ám a déli országokban csökkenést jeleznek a modellek (az átlagos változás Horvátországban –11%, Szerbiában pedig –9%). Magyarországon nem valószínűsíthető nagy változás az RX1 értékeiben nyáron. Ősszel mind a két időszakban növekedés (10–20%) feltételezhető a vizsgált terület egészén, jelentősebb változás (30% feletti) az északi országokban figyelhető meg. A 9. ábrán láthatjuk, hogy a három kiválasztott országban, mind a négy évszakban 20–40% körüli növekedés várható.



9. ábra. Az RX1 várható átlagos változása DK-Csehországban, Magyarországon és Romániában a XXI. század végére (Referencia időszak: 1961–1990)

A modellek többsége tavasszal és ősszel is szignifikáns növekedést prognosztizál a három országban. Nyáron azonban DK–Csehországban hét, Magyarországon három RCM szimuláció jelez szignifikáns növekedést, Romániában viszont kettő növekedést (RegCM, HIRHAM/ECHAM), három pedig csökkenést (HIRHAM/ARPEGE, CLM, HadRM3Q) feltételez a távolabbi jövőre vonatkozóan.

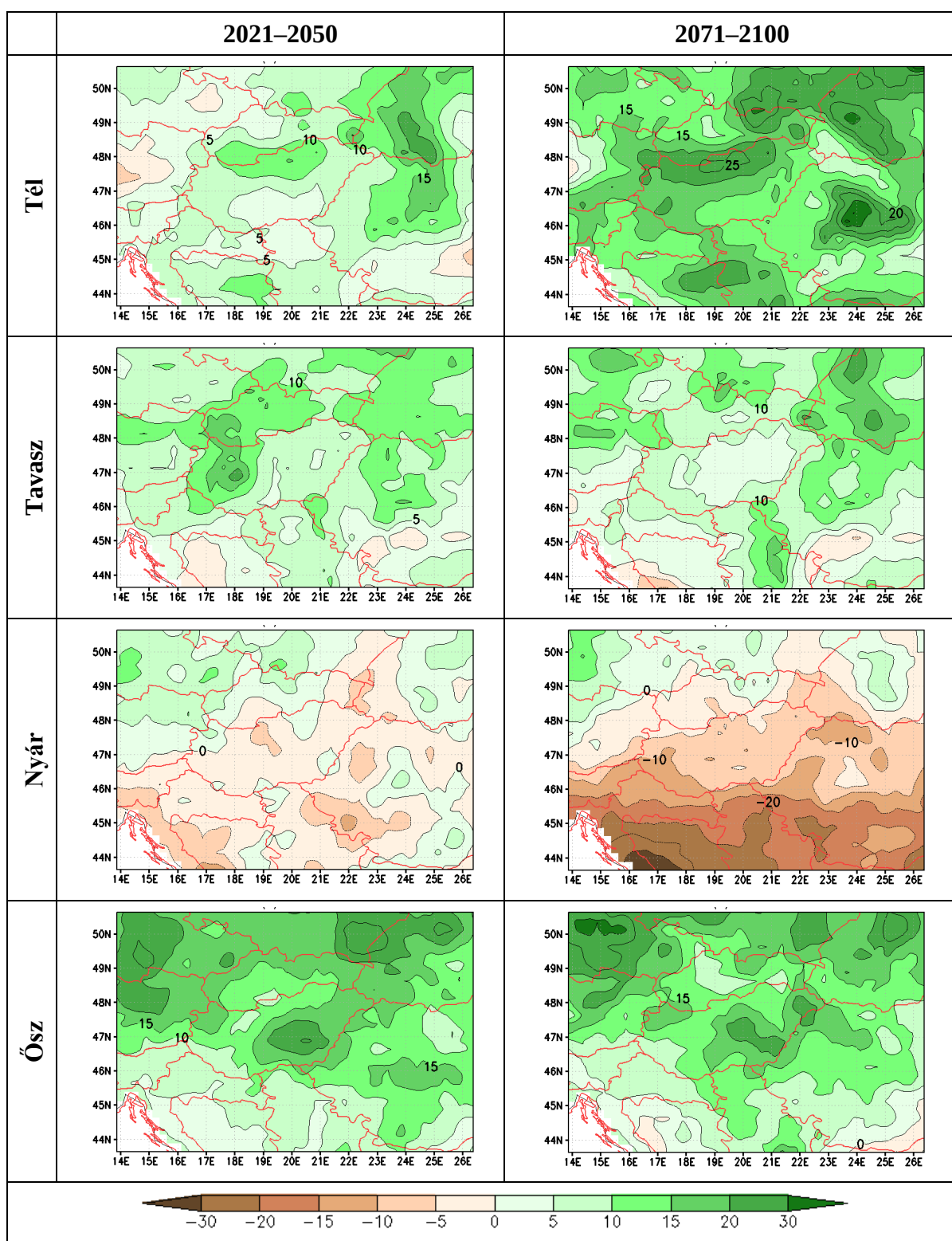
4.4. Az öt nap alatt lehullott maximális csapadékmennyiség várható változása

A következőkben az öt nap alatt lehullott maximális csapadékmennyiség valószínűsíthető változásait mutatjuk be. A legkisebb mértékű változás (–8%) nyáron feltételezhető (7. táblázat), a legnagyobb (16%) pedig télen. Télen az 1961–1990 közötti időszakban 31 mm volt az RX5 átlagos értéke, 2071–2100-ra ez az érték 36 mm-re emelkedhet.

7. táblázat. Az RX5 átlagos értékei (1961–1990) és a várható átlagos változás a teljes vizsgált területen

RX5	Tél	Tavaszi	Nyár	Ősz
1961–1990: átlagos érték (mm) E-OBS alapján	31	38	52	41
Átlagos változás 2021–2050 időszakra	7%	8%	0%	13%
Átlagos változás 2071–2100 időszakra	16%	8%	-8%	13%

Az RX5 várható változásának térbeli eloszlását a 10. ábrán láthatjuk. 2021–2050 telére a modellszimulációk csak hazánk északi részére, DNY–Ukrajnára és Románia egyes területeire jeleznek jelentősebb növekedést. 2071–2100-ra viszont az általunk választott kivágot szinte egészen 10%-os változás, az előbbieken kiemelt területeken pedig 20%-ot meghaladó növekedés várható. Tavasszal a közelebbi jövőben Szlovákiában, DNY–Ukrajnában, a Dunántúlon, Ausztria északi részén és Románia egyes területein valószínűsíthető 10%-nál nagyobb növekedés. 2071–2100-ban azonban DK–Csehországban és Szerbiában is ilyen mértékű változásokra számíthatunk, miközben Szlovákiában és a Dunántúlon 10% alá esik a növekedés mértéke. Nyáron Magyarország és Szlovákia területén feltehetően kialakul egy választóvonal: északon kisebb mértékben növekedni, délen pedig csökkenni fog az RX5 értéke. A közelebbi jövőben még nem lesz jelentős a változás, ám a XXI. század végén Szerbiában és Horvátországban is átlagosan 19%-os, Szlovéniában 13%-os, Romániában 12%-os csökkenés valószínűsíthető. Ősszel mindkét időszakban 10% körüli növekedés várható a vizsgált terület egészen, kivéve Szlovéniát, Horvátországot és Szerbiát, ahol kisebb mértékű (5%) változás feltételezhető. Télen a három kiválasztott országban szinte az összes modell (kivétel az ARPEGE által meghajtott RCM-ek, az RCA3 és az RCA/HadCM) szignifikáns (kb. 30%-os) növekedést prognosztizál (11. ábra).

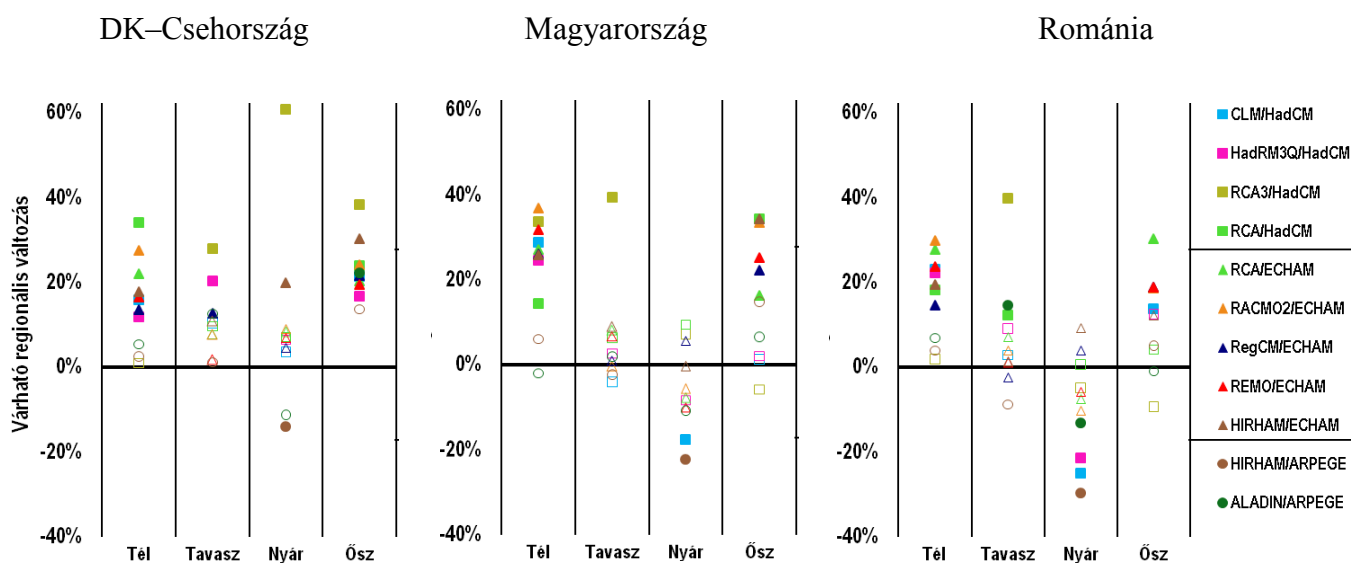


10. ábra. Kompozit térkép az RX5 index évszakonként várható relatív változásáról (%)

2021–2050-re és 2071–2100-ra a 11 RCM-szimuláció alapján.

Referencia időszak: 1961–1990

Tavasszal nem várható jelentősebb változás, a modellszimulációk becslése többnyire nem szignifikáns. Nyáron DK–Csehországban két modell (RCA3, HIRHAM/ECHAM) szignifikáns növekedést, egy (HIRHAM/ARPEGE) pedig szignifikáns csökkenést jelez – a változások iránya bizonytalan. Magyarországon az RCM-ek szerint csökkenés várható, a becslések közül csupán kettő (CLM, HIRHAM/ARPEGE) szignifikáns. Romániában szintén csökkenés valószínűsíthető; az ALADIN, a HadRM3Q, a CLM és a HIRHAM/ARPEGE szimulációk becslése is szignifikáns. Ősszel mindhárom országban 20% körüli növekedés feltételezhető a szignifikáns változást becselő szimulációk szerint.



11. ábra. Az RX5 várható átlagos változása DK-Csehországban, Magyarországon és Romániában a XXI. század végére (Referencia időszak: 1961–1990)

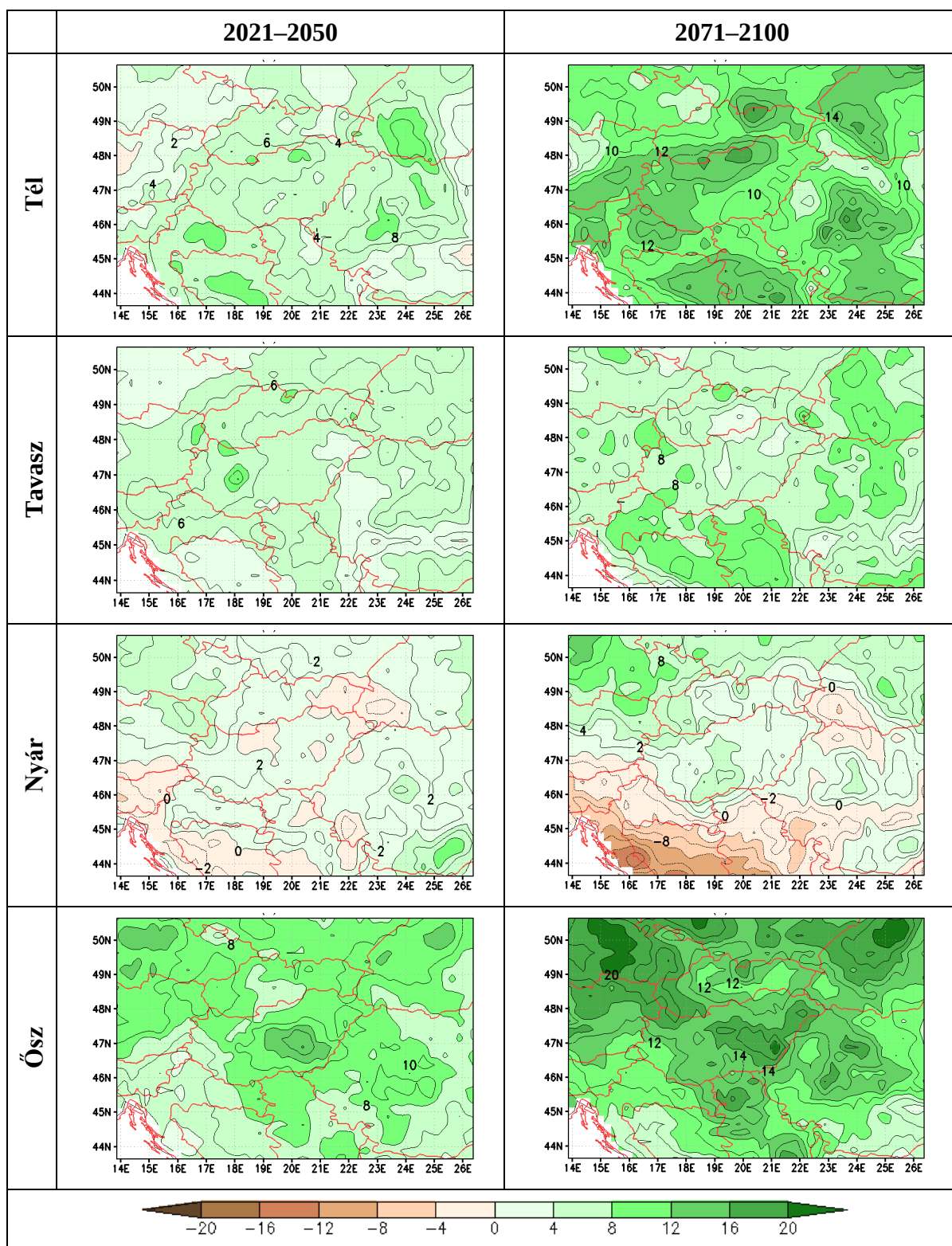
4.5. A csapadékkéntesség várható változása

Végül a csapadékkéntesség, azaz a csapadékos napokon lehullott átlagos csapadékmennyiség várható változását tekintjük át. Az SDII feltehetően mind a négy évszakban növekedni fog az általunk vizsgált területen (8. táblázat), a legjelentősebben ősszel (13%). Tavasszal és télen is növekedés valószínűsíthető, nyáron viszont nagyon kicsi a becsült jövőbeli változás (1–2%) mértéke.

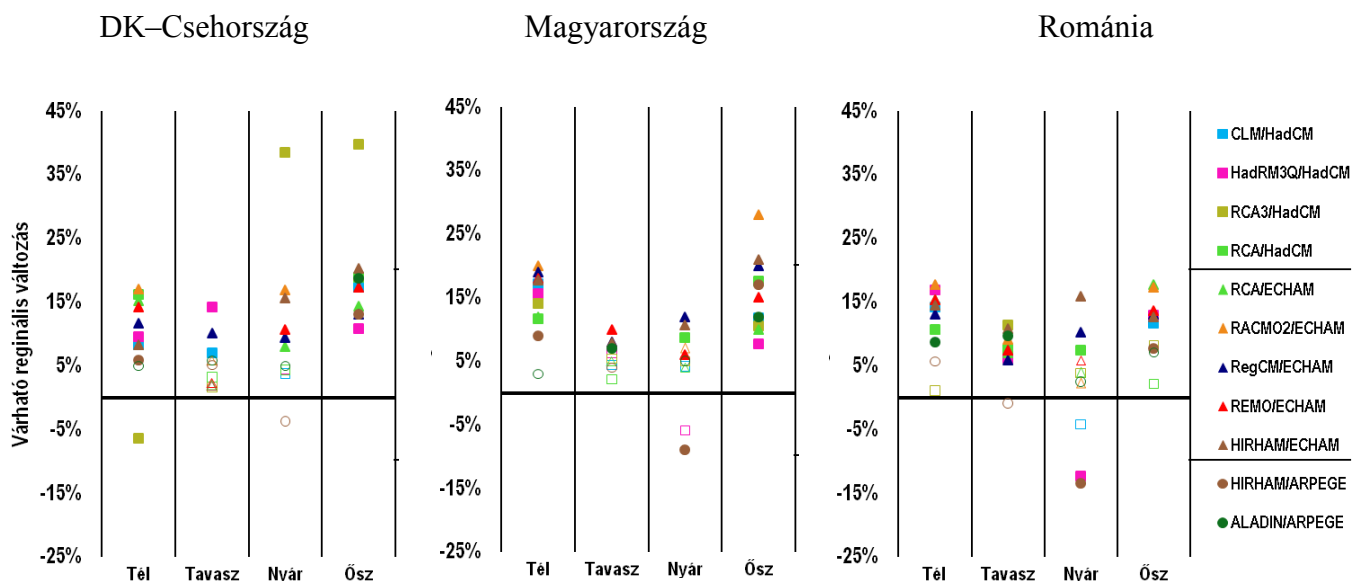
8. táblázat. Az SDII átlagos értékei (1961–1990) és a várható átlagos változás a teljes vizsgált területen

SDII	Tél	Tavas	Nyár	Ősz
1961–1990: átlagos érték (mm/nap) E-OBS alapján	4,31	5,02	6,59	5,79
Átlagos változás 2021–2050 időszakra	5%	5%	2%	9%
Átlagos változás 2071–2100 időszakra	11%	7%	1%	13%

A csapadékintenzitás várható évszakos változásainak térbeli szerkezete a 12. ábrán látható. Télen a közelebbi jövőben nem feltételezhető jelentősebb változás, de 2071–2100-ra már 10–12%-os növekedést prognosztizálnak a modellszimulációk a vizsgált terület egészére. Tavasszal 2021–2050-re szintén nem valószínűsíthető jelentősebb változás (8% alatt marad), ám az évszázad végén Horvátországban, Szerbiában, DNY–Ukrajnában és Románia egyes területein is 8%-ot meghaladó növekedésre számíthatunk. Nyáron a közelebbi jövőben nagyon kis mértékű változás feltételezhető. A távolabbi jövőben viszont DK–Csehországban átlagosan 9%-os növekedés, Horvátországban 5%-os, Szlovéniában és Szerbiában pedig 4%-os csökkenés valószínűsíthető. Ősszel már 2021–2050-ben is 8%-nál nagyobb növekedést várhatunk Szlovénia, Horvátország és Szlovákia középső részének kivételével, a távolabbi jövőben azonban a vizsgált terület egészén legalább 10%-os növekedés várható, amely Csehország és Ukrajna egyes területein a 20%-ot is meghaladhatja. A 13. ábrán láthatjuk, hogy télen mind a három kiemelt országban legalább kilenc szimuláció szignifikáns növekedést jelez (egy kivétel DK–Csehországban: az RCA3 szignifikáns csökkenést prognosztizál). Tavasszal és nyáron 5–15%-os növekedés valószínűsíthető a szignifikáns szimulációk szerint. Nyáron azonban hazánkban a HIRHAM/ARPEGE, Romániában pedig a HIRHAM/ARPEG és a HadRM3Q szignifikáns csökkenést jelez. DK–Csehországban és Magyarországon ősszel mind a 11, Romániában pedig nyolc klímaszimuláció szignifikáns (átlagosan 15%-os) növekedést prognosztizál.



12. ábra. Kompozit térkép a SDII index évszakonként várható relatív változásáról (%)
2021–2050-re és 2071–2100-ra a 11 RCM-szimuláció alapján.
Referencia időszak: 1961–1990



13. ábra. Az SDII várható átlagos változása DK-Csehországban, Magyarországon és Romániában a XXI. század végére (Referencia időszak: 1961–1990)

5. Összefoglalás

Vizsgálataink során kilenc regionális klímamodell napi csapadék outputjaiból számított indexeket elemeztünk Közép-Kelet-Európa térségére (é. sz. 43,625–50,625; k. h. 13,875–26,375) vonatkozóan. Az RCM-ek (ALADIN, CLM, HadRM3Q, HIRHAM, RACMO2, RCA, RCA3, RegCM, REMO) egységesen az A1B scenáriót alkalmazták, azonban a kezdeti- és peremfeltételeit három különböző GCM (ARPEGE, ECHAM, HadCM) szolgáltatta. Annak érdekében, hogy a valóságot minél jobban közelítő szimulációkkal dolgozhassunk, a modelleken elsőként egy hibakorrekciónak hajtottunk végre. Ezt követően végeztük el a nagy csapadékú napokra (RR10, RR20) és a csapadékintenzitásra (RX1, RX5, SDII) vonatkozó indexek számítását kilenc országra/régióra (Kelet–Ausztia, Délkelet–Csehország, Horvátország, Magyarország, Románia, Szerbia, Szlovákia, Szlovénia, Délnyugat–Ukrajna). Vizsgálatunk eredményeit táblázatok, diagramok és – a térbeli eloszlás ismertetésének céljából – térképek segítségével mutattuk be. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy hazánkban, és a környező országokban a XXI. század végén számíthatunk jelentősebb, szignifikáns változásokra. Télen és ősszel várhatóan meg fog növekedni a 10 mm-nél és a 20 mm-nél nagyobb csapadékú napok száma; nyáron pedig kisebb mértékű csökkenésre számíthatunk az RR10 és RR20 értékeiben. Az egy, illetve öt nap alatt lehullott maximális csapadékmennyiség, valamint a csapadékintenzitás várhatóan ősszel, télen és tavasszal is növekedni fog az általunk vizsgált terület egészén. Nyáron viszont a déli országokban (Horvátország, Szerbia) csökkenés valószínűsíthető az RX1, az RX5 és az SDII indexek értékeiben egyaránt.

Tehát a fentieket összegezve, az eredményeink megerősítik a korábban, más scenáriók (A2, B2) alkalmazásával, más modellszimulációk alapján (pl. Bartholy et al., 2008) kapott éghajlati tendenciákat a Közép–Kelet–Európa térségére vonatkozóan. Eszerint várhatóan mind a négy évszakban növekedni fog a csapadék intenzitása és a nagy csapadékú napok száma a jövőben, kivéve nyáron, amikor a déli országokban csökkenésre számíthatunk. A modellszimulációk alapján vázolt módosult éghajlati viszonyok változtatásokat követelhetnek meg például a mezőgazdasági termelésben. Ahhoz, hogy alkalmazkodni tudjunk az új körülményekhez, fontos, hogy a döntéshozók ismerjék a várható trendeket és időben kidolgozzák a megfelelő stratégiákat.

Köszönetnyilvánítás

Elsőként témavezetőmnek, Dr. Pongrácz Ritának fejezem ki köszönetemet, aki a munkánk során folyamatosan segítséget nyújtott, időt szánt rám, lelkiismeretesen irányította, rendkívül alaposan ellenőrizte és hasznos tanácsokkal fejlesztette a dolgozatot.

Köszönetemet szeretném még kifejezni Pieczka Ildikónak, aki rengeteg időt rám áldozva a programozási kérdésekben volt segítségemre.

Továbbá köszönet illeti Breuer Hajnalkát, aki a technikai problémákhoz nyújtott megoldást.

A dolgozathoz szükséges kutatásokat az alábbi pályázatok támogatták: az OTKA K-78125 számú pályázata, a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CCWATERS projekt (SEE/A/022/2.1/X), az SH/2/1 számú svájci-magyar közös kutatási program keretében megvalósuló Felső-Tisza árvíz megelőzési rendszer fejlesztési projektje, valamint az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával az „Európai Léptékkal a Tudásért, ELTE-TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. A felsőoktatás minőségének javítása a kutatás-fejlesztés-innováció-oktatás fejlesztésén keresztül” pályázat.

A dolgozatban felhasznált RCM-szimulációkat és az E-OBS adatbázist az ENSEMBLES projekt (<http://ensembles-eu.metoffice.com>, 505539) keretében állították elő, melyet az EU FP6 program támogatott. Az E-OBS adatbázis alapját képező állomási adatokat az ECA&D projekt (<http://eca.knmi.nl>) bocsátotta rendelkezésre.

Irodalomjegyzék

- Bartholy J., Pongrácz R., 2005a: Tendencies of extreme climate indices based on daily precipitation in the Carpathian Basin for the 20th century. *Időjárás*, 109. pp. 1-20.
- Bartholy J., Pongrácz R., 2005b: Néhány extrém éghajlati paraméter globális és a Kárpát-medencére számított tendenciája a XX. században. *AGRO-21 Füzetek*, 40. szám. pp. 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. pp. 83-95.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybo Gy., Szabo P., 2008: Analysis of expected climate change in the Carpathian basin using the PRUDENCE results. *Időjárás*, 112. pp. 249-264.
- Begert, M., Zenkusen, E., Haeberli, C., Appenzeller, C. és Klok, L., 2008: An automated homogenization procedure; performance assessment and application to a large European climate dataset. *Meteor. Zeitschrift*, 17. 5. pp. 663-672.
- van den Besselaar, E.J.M., Haylock, M. R., van der Schrier, G. és Klein Tank, A. M. G., 2011: A European Daily High-resolution Observational Gridded Data set of Sea Level Pressure. *J. Geophys. Res.*, 116. 11p. D11110, doi:10.1029/2010JD015468
- 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. pp. 1-6., doi:10.1007/s10584-006-9211-6.
- Christensen, O.B., Drews, M., Christensen, J., H., Dethloff, K., Ketelsen, K., Hebestadt, I. és Rinke, A., 2007: The HIRHAM Regional Climate Model Version 5 (beta). Technical Report 06-17, 22p.
- Collins, M., Booth, B. B. B., Bhaskaran, B., Harris, G. R., Murphy, J. M., Sexton, D. M. H., Webb, M. J., 2010: Climate model errors, feedbacks and forcings: a comparison of perturbed physics and multi-model ensembles. *Climate Dynamics*, 36. pp. 1737-1766., doi:10.1007/s00382-010-0808-0
- Déqué, M., Marquet, P., Jones, R. G., 1998: Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Climate Dynamics*, 14. pp. 173-189.
- Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57. pp. 16-26.
- Déqué, M., Rowell, D.P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J.H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., de Castro, M., van den Hurk, B., 2007: An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81. pp. 53-70.
- Dévényi D., Gulyás O., 1988: Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. – Tankönyvkiadó, Budapest. 443p.
- Dunne, S., Hanafin, J., Lynch, P., McGrath, R., Nishimura, E., Nolan, P., Ratnam, J. V., Semmler, T., Sweeney, C., Varghese S. and Wang S., 2008: Ireland in a Warmer World. 118p.

- Formayer, H., Haas, P., 2009: Correction of RegCM3 model output data using a rank matching approach applied on various meteorological parameters. In: Deliverable D3.2 RCM output localization methods (BOKU-contribution of the FP 6 CECILIA project) 11p.
- Gibelin A.L., Déqué, M., 2003: Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*, 20. pp. 327-339.
- Giorgi, F., Bi, X.Q., 2000: A study of internal variability of a regional climate model. *J. Geophys. Res.* 105(D24), pp. 29503-29521.
- Goodess, C., 2005: STARDEX Final Report. Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, United Kingdom, 24p.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C. A., Banks, H., Gregory, J. M., Johns, T. C., Mitchell, J. F. B., Wood, R. A., 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16. pp. 147-168.
- Halenka, T., 2008: Regional climate modeling activities in CECILIA project. *Időjárás*, 12. pp. III-IX.
- Hanson, C.E., Palutikof, J.P., Livermore, M.T.J., Barring, L., Bindi, M., Corte-Real, J., Durao, R., Giannakopoulos, C., Good, P., Holt, T., Kundzewicz, Z., Leckebusch, G.C., Moriondo, M., Radziejewski, M., Santos, J., Schlyter, P., Schwarb, M., Stjernquist, I., Ulbrich, U., 2007: Modelling the impact of climate extremes: an overview of the MICE project. *Climatic Change*, 81. pp. 163-177.
- Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D. and New, M., 2008: A European daily highresolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006., *J. Geophys. Res.*, 113. 12p. D20119, doi:10.1029/2008JD010201.
- Hofstra, N., Haylock, M., New, M., Jones, P.D., 2009: Testing E-OBS European high resolution gridded dataset of daily precipitation and surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 114. 16p. D21101, doi:10.1029/2009JD011799.
- Hofstra, N., New, M., McSweeney, C., 2010: The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in gridded daily data. *Clim.Dyn.*, 35. 841p., doi:10.1007/s00382-009-0698-1.
- Horváth, L., 2011: Reflexió Koppány György: „Kérdőjelek klímaügyben” című írásával kapcsolatban. *Légekör*, 56. pp. 130.
- IPCC, 1990: *Climate Change: The IPCC Impacts Assessment*. Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group II (Tegart, W.J. McG., Sheldon, G.W., Griffiths, D.C. eds.), Australian Government Publishing Service, Canberra, Australia. 294p.
- IPCC, 1995: *Climate Change 1995: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Watson, R. T., Zinyowera, M. C., Moss, R. H., Dokken, D. J. eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 880p.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

- Climate Change. (McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., White, K.S. eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- IPCC, 2007a: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Parry, M. L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden P.J., Hanson, C.E. eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 976p.
- IPCC, 2007b: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 996p.
- Jaeger, E.B., Anders, I., Lüthi, D., Rockel, B., Schar, C., Seneviratne, S. I., 2008: Analysis of ERA40-driven CLM simulations for Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 17, pp. 349-367.
- Jacob, D. és Podzun, R., 1997: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 63. pp. 119-129.
- Jacob, D., Kotova, L., Lorenz, P., Moseley, C., Pfeifer, S., 2008: Regional climate modelling activities in relation to the CLAVIER project. *Időjárás*, 112. pp. 141-153.
- Karl, T.R., Nicholls, N., Ghazi, A., 1999: Clivar/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. *Climatic Change*, 42. pp. 3-7.
- Kis, A., 2011: Csapadékindexek várható trendjei Magyarországon az ENSEMBLES szimulációk alapján. BSc szakdolgozat (témavezető: Dr. Pongrácz Rita), ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest 70p.
- Kis, A., 2012: Extrém csapadékindexek elemzése a Kárpát-medence térségére az ENSEMBLES klímaszimulációk korrigált csapadéksorai alapján. OFKD dolgozat (témavezető: Dr. Pongrácz Rita), 36p.
- Klok, E.J. és Klein Tank, A.M.G., 2009: Updated and extended European dataset of daily climate observations. *Int. J. Climatol.*, 29. 1182, doi:10.1002/joc.1779.
- van der Linden, P., Mitchell, J.F.B., 2009: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. 164p.
- Meijgaard, E. van, Ulft, L.H. van, Berg, W.J. van de, Bosveld, F.C., Hurk, B.J.J.M. van den, Lenderink, G., Siebesma, A.P., 2008: The KNMI regional atmospheric climate model RACMO version 2.1, Technical Report., 43p.
- MERIEXWA, 2012: <http://www.geo.u-szeged.hu/meriexwa/?q=hu/intro>
- Móring, A., 2011: A 2010. év időjárása. *Légkör*, 56. pp. 38-42.
- Móring, A., 2012: A 2011. év időjárása. *Légkör*, 57. pp. 38-42.
- Nakicenovic N., Swart R., eds., 2000: Emissions Scenarios. A special reports of IPCC Working Group III. Cambridge University Press, UK. 570p.
- Raisanen, J., Rummukainen, M., Ullerstig, A., 2001: Downscaling of greenhouse gas induced climate change in two GCMs with the Rossby Centre regional climate model for northern Europe. *Tellus*, 53. pp. 168-191.

Roeckner, E., Bauml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, L., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5, Part 1, MPI Report No. 349. 140p.