

Hazai és ENSEMBLES-beli regionális éghajlati modellek eredményeinek statisztikai vizsgálata

OTDK DOLGOZAT



Készítette:

Zsebeházi Gabriella

II. éves Meteorológus MSc hallgató

Természettudományi kar

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Témavezető:

Szépszó Gabriella

Országos Meteorológiai Szolgálat

Budapest, 2013

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Vizsgálatok.....	7
3. Eredmények.....	10
3.1. Validációs eredmények együttes áttekintése.....	10
3.2. Projekciók	14
A jövőre vonatkozó átlagos változások együttes kiértékelése.....	14
Hőmérsékleti szélsőségek várható változása	16
4. Összefoglalás.....	31
Köszönetnyilvánítás	33
Irodalomjegyzék.....	34

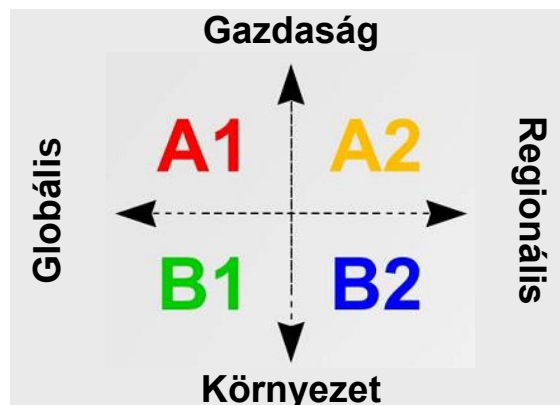
1. Bevezetés

Ma már vitathatatlan tény, hogy Földünk éghajlata eddig soha nem látott változáson megy keresztül, melynek előidézője elsősorban az emberi tevékenység. Az átlagos hőmérséklet- és csapadékváltozás mellett az extrém időjárási események gyakoriságnövekedése különösen szembetűnő. Hazánkban az utóbbi évtizedekben egyre többször lépi át a hőmérő higanyszála a 30 °C-ot, a hőségriadók száma is megnövekedett, ami különösen veszélyes az egészségre. A hideg éjszakák és fagyos napok száma viszont csökkent. A heves, hirtelen lezúduló, nagy károkat (villámlás, földcsuszamlás, árvíz) okozó esőzések is gyakoribbak, s növekedett a csapadékmentes napok száma, ami komoly problémát okoz a mezőgazdaságban. Ahhoz, hogy felkészüljünk a változások hatásaira, és megfelelő döntéseket hozzunk, az éghajlat globális és regionális skálán történő változásának ismerete szükséges.

Az éghajlati rendszer bonyolult működését éghajlati modellekkel tudjuk fizikailag megalapozott módon tanulmányozni. Az éghajlati rendszer egészét kapcsolt globális éghajlati modellekkel írhatjuk le, melyek az összes modell közül a legösszetettebbek. Ezen modellek használatosak a megváltozott éghajlati kényszer kiváltotta globális klímaváltozás becslésére. Mivel nem tudjuk pontosan megmondani, hogy a jövőben hogyan alakulnak az emberi tevékenység éghajlatra hatással bíró részletei, ezért forgatókönyveket készítenek, melyek különböző (optimista, pesszimista) képet festenek a világ gazdasági-társadalmi változásáról, amit az üvegházhatású gázok és aeroszol részecskék kibocsátásának mennyiségével és légköri koncentrációjával számszerűsítanak. A jelenleg használatban lévő ún. SRES (*Nakicenovic et al.*, 2000) forgatókönyvek között négy fő kibocsátási irányvonalat különböztetnek meg (1.1 ábra) az alapján, hogy a jövőben a gazdasági növekedés folytatódik (A), vagy inkább környezetkímélő technológiák bevezetésére (B) kerül sor, illetve bekövetkezhets-e a régiók közötti kiegyenlítődés (A1 és A2), vagy a technológiai fejlődés továbbra is elkülönülve zajlik az egyes régiókban (A2 és B2).

A kapcsolt globális klímamodellek horizontális rácsfelbontása napjainkban 100-300 km. Ezzel megbízhatóan képesek jellemezni az éghajlati rendszer nagy skálájú folyamatait, de ahhoz, hogy az éghajlatváltozásról lokális képet kaphassunk, a globális modelleredmények leskálázására van szükség. Ma a legelterjedtebb leskálázási módszer a regionális klímamodellezés (*Giorgi and Bates*, 1989), melynek során egy korlátos tartományú éghajlati modellt globális modellbe ágyazunk. A tartományon kívül zajló nagyskálájú folyamatokat, valamint a kezdeti feltételeket a globális modell eredményei adják meg. A

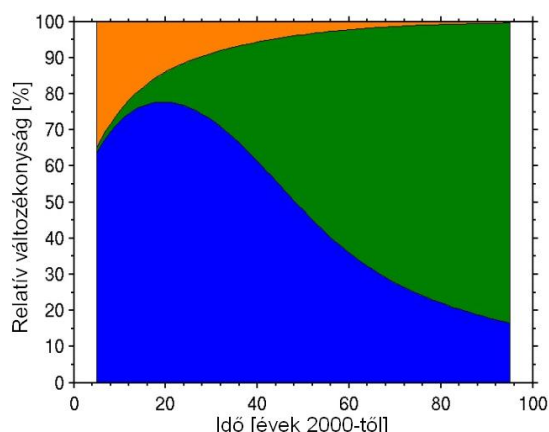
kiseb integrálási tartomány lehetővé teszi a regionális modellek felbontásának jelentős növelését (jelenleg 10-25 km).



1.1 ábra. A négy fő SRES kibocsátási forgatókönyv közötti alapvető különbségek

Az éghajlat folyamatainak és jövőbeli viselkedésének modellezése többféle bizonytalanságot rejt magában (1.2. ábra; illetve Hawkins and Sutton, 2009, 2011): (i) Az éghajlati rendszer szabad belső változékonysága (Götz, 2004), aminek köszönhetően az éghajlati rendszer külső kényszer nélkül is képes változni. Ezzel magyarázhatjuk a földtörténeti időkben többször lezajlott glaciális ciklusokat, de rövidebb időskálán egy az átlagosnál szárazabb, vagy nedvesebb év előfordulása is ennek köszönhető. (ii) A különböző feltételezéseken alapuló kibocsátási forgatókönyvek nagy eltéréseket okozhatnak a globális modelleredményekben. Ez a hatás azonban késleltetett: a forgatókönyvek eltéréseiből származó bizonytalanság csak hosszabb időskálán, az évszázad második felétől érezteti a hatását (1.2. ábra). (iii) A modellek közötti különbségek (az egyes modellek különböző módon írják le a fizikai folyamatokat, eltérő parametrizációkat és közelítéseket alkalmaznak). Az ebből adódó különbségek, valamint a regionális modellekben alkalmazott határfeltétel, a különböző rácsfelbontás és integrálási tartomány további bizonytalanságot jelent.

A fenti bizonytalanságok okán nem támaszkodhatunk egyetlen modelleredményre. Nagyon fontos, hogy több szimuláció készüljön ugyanazon területre, melyeket különböző modellekkel és forgatókönyvekkel hajtunk végre. Ezek összehasonlítása információt szolgáltat a projekció valószínűségéről (az éghajlat jövőbeli megváltozására kapott eredményeket – a bizonytalanságok miatt – nem előrejelzésnek, hanem éghajlati projekcióknak nevezzük). Ugyanis, ha a modellek adott tartományon és paraméterre jó egyezést mutatnak, akkor arra a területre, változóra nagy bizonyossággal tudunk információt adni a jövő klímaváltozásával kapcsolatban, míg az eltérő modelleredmények nagy bizonytalanságot sejtetnek.



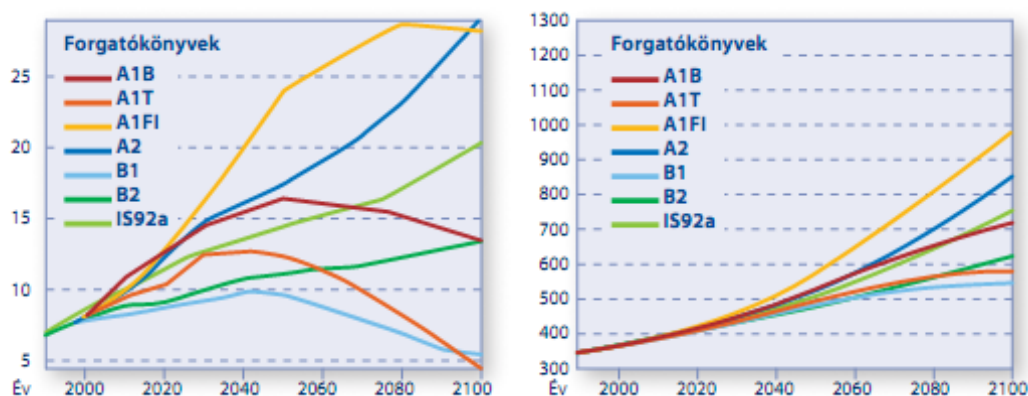
1.2. ábra. A globális éghajlati modell-szimulációkban rejlő három bizonytalansági tényező (szabad belső változékonyság (narancssárga), különböző forgatókönyv választás (zöld), modellek különbözősége (kék)) hozzájárulása %-os arányban a teljes bizonytalansághoz a globális átlaghőmérsékletet tekintve a 2000–2100 időszakon (Hawkins and Sutton, 2009).

A bizonytalanságok összetett vizsgálata és a több modellkísérlet együttes megvalósítása érdekében több európai együttműködés jött létre, köztük elsőként a PRUDENCE projekt (Christensen, 2005). A projekt célja volt több regionális klíma-szimuláció végrehajtása az évszázad végére, ezenkívül a szélsőséges időjárási események jövőben történő megváltozásának megbízható becslését szintén fontosnak tartották. Ezt követte a 2004-2009 között zajlott ENSEMBLES projekt (van der Linden et al., 2009). Míg a PRUDENCE projektben főként a modellek validálásán volt a hangsúly (azaz annak vizsgálatán, hogy mennyire képes a múlt éghajlatát jellemezni), addig az ENSEMBLES projekt során már konkrét módszereket dolgoztak ki a modelleredmények együttes vizsgálatára. A projekt céljai a következők voltak:

- Európát lefedő rácsponti megfigyelési adatbázis létrehozása a nemzeti mérési adatok felhasználásával, ennek eredményeként jött létre az ún. ECA (European Climate Assessment) adatbázis (Haylock et al., 2008), amelyet mi is használtunk a validációs vizsgálataink elvégzéséhez.
- Jövőbeli projekciók készítése a legújabb, nagyfelbontású, Európában fejlesztett globális és regionális modellekkel, s átfogó ensemble vizsgálati módszer kidolgozása, hogy számszerűsítsék az éghajlati rendszer modellezésében lévő bizonytalanságokat.

Az ENSEMBLES projektben tizenöt intézet futtatott regionális klímamodelleket 25 km-es horizontális felbontáson, amelyeknek öt globális modell szolgáltatja a kezdeti és határfeltételeket. Összesen 25 RCM/GCM kombinációval végeztek a teljes XXI. századot lefedő szimulációkat. Az elvégzett modellkísérletek többsége tehát 2100-ig terjedt, viszont a projektben elsősorban a 2021–2050 időszakra várható változások feltérképezésére

koncentráltak. Ezen az időtávon a modellek eltéréseiből származik a szimulációk bizonytalanságának nagy része, ezért a projektben egyetlen forgatókönyvet választottak: a globális modellekben a sugárzási kényszer az A1B scenárió szerint alakult, mely egy „átlagos” forgatókönyv az optimista és a pesszimista scenáriók között (1.3 ábra).



1.3. ábra. A XXI. század folyamán a szén-dioxid globális kibocsátásának [Gt C/év] (bal oldali ábra) és légköri koncentrációjának [ppm] (jobb oldali ábra) alakulása a SRES kibocsátási forgatókönyvek alapján (Forrás: IPCC TAR, 2001).

Hazánkban 2004 óta foglalkoznak regionális klímamodellezéssel, melynek keretében az Országos Meteorológiai Szolgálatnál két modellt adaptáltak: az ALADIN-Climate 4.5 és REMO 5.0 regionális éghajlati modelleket. E modellekkel első lépésben a múltra végeztek szimulációkat, hogy információt kapjanak arról, hogy mennyire képesek a Kárpát-medence éghajlati viszonyait reprezentálni, majd ezt követően 10 illetve 25 km-es felbontással a jövőre vonatkozó klímaprojekciók készültek el hazánkban. Ezeket a modelleket az ENSEMBLES projekt keretein belül is futtatták más tartományon, eltérő rácsfelbontással, illetve különböző modellverzióval, ezért a továbbiakban ezek vizsgálatával fogunk részletesen foglalkozni.

A dolgozat célja, hogy az ALADIN és REMO modellekből alkotott mini-ensemble alapján éghajlatváltozási forgatókönyvet készítsünk Európa, különös tekintettel a Kárpát-medence térségére. A modellek validálása, illetve a jövőre várható átlagos hőmérséklet- és csapadékváltozások tendenciái szakdolgozat (Zsebeházi, 2011), illetve tudományos diákköri dolgozat (Zsebeházi, 2012) keretében részletes bemutatásra került. Kutatásainkat a szélsőségek és a különböző éghajlati indexek vizsgálatával folytattuk a modelleredmények alapján. Jelen dolgozatban a hőmérsékleti szélsőségek XXI. század során várható változására kapott eredményeinket mutatom be.

2. Vizsgálatok

Az ENSEMBLES modellek közül a hazai eredményekkel való összehasonlítás érdekében a következő két modell került kiválasztásra: a francia meteorológiai szolgálatnál fejlesztett és futtatott ALADIN-Climate 4.5 és 5.1 verziója, valamint a hamburgi Max Planck Intézet REMO 5.7 modellje. A modellek és az elvégzett kísérletek részleteiről a *2.1. táblázat* szolgál információval. Mint látható, az ALADIN esetében a 4.5 modellverzió megegyezik a magyarországi adaptációval. A REMO határfeltételeit az ECHAM5/MPI-OM kapcsolt globális klímamodell, míg az ALADIN határfeltételeit az ARPEGE-Climat általános légköri klímamodell szolgáltatta. Az ENSEMBLES projektben 25 km-es horizontális felbontással Európa területére készültek futtatások. Az ALADIN modellt hazánkban 25 és 10 km-es felbontással futtatták, előbbi Közép- és Kelet-Európa, utóbbit a Kárpát-medence térségére, míg a REMO modellt 25 km-es horizontális felbontással Közép- és Kelet Európára futtatták (*2.1. ábra*). Mindegyik modellel 2100-ig terjedő modell-szimulációk készültek. Ez alól kivételt képez az ENSEMBLES-beli ALADIN 4.5 verziója, amelynél mindössze 2050-ig történtek futtatások. A jövőbeli projekciók készítésekor mindegyik futtatásnál az átlagosnak tekinthető A1B forgatókönyvet használták.

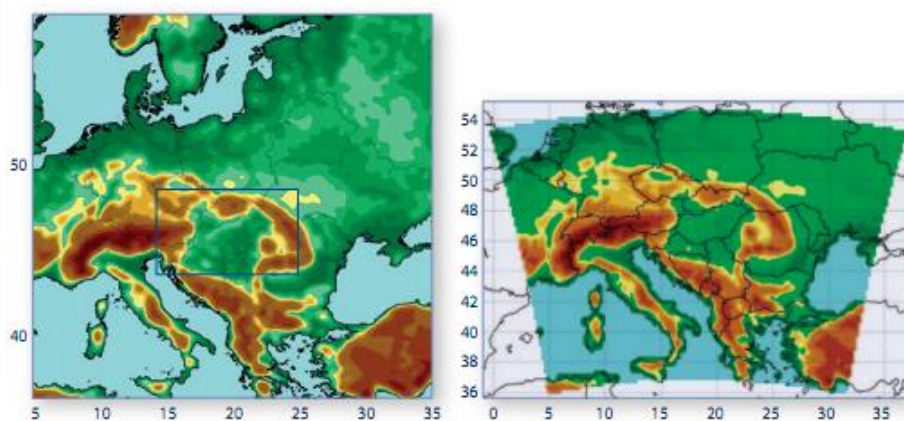
Mielőtt a modellek jövőre történő szimulációit megkezdik, validálni kell azokat, azaz egy hosszabb múltbeli időszakra futtatni őket és a kísérlet eredményeit összehasonlítani megfigyelésekkel. Ennek során felmérhetők a modellek gyengeségei: mely meteorológiai változókat képes megbízhatóan becsülni, illetve képes-e visszaadni a vizsgált tartomány éghajlati viszonyait. Jelen munkában egyrészt a már korábban elvégzett validációs eredmények tömör, de átfogó összefoglalását mutatom be, amihez egy jó megjelenítési eszközt nyújt a Taylor diagram (*Taylor, 2000*). A jövőre vonatkozó modelleredményeket a 2021–2050, illetve 2071–2100 időszakra értékeltem ki, az 1961–1990 időszak adott modellátlagaihoz viszonyítva a változásokat. Az átlaghőmérséklet és csapadékösszeg tekintetében a hazánk területére vonatkozó modelleredményeket együttesen mutatom be, eltekintve attól, hogy melyik modellhez melyik érték tartozik. E módszerrel információt kaphatunk a hazánkban várható éghajlatváltozás bizonytalanságáról.

2.1. táblázat. A dolgozatban vizsgált modellek és modellkísérletek jellemzői. A kísérletek elnevezésében (alsó sor) sorrendben a regionális modell, a határfeltétel, a regionális modell verziója és felbontása szerepel.

	ENSEMBLES kísérletek			Hazai kísérletek		
	ALADIN-Climate		REMO	ALADIN-Climate	REMO	
Verzió	4.5	5.1	5.7	4.5	5.0	
Intézet	Météo France	Météo France	Max Planck Intézet	OMSZ		OMSZ
Felbontás	25 km	25 km	25 km	25 km	10 km	25 km
Tartomány	Európa	Európa	Európa	Közép- és Kelet-Európa	Kárpát-medence	Közép- és Kelet-Európa
Időszak	1951–2050	1951–2100	1951–2100	1961-2000	1961-2100	1951–2100
Határfeltételek	ERA-40 és ARPEGE-Climate	ARPEGE-Climate	ERA-40 és ECHAM5/MPI-OM	ERA-40	ERA-40 és ARPEGE-Climate	ERA-40 és ECHAM5/MPI-OM
Jelölés	ALAD_ER_4.5_25 ALAD_AR_4.5_25	ALAD_AR_5.1_25	REMO_ER_5.7_25 REMO_EC_5.7_25	ALAD_ER_4.5_25 ALAD_ER_4.5_10 ALAD_AR_4.5_10		REMO_ER_5.0_25 REMO_EC_5.0_25

A hőmérsékleti szélsőségek elemzéséhez klímaindexeket használtam, amelyek egy adott időszak során bekövetkező azon napok vagy események számát adják meg, amikor a napi minimum-, maximum- vagy átlaghőmérséklet egy adott küszöb felett vagy alatt van. A vizsgálatok elvégzéséhez a következő indexeket tekintettem: a meleg hőmérsékletek előfordulási gyakoriságának elemzéséhez a nyári napok (SU), hőségnapok (TX30GT), hóhullámos napok (HWDI) és trópusi éjszakák (TN) számát vizsgáltam, míg a hideg és extrém hideg napok előfordulási gyakoriságát a fagyos (FD) és zord napok (TN-10LT) száma írja le (2.2. táblázat).

A Taylor diagramot az R-programcsomag segítségével állítottam elő, a napi hőmérsékletek fent említett indexek alapján történő vizsgálatát a CDO (Climate Data Operators) program segítségével végeztem el.



2.1. ábra. A modellek integrálási tartományai: fent az ENSEMBLES modellek, lent balra a 25 km-es (teljes panel), illetve 10 km-es (kék téglalap) felbontású ALADIN-Climat, jobbra a 25 km-es felbontású REMO modell által lefedett területek.

2.2 táblázat. A szélsőséges hőmérsékletek vizsgálatában elemzett klímaindexek

Hőmérsékleti indexek	Index jele	Index neve	Definíció	Mértékegység
	SU	Nyári napok száma	$T_{max} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	TX30GT	Hőségnapok száma	$T_{max} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	HWDI	Másodfokú hőhullámok száma	Tátlag $> 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ legalább 3 napig	esemény száma
	TN	Trópusi éjszakák száma	$T_{min} > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	FD	Fagyos napok száma	$T_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	TN-10LT	Zord napok száma	$T_{min} < -10\text{ }^{\circ}\text{C}$	nap

3. Eredmények

3.1. Validációs eredmények együttes áttekintése

A modellek múltbeli időszakon való tesztelése során kétféle szimulációt vizsgálnak:

1. Egyrészt a regionális modellek számára szükséges határfeltételeket szolgáltathatja egy a múltra rendelkezésre álló különböző mérések és rövidtávú előrejelzések segítségével előállított ún. re-analízis adatbázis. A leggyakrabban használt ilyen globális adatbázis az ERA-40 (*Simmons and Gibson, 2000*). Az így futtatott modellkísérlet határfeltétel mezői „tökéletesnek” mondhatók (a megfigyelések miatt), ezért a kapott eredmények elsősorban a regionális modellek hibájáról nyújtanak információt.
2. Másrészt szükséges a regionális klímamodellek globális éghajlati modelledmények felhasználásával végrehajtott szimulációinak múltra vonatkozó vizsgálata is, mivel a klíma-projekciók során a határfeltételeket már csak globális éghajlati modellek szolgáltathatják. Ezért fontos tudni, hogy e határfeltételek pontatlansága milyen további hibával terheli a regionális eredményeket.

A validáció elvégzéséhez nélkülözhetetlen a jó minőségű, finom felbontású, rácsponti megfigyelés. Ezért a modelledményeket a 25 km-es felbontású ECA 3.0 (European Climate Assessment vagy E-OBS adatok; *Haylock et al., 2008*) rácsponti megfigyelési adatbázissal hasonlítottam össze.

A vizsgálat során Taylor diagramot készítettem a modelledmények havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg adatait felhasználva. A Taylor diagram egy komplex szemléltető eszköz, amely több statisztikai jellemző együttes megjelenítésével ad átfogó információt a modellek „jóságáról” (3.1.1. és 3.1.2. ábra). A diagramon sugárirányban a modelledmények relatív szórását olvashatjuk le a megfigyelési (referencia) adatsorhoz viszonyítva. Így ha a modell-szimuláció szórása megegyezik a megfigyelés szórásával, akkor a diagramon az 1-nél helyezkedik el a jelölő. A vízszintes tengellyel bezárt szög koszinusza a szimuláció és a referencia adatsor közötti korrelációs együtthatót adja meg, mely minél inkább közelíti az egyet, annál erősebb a kapcsolat a megfigyelési és a szimulációs adatsor között. A megfigyeléstől (az ábrán fekete x jelöli) vett koncentrikus körök a centrált négyzetes hibát (a négyzetes hibát az összehasonlítandó adatsorok átlaguktól való eltéréséből számítjuk) jelzik. A négyzetes hiba annál kisebb, minél közelebb található a jelölő a megfigyeléshez. A diagramon háromszögek jelölik az OMSZ, míg körök az ENSEMBLES

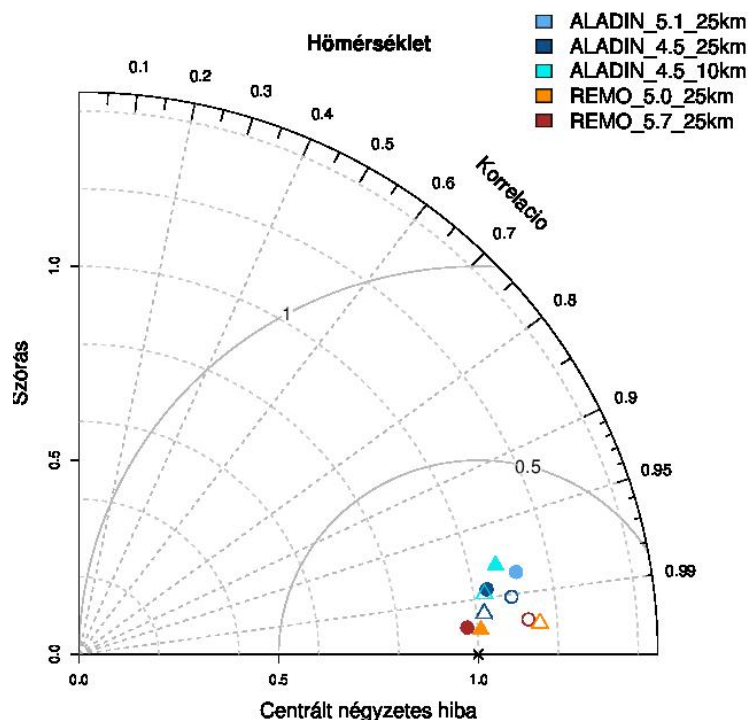
modelljeit, az ERA-40 meghajtású modellverziókat üres, míg a globális modellek szolgáltatva peremfeltételekkel futtatott kísérleteket teli jelölő szemlélteti. Az ábrákon a modellek 1961-1990 időszakra vonatkozó havi magyarországi átlaghőmérsékleteiből és csapadékösszegeiből számított statisztikák szerepelnek.

A diagramon a modellek annál jobban reprezentálják a múltbeli éghajlati viszonyokat, minél közelebb helyezkednek el a jelölők a megfigyeléshez. Ezen elv alapján az ECHAM globális modell meghajtotta REMO mindkét verziója (5.0 és 5.7) az összes modellt tekintve a legjobban adja vissza a hőmérséklet múltbeli alakulását (3.1.1. ábra). Az ALADIN modellcsaládból az OMSZ ERA-40 meghajtású 25km-es felbontású modellje teljesít a legjobban, az ARPEGE meghajtotta hazai futtatású, 10 km-es felbontású, illetve az ENSEMBLES 5.1 verziójú modellek viszont az ECA megfigyelési adatsortól leginkább eltérőnek bizonyultak.

Az egyes statisztikai jellemzőket részletesebben tanulmányozva az ALADIN modellcsalád esetében elmondható, hogy a megfigyelési adatsor évi menetét a hazai, ERA-40 meghajtású 25 km-es felbontású modellverzió közelíti leginkább (a magas korreláció miatt), s ezen futtatás mind a szórást, mind a négyzetes hibát tekintve a legjobbnak mondható. Az évi menetet a 10 km-es felbontású 4.5 verziójú ARPEGE meghajtotta verzió képes legkevésbé visszaadni (hozzá tartozik a legkisebb korrelációs érték), s ez a legnagyobb hibával terhelt modell is (a modell különösen az átmeneti évszakokban alulbecsli a hőmérsékletet). E gyengébb viselkedés oka a túl kicsinek választott tartományban kereshető (Csima and Horányi, 2008). A francia meteorológiai szolgálat újabb, 5.1 verziójú modellje a korábbi 4.5 verziójú modellhez képest gyengébben teljesít az összes statisztikát tekintve. A 4.5 verzió két ENSEMBLES kísérlete közül az ARPEGE meghajtással pontosabb éven belüli változékonyságot (azaz szórást) kapunk, az évi menetet viszont valamelyest gyengébben írja le.

A REMO futtatások a legjobban reprezentálják a múltbeli hőmérséklet évi menetét (mivel a korreláció a leginkább közelíti az egyet), sőt az ECHAM meghajtással a modellek négyzetes hibája közelíti a nullát, szórásuk pedig szinte megegyezik a megfigyelés szórásával. Az ERA-40 meghajtással elromlik a havi hőmérsékleti értékek becslése, ami a szórás felülbecslésében és a négyzetes hiba növekedésében látható. Ez azzal magyarázható, hogy a REMO modell a leskálázás során egy járulékos melegedést vezet be a tökéletesnek mondható peremfeltételek mezőibe, s ennek mértéke nyáron a legjelentősebb (ettől nagyobb a modellbeli változékonyság a megfigyelthez képest). A Kárpát-medence felett viszont az

ECHAM modell alacsonyabb hőmérsékletet ad a valóságnál, s az ehhez hozzáadott REMO általi melegítés eliminálja az ECHAM hibáját (Szépszó and Horányi, 2008).

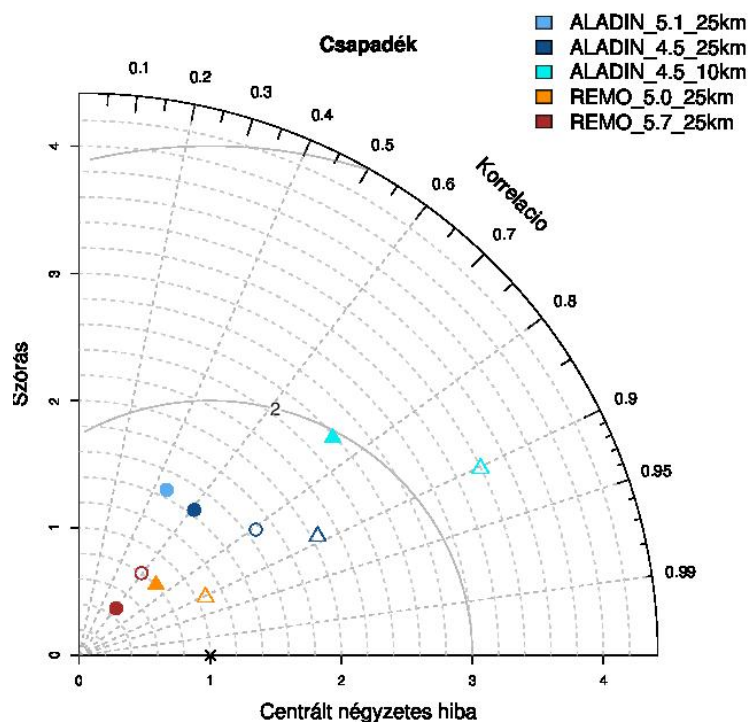


3.1.1. ábra. A hazai (háromszög) és ENSEMBLES projektbeli (kör) ERA-40 (üres) és GCM (teli) meghajtású ALADIN és REMO regionális modelleredmények 1961-1990 időszakra vonatkozó Magyarország feletti havi átlaghőmérsékleteiből készített Taylor diagram.

A csapadék validációja esetében a statisztikákat együttesen tekintve a hazai futtatású REMO ERA-40 meghajtású modellverziója bizonyult a legjobbnak (3.1.2. ábra). Ellenben a szintén hazai, re-analízis meghajtotta ALADIN 10 km-es felbontású verziója a leggyengébben teljesített.

Az ALADIN modellcsaládból a hazai 10 és 25 km-es felbontású re-analízis meghajtású verziók jól reprezentálják a csapadék évi menetét, viszont a havi csapadékösszegeket és a megfigyelés szórását csak nagy hibával (mindkettőt felülbecsléssel) képesek visszaadni (különösen a 10 km-es felbontású futtatás). Tehát ahogy a hőmérsékletnél, a csapadék tekintetében is a hazai 10 km-es felbontású modellverzió mutatja a legnagyobb hibákat, az ARPEGE határfeltételekkel még rosszabb eredményeket produkál a modell, mint a re-analízisekből kiindulva. Ez – mint már korábban említettem – a finom felbontáshoz választott tartomány túl kis méretének köszönhető. Az ENSEMBLES eredményei és a megfigyelés közötti korreláció alacsonyabb volt, a szórást tekintve viszont mindenképpen jobbnak bizonyultak a hazai modellverzióknál. A négyzetes hiba tekintetében átlagosnak mondhatók, hiszen csupán az OMSZ 10 km-es felbontású modellje tűnik ki nagy hibáival. Az

alacsony korrelációs értékből ítélve az újabb 5.1 verzió az összes modellt tekintve a leggyengébben jellemzi a csapadék évi menetét.



3.1.2. ábra. A hazai (háromszög) és ENSEMBLES projektbeli (kör) ERA-40 (üres) és GCM (teli) meghajtású ALADIN és REMO regionális modelleredmények 1961-1990 időszakra vonatkozó Magyarország feletti havi csapadékösszegeiből készített Taylor diagram.

Mindkét REMO modellverziót tekintve a globális modell meghajtásával a csapadék múltra vonatkozó szimulációi a re-analízis adta peremfeltételhez képest elromlanak (az évi eloszlás a valóságosnál kiegyenlítettebb, egy kisebb nyári maximummal), ami a korreláció 0,6 és 0,7 közötti értéke mellett a relatív szórás egynél kisebb értékében is megmutatkozik. Ha összehasonlítjuk a kétféle peremfeltétellel készült modelleredményeket, észrevehetjük, hogy az ENSEMBLES 5.7 verziója, az évi menetet mindkét meghajtással ugyanolyan mértékben képes reprodukálni (a megfigyelés és a modelleredmények közötti korrelációs együttható mindössze 0,6), ellenben a szórás már jelentősen különbözik. A hazai 5.0 modellverziót illetően, a kétféle peremfeltétellel történt futtatás mindhárom statisztikai jellemzőben eltérően viselkedik. Az évi menetet és változékonyságot, a re-analízis meghajtású modellváltozat jobban adja vissza, s az ECHAM globális modell meghajtásával készült eredmények nagyobb hibával is terheltek, mint a re-analízis mezővel végrehajtott futtatás (s korábbi vizsgálatokból tudjuk, hogy a különböző peremfeltételekkel eltérő előjelű hibák jelentkeztek). Ez azzal magyarázható, hogy a regionális modell általában több csapadékot eredményez, mint az ECHAM globális modell. Ez a többlet az ERA-40 jelentősen száraz mezőivel

kölcsönhatásban alábecslést, míg a nedvesebb ECHAM mezőkkel fölébecslést eredményez (Szépszó, 2011).

Összefoglalásként elmondható, hogy mindkét változó esetében a REMO eredményei adták vissza legpontosabban a megfigyelés havi átlagértékeit, a csapadék szimulálásában pedig különösen jónak bizonyult a hazai ERA-40 meghajtású modellverzió. Az ALADIN modellcsaládból az OMSZ 4.5 verziójú re-analízis meghajtotta eredményei a hőmérséklet tekintetében jól viselkedett, a csapadékot viszont már átlagosan reprezentálta az ENSEMBLES eredményeihez képest. Az ENSEMBLES 5.1 verziójú modellje több tekintetben gyengébbnek minősült a korábbi 4.5 változatnál, ami azzal magyarázható, hogy a modellben a felszín-légkör folyamatok leírására egy új módszert alkalmaztak. A 4.5 verzióban a mélyebb talajrétegek nedvességét még mesterségesen igazították a valós állapothoz („relaxálták”), az 5.1 modellváltozatban azonban ezt már a fejlesztések szükségtelenné tették, viszont ezzel az eredmények Magyarország felett némileg elmaradtak a korábbiaktól (ettől függetlenül az új modell mindenképpen fejlettebbnek mondható, hisz nincs szükség a mesterséges relaxációra). A hazai modelleredmények közül a 10 km-es felbontású futtatás bizonyult a leggyengébbnek, amely a finomabb felbontáshoz választott tartomány méretével magyarázható.

3.2. Projekciók

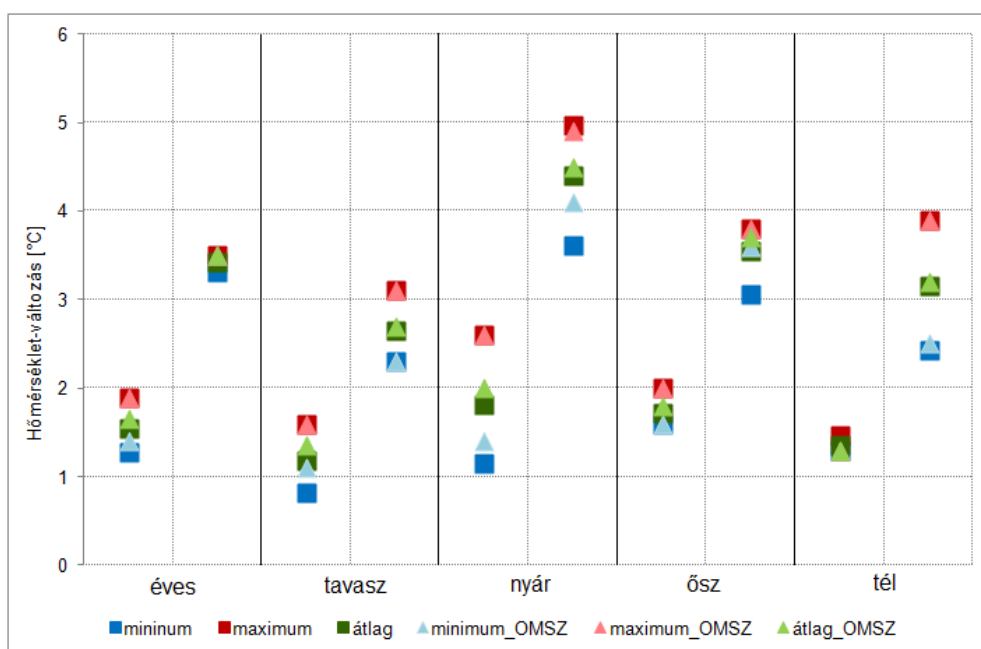
A dolgozat ezen része bemutatja, hogy a regionális klímamodellek becslései alapján a jövőben milyen változások várhatók Európa éghajlatában, különös tekintettel a Kárpát-medence területére. A 2021–2050, illetve 2071–2100 időszakokra előállt modelleredményeket nem a megfigyelési adatbázishoz, hanem a modellfuttatások 1961–1990 közötti normálidőszakra (referencia-időszakra) számított átlagértékeihez viszonyítottam. Ennek előnye, hogy ha feltételezzük, a modellekben rejlő hibák az idő folyamán nem változnak, akkor e különbségképzéssel azok kiküszöbölhetők.

A jövőre vonatkozó átlagos változások együttes kiértékelése

A hőmérsékletre és csapadékra vonatkozó átlagos változásokat Magyarországra együttesen mutatom be, eltekintve attól, hogy melyik érték melyik modellhez tartozik. Ennek létjogosultsága az, hogy mindegyik modell az éghajlat valószínű múltbeli viszonyait és egy

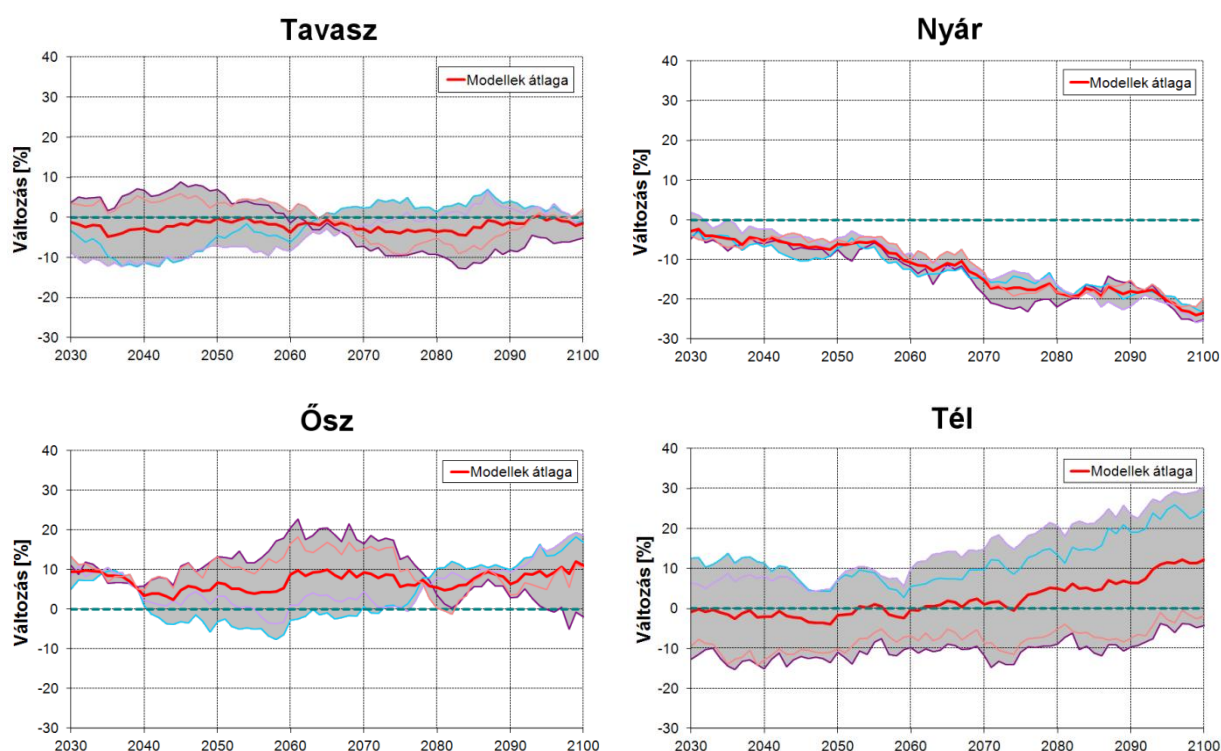
egyforma valószínűséggel lehetséges jövőbeli arculatát festi le. Az eredmények ilyen formában való összegzése a hazánkban alkalmazott modellek átlagos gyengeségeiről, valamint a várható változások bizonytalanságairól ad átfogó képet. A jövőbeli változásokat a 2021–2050, illetve a 2071–2100 időszakra számítottam ki Magyarország területére, s referenciaként minden esetben az adott modellel 1961–1990-re kapott átlagot tekintettem.

A jövőre vonatkozó eredmények együttes kiértékelésénél az ENSEMBLES ALADIN modelljei közül csak az újabb (5.1) verziót tekintettem annak érdekében, hogy a két időszak során megegyező számú modell alkossa a mini-ensemble rendszerünket. A modellek egybehangzóan a magyarországi átlaghőmérséklet növekedését mutatják (3.2.1. ábra), s az évszázad végére minden évszakban a változás mértéke kb. kétszerese a 2021–2050 időszakra vonatkozó értékeknek. A legnagyobb mértékű melegedés mindkét időszakban nyáron várható, viszont ennek mértéke igen bizonytalan (együttesen tekintve a hazai és az ENSEMBLES-beli eredményeket a közeljövőre 1,2–2,6°C, míg az évszázad végére 3,6–5°C). Az évszázad első felében a modellek még kis szórással jellemezték a téli várható átlagos hőmérséklet-változást (1,3–1,5°C), azonban az évszázad végére jóval nagyobb bizonytalanság övezi ebben az évszakban a melegedés mértékét (2,4–3,9°C). Az éves átlagok esetében az évszázad végére nagyobb egyetértés látszódik a modellek között. Az ENSEMBLES eredmények hozzáadása a hazai mini-ensemble eredményeihez kis mértékben szélesítette a várható változás intervallumát (a bizonytalanságot) minden évszakban és mindkét időszakon.



3.2.1. ábra. Magyarországra vonatkozó éves és évszakai átlaghőmérséklet [°C] változása a 2021–2050 (első oszlop) és 2071–2100 időszakon (második oszlop) a hazai és ENSEMBLES-beli modelleredmények (négyzetek), illetve csak a hazai eredmények (háromszögek) alapján. Referencia: 1961–1990 modellátlagok.

A csapadék változásánál (3.2.2. ábra) a tavaszi átlagokat tekintve két-két modell az időszak során ellentétesen viselkedik: azok, amelyek az évszázad elején csapadékcsökkenést jeleztek, az évszázad végére kismértékű növekedésbe váltanak át, míg a másik két modell ennek pont az ellenkezőjét mutatja – átlagukat tekintve azonban az egész időszak során 5%-ot nem meghaladó negatív változást láthatunk. Nyáron a modellek igen markáns csökkenést jeleznek, mely az évszázad második felére tovább erősödik. Ősszel az egész időszak folyamán a modellek átlaga pozitív változást mutat. A téli évszakban az évszázad első felében két modell nedvesedést, kettő pedig szárazodást jelez, ezáltal az átlaguk nulla környékén mozog. Az évszázad végére azonban a csökkenést mutató két modellben is ennek gyengülése látszódik, mindazonáltal a változás előjele ebben az évszakban a legbizonytalanabb.



3.2.2. ábra Magyarországra vonatkozó évszakos csapadékösszeg alakulása [%] a hazai és ENSEMBLES-beli modelleredmények alapján, a 2000–2100 időszakon számított csúsztatott 30-éves átlagok alapján. Referencia: 1961–1990 modellátlagok.

Hőmérsékleti szélsőségek várható változása

A hőmérsékleti szélsőségek változásának iránya minden vizsgált modell szerint egyértelmű, azaz a jövőben a pozitív hőmérsékleti extrémumok számának növekedésére, míg a hideg szélsőségek ritkább megjelenésére számíthatunk, és a változás mértéke az évszázad

végére fokozódik. A számított indexek előfordulási gyakorisága és a változás térbeli eloszlása kis mértékben ugyan, de különbözőek az egyes modellekben és verziókban.

A szélsőséges hőmérsékleti értékek és események változásának térbeli eloszlását bemutató ábrákon (3.2.3., 3.2.5., 3.2.6., 3.2.7., 3.2.8., 3.2.10. *ábra*) jól megfigyelhető az indexbeli változás zonalitása. A meleg és extrém meleg hőmérsékletek gyakoriságát vizsgáló indexek (nyári nap, hőség nap, hóhullámos nap, trópusi éjszaka) az ALADIN eredményeiben ÉNy – DK, míg a REMO változástérképein É – D irányban egyre nagyobb növekvő tendenciát mutatnak, ellenben a hideg és extrém hideg hőmérsékletek indexeit (fagyos nap, zord nap) tekintve – mindkét modellverzió szerint – a legnagyobb változások az ÉK-i területeken és a magashegységekben valószínűsíthetők. A térbeli eloszlások ezen struktúrája megfigyelhető volt a nyári illetve téli átlaghőmérséklet-változások térbeli eloszlásainál is (Zsebeházi, 2012). Az ENSEMBLES-beli ALADIN két verzióját összehasonlítva (ezt csak a 2021-2050 időszakra tehetjük meg, mivel a 4.5 verzió integrálását csak a közeljövőig végezték el), a meleg hőmérsékleti indexek esetén az intenzívebb változást a korábbi 4.5 verzió jelzi, míg a fagyos és zord napok tekintetében az 5.1 verzió mutat nagyobb mértékű csökkenést. A hazai ALADIN finomabb felbontásának köszönhetően az extrémumok térben változékonyabbak, és minden esetben jól kirajzolódnak a magasabb hegységek, ahol a meleg szélsőségekben szinte alig jelentkezik változás. A hazai és ENSEMBLES-beli REMO eredményei között nagyobb hasonlóság jelentkezik (általában a hazai modell mutat kissé nagyobb változást), mint az ALADIN verziói között. A két vizsgált modell változástérképei alapján a REMO szimulációi legtöbbször mérsékeltebb változást jeleznek, mint az ALADIN futtatások (ez a megállapítás mindkét időszakon érvényes). Európa magashegységeiben (Alpok, Kárpátok, Pireneusok), valamint az Északi- és Balti-tengeren a meleg hőmérsékletek előfordulása kis mértékben (vagy egyáltalán nem) növekszik, de ez nem meglepő, mivel ezeken a területeken a napi hőmérsékleti értékek ritkán lépik át az elemzett küszöbértékeket. A továbbiakban tekintsük át egyenként az egyes hőmérsékleti indexekre kapott eredményeket.

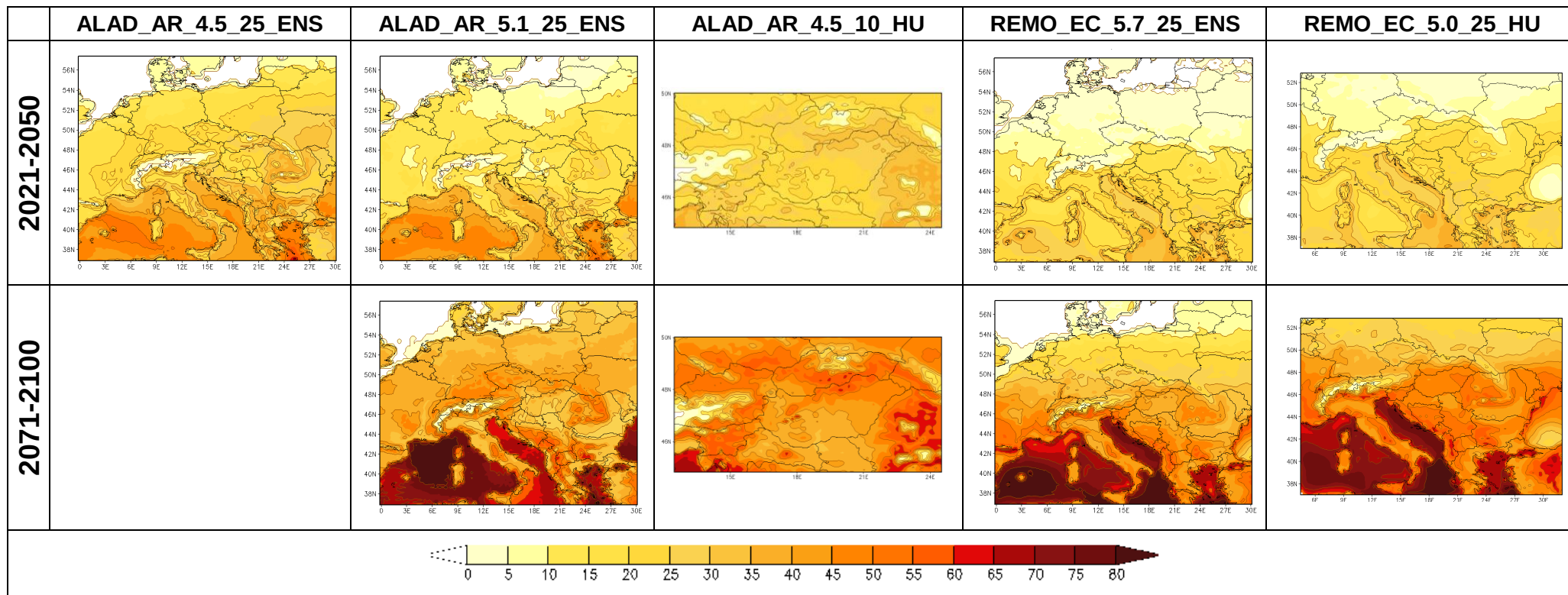
A nyári napok (napi maximumhőmérséklet meghaladja a 25 °C-ot) gyakorisága a Földközi-tengerben mutatja a legnagyobb növekedést (3.2.3. *ábra*), de a szárazföld bizonyos részein is elérhet 50 napos változást az évszázad végére. Az Alpok és a Kárpátok kis értékeikkel emelkednek ki a környező területek közül, a magas hegységektől északra pedig fokozatosan csökkenő mértékű a gyakoriságnövekedés.

Magyarországon a nyári napok általában májustól szeptemberig jelentkeznek. Kialakulásában a kontinentális hatás és a tengerszint feletti magasság mellett szerepet játszik a talajtípus is (Magyarország éghajlati atlasza, 2003). Ugyanis egy homokos, rossz víztartó

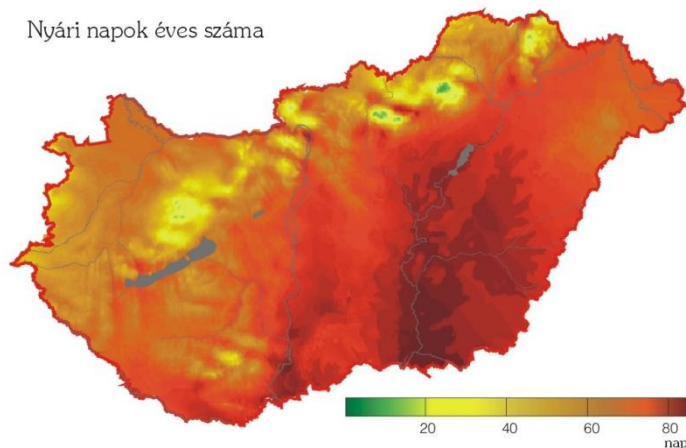
képességű talaj jobban felmelegszik az agyagos, nagyobb nedvességet magában tartó talajhoz képest, minek következtében a felette mérhető 2m-es hőmérséklet is magasabb lesz. Így tehát a legtöbb nyári nap az Alföldön és a Dél-Alföldön, legkevesebb a hegységeinkben és az Alpokalján fordul elő (3.2.4. *ábra*). Az 1961-1990-es időszakon hazánkban átlagosan 66 ilyen nap volt. 1901 és 2010 között lineáris trendbecslés alapján 8 napos növekedés figyelhető meg. (Lakatos és Bihari, 2011)

Az ALADIN modell különböző kísérletei egyetértenek abban, hogy a nyugati és középső országrészben a 21. században kisebb növekedés várható az ország többi részéhez képest. Az ALADIN4.5 eredményei szerint az Északi-középhegységben nagymértékben megnő a 25 °C-nál magasabb hőmérsékletű napok száma, 2021-2050-re a változás mértéke itt meghaladhatja a 30 napot. Az évszázad végére a hazai modellkísérletben továbbra is a legnagyobb növekedést a hegységeinkben láthatjuk (a Mátrában és a Bükkben a nyári napok száma akár két hónappal is több lehet a múltbeli időszakhoz képest), sőt ezen időszakon már a Balatonra is igen nagymértékű változás adódik. Ha összevetjük a változás térbeli eloszlását a nyári napok utóbbi évtizedekre vonatkozó eloszlásával (3.2.4. *ábra*), akkor láthatjuk, hogy (az ALADIN mindegyik kísérlete szerint) a legnagyobb növekedés ott jelenik meg, ahol a múltban kevesebb előfordulás volt jellemző.

A REMO hazai modellváltozata a 2021-2050-es időszakon az ország déli felében mutat nagyobb, 20-25 napos változást, északon, illetve az ENSEMBLES-beli verzióban egész Magyarországon a növekedés kisebb. Az évszázad végére az újabb verzió szerint a keleti és a nyugati részeken, míg a hazai modellfuttatás – amely magasabb értékeket szimulál – alapján a Nyírségben várható a legerőteljesebb növekedés (utóbbi verzió legalább 45 napos változást valószínűsít az egész ország területére).



3.2.3. ábra. A nyári napok (maximumhőmérséklet 25°C feletti) számának évi átlagos változása (napban) a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra az ENSEMBLES-beli (ENS) és a hazai (HU) ALADIN (első három oszlop), illetve REMO (utolsó két oszlop) modellek alapján. Referencia: 1961-1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.



3.2.4. ábra. A nyári napok éves száma Magyarországon felett. Forrás: Magyarország éghajlati atlasza, 2003

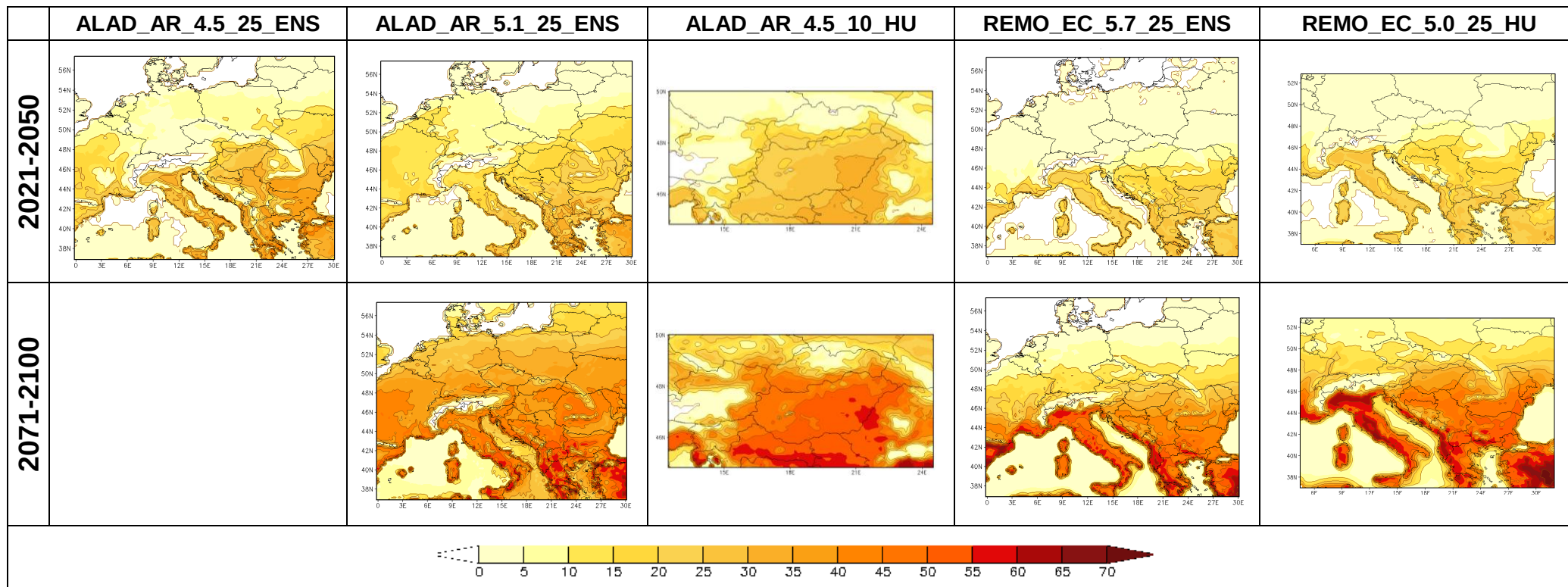
Hőségnapnak nevezzük azt a napot, amikor a maximumhőmérséklet eléri a 30 °C-ot. Az ENSEMBLES-beli ALADIN és REMO eredményei szerint számuk a Balkán- és az Appennini-félszigeten emelkedik a legnagyobb mértékben (3.2.5. ábra), az évszázad végére néhány helyen akár 55-60 napos változás is lehetséges (a REMO változástérképén ilyen mértékű növekedés a mediterrán térség nyugati partvidékén és a Pó-síkságon látható).

Magyarországon főként július-augusztusban jelentkeznek hőségnapok, ritkábban májusban és szeptemberben. Kialakulásában elsősorban a tengerszint feletti magasság játszik szerepet, de az óceántól vett távolság szintén meghatározó, valamint a hegyek esetében a délies lejtőkön gyakrabban fordul elő. Az 1961-1990 múltbeli időszakban hazánk felett átlagosan évi 15 hőségnap volt. A délkeleti tájainkon viszont 21-24 nap körül alakult, míg az északnyugati és északi magasabban fekvő területeken, illetve az Alpoknál kevesebb, mint 10 napon fordult elő. Az évszázad elejéhez képest napjainkban (azaz 1901 és 2010 között) átlagosan 6 nappal több 30 °C feletti csúcshőmérsékletű nap van (lineáris trendbecslés alapján; Szépszó *et al.*, 2011). Az index megnövekedése elsősorban a mezőgazdaság szempontjából fontos, ugyanis ilyen hőmérsékleten a nálunk őshonos növények már károsodhatnak.

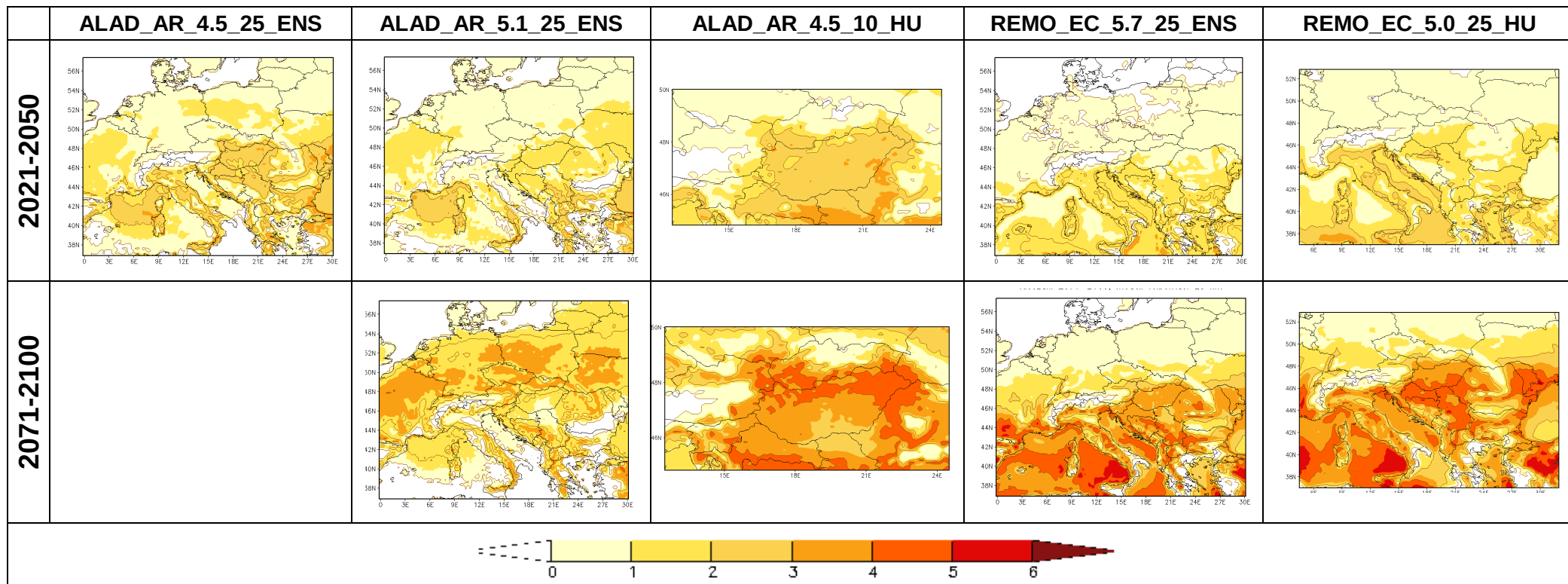
Az ALADIN eredményeinek többsége Magyarországra vonatkozóan egy ÉK – DNy irányú növekedést mutat. A közeljövőre a 4.5 kísérletek szerint a déli és keleti területeken a változás mértéke meghaladhatja a 25 napot. Az 5.1 verzió eredménye valamelyest visszafogottabb, ugyanis a modell szerint maximum 15 – 20 nappal hosszabbodhat hazánkban a hőségnapok száma. A 10km-es felbontású modellverzióban mindkét időszakon szintén alacsonyabb értékekkel rajzolódik ki a Balaton, Dunántúli-középhegység és az Északi-középhegység magasabb hegyei. Az évszázad végére a hazai futtatás pesszimistább (nagyobb)

növekedést mutat, eszerint az ország jelentős részén a változás mértéke meghaladhatja az 50 napot, sőt egy kisebb területen elérheti a 60 napos növekedést, ami azt jelenti, hogy egy évben összesen akár több mint két hónapig is jelentkezhetnek ilyen magas hőmérsékletű napok (az 5.1 kísérlet mérsékeltebb, maximum 45 napos növekedést jelez). A REMO eredményeiben mindkét kísérletben és mindkét időszakon a hazánkra vonatkozó eredményekben felfedezhető az É – D zonalitás és a magashegységekben a kismértékű változás. A modell kisebb növekedést jelez az ALADIN-hoz képest, ugyanis a közeljövőre a déli területeken 10-15 nappal, míg az évszázad végére 30-35 nappal emelkedhet a hőségnapok száma. Ezen index esetében tehát a legnagyobb változás ott várható, ahol eddig is gyakrabban fordultak elő hőségnapok (déli, délkeleti tájakon), míg a hegységekben kisebb mértékű növekedést mutatnak a modellek.

A hőhullámok esetében azoknak a gyakoriságát vizsgáltuk, amikor az átlaghőmérséklet legalább három napig 25 °C felett volt – ha ez fennáll, akkor az operatív gyakorlatban kiadják a másodfokú hőségriasztást. Az ALADIN eredményei alapján az északabbra fekvő területeken a közeljövőben évente átlagosan eggyel több, míg Magyarországon és tőle délebbre akár két-három hőhullámmal is több jelentkezhet a múltbeli gyakorisághoz képest (3.2.6. *ábra*). Ez némileg gyorsuló növekedést jelent, ugyanis az elmúlt több mint 100 évben (1901-2009), hazai mérések alapján a hőhullámos napok száma 5 nappal emelkedett (lineáris trendbecslés alapján; *Lakatos és Bihari, 2011*), tehát a növekedés mértéke nem érte el a két hőhullámos eseményt. Az évszázad végére nagyobb mértékű változás nemcsak a mediterrán térségben, de a magasabb szélességek bizonyos területein (pl. Lengyelország, Németország, Csehország területén) is jelentkezik. A 10 km-es ALADIN szerint a nagyobb növekedés hazánk északi és keleti tájain várható.



3.2.5. ábra. A hőségnapok (maximumhőmérséklet 30°C feletti) számának évi átlagos változása (napban) a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra az ENSEMBLES-beli (ENS) és a hazai (HU) ALADIN (első három oszlop), illetve REMO (utolsó két oszlop) modellek alapján. Referencia: 1961-1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.



3.2.6. ábra. A másodfokú hőhullámok (az átlaghőmérséklet legalább 3 napig 25°C feletti) számának évi átlagos változása (esemény száma) a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra az ENSEMBLES-beli (ENS), valamint a hazai (HU) ALADIN-Climate (első három oszlop) és REMO (utolsó két oszlop) modellek alapján. Referencia: 1961-1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.

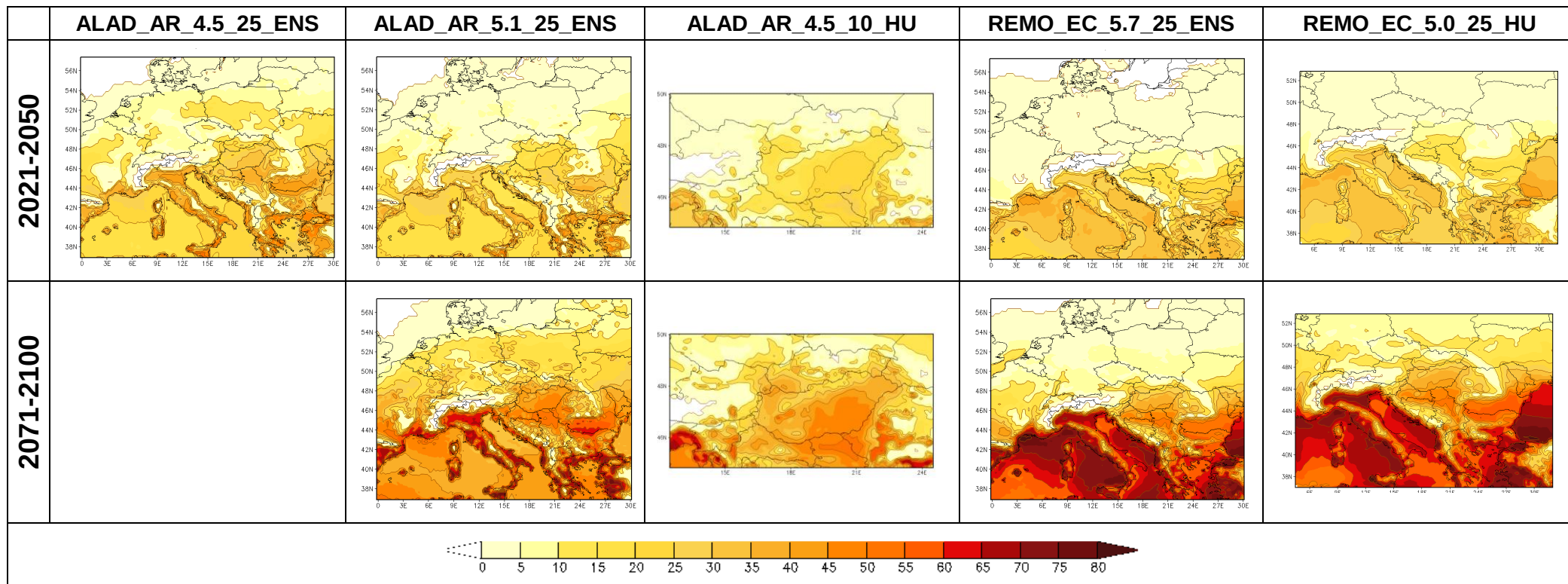
A REMO modell szerint a változás rendezettebb képet mutat, mint az ALADIN eredményeiben látható volt, ugyanis az északabbra fekvő területeken nem jelenik meg viszonylag nagyobb változás a 2021-2050 időszakon. Az évszázad végére a hazai modell szerint a déli területeken fekvő síkságokon várható a legnagyobb növekedés (Alföld és a tőle délre fekvő területek, Román-alföld, Pó-síkság), illetve a Földközi-tengerbeli nagymértékű növekedést mindkét kísérlet jelzi. Magyarországot tekintve az OMSZ eredményeiben az egész vizsgált időszakon a déli területeken növekedhet meg legnagyobb mértékben a hóhullámos napok száma (közeljövőre 1-2-vel, az évszázad végére már 4-5 eseménnyel is több lehet évente a múltbeli gyakorisághoz képest), azaz a modell szerint a legnagyobb növekedés azokon a területeken várható, ahol a hóhullámos napok egyébként is gyakrabban fordulnak elő (az ALADIN esetében ez éppen ellentétes: a hűvösebb északi tájakon mutat intenzívebb gyakoriságnövekedést). Az ENSEMBLES-beli modellverzió hazánk fölött nem mutat zonalitást és valamelyest kisebb változást valószínűsít az 5.0 verzióhoz viszonyítva. (A hóhullámok esetében teljesebb képet kaphatunk, ha nemcsak a számuk, hanem a hóhullámos napok gyakoriságának változását is megvizsgáljuk, mert ez a jövőbeli hóhullámok hosszúságáról is információt nyújt. A terveink között szerepel tehát a vizsgálatok kiterjesztése ebbe az irányba is.)

Ha a nappali hőség után az éjszaka nem hoz enyhülést, a forróság elviselése még nehezebbé válik. Trópusi (vagy meleg) éjszakáról beszélünk, amikor a minimumhőmérséklet nem csökken 20 °C alá. Az ALADIN mindhárom modellkísérlete alapján (3.2.7. ábra), a legnagyobb növekedés a mediterrán térség alacsonyabban fekvő partmenti területein (különösen a Földközi- és az Adriai-tenger partvidékén) várható. Magyarországon a múltban igen ritkán fordult elő meleg éjszaka, 1961 és 1990 között évente átlagosan 1,5-szer. Több mint 100 év alatt (1901-2009) a trópusi éjszakák gyakorisága eggyel nőtt (hazai rácsponatok átlaga alapján, lineáris trendbecslést alkalmazva, *Lakatos és Bihari*, 2011). A jövőre vonatkozóan viszont igen nagymértékű változás látható: az ALADIN eredményei egyöntetűen az Alföldre és a Balatonra valószínűsítik a legtöbb trópusi éjszaka jövőbeni előfordulását (a növekedés mértéke az ENSEMBLES-beli 4.5 verzió szerint már a közeljövőben meghaladhatja az egy hónapot, az évszázad végére pedig mindkét kísérlet 45-50 napos növekedést mutat), míg az északi tájainkon a változás kisebb, de az évszázad végére itt is elérheti az egy hónapos növekedést. A Balaton környékére jelzett nagyobb változást az index térbeli elrendeződése is magyarázza: a referencia-időszakban ugyanis a tó közelében lévő mérőállomásokon átlagosan 2-3-szor több meleg éjszaka fordult elő, mint az ország más részein.

Az ALADIN eredményeivel ellentétben a REMO esetében a legnagyobb változást mutató területek nem csak a mediterrán partvidéken, hanem a Földközi-tengerben is jelentkeznek. A két modellverzió mindkét időszakon nagy hasonlóságot mutat a változás térbeli eloszlását illetően. A közeljövőre az ország nagy részén 5-10 nappal várhatunk több olyan éjszakát, amikor a levegő nem hűl 20 °C alá. Az évszázad végére az Északi-középhegységben a változás 30 nap alatti, a déli országrészben viszont meghaladja a 40 napot.

Míg a jövőben a pozitív hőmérsékleti extrémumok száma növekszik, a téli hideg hőmérsékletek mind ritkábban fordulnak elő. Ennek vizsgálatára két indexet, a fagyos (minimumhőmérséklet 0 °C alatti) és a zord (minimumhőmérséklet -10 °C alatti) napokat (3.2.8. és 3.2.10. ábra) tekintettük. Mindkét index esetén a legnagyobb mértékű változás a tartomány keleti- északkeleti térségében illetve a magashegységekben (különösen az Alpokban) figyelhető meg. A fagyos napokat tekintve (3.2.8. ábra) a REMO eredményeiben az évszázad végére a Kárpátokban és a Dinári-hegységben is jelentős csökkenés látható (a hegységek legmagasabb csúcsain akár két hónappal több fagymentes nap lehet). Az ENSEMBLES két ALADIN verzióját összehasonlítva (a téli átlaghőmérséklet-változással összhangban, Zsebeházi, 2012) az 5.1 verzió mutat nagyobb változást. Míg a 2021-2050 időszakra a REMO gyengébb csökkenést jelez az ALADIN eredményeihez képest, a távolabbi jövőben azokon a területeken, ahol a legmarkánsabb csökkenés várható, a REMO nagyobb változást szimulál. A tartomány nyugati és déli részein azonban továbbra is kisebb csökkentést mutat.

Magyarországon fagyos napok általában novembertől márciusig jelentkeznek. Legtöbbször a hegységeinkben fagy (különösen azok északi lejtőin), de kialakulásában szerepet játszik az Atlanti-óceántól és Földközi-tengertől vett távolság, így tehát északkelet felé haladva egyre gyakoribb (3.2.9. ábra). Az 1961-1990 időszakon hazánkban átlagosan 96 fagyos nap volt évente, az ország nyugati felében azonban meghaladta a 100 napot, sőt az északkeleti fagyzugos területeken a 120 napot is (Szépszó *et al.*, 2011). Az ország melegebb, középső és déli területein mindössze 72-84 ilyen nap volt. Az elmúlt évszázadban (1901-2009) 11 nappal csökkent az index gyakorisága (hazai rácspontok átlaga alapján, lineáris trendbecslést alkalmazva; Lakatos és Bihari, 2011).

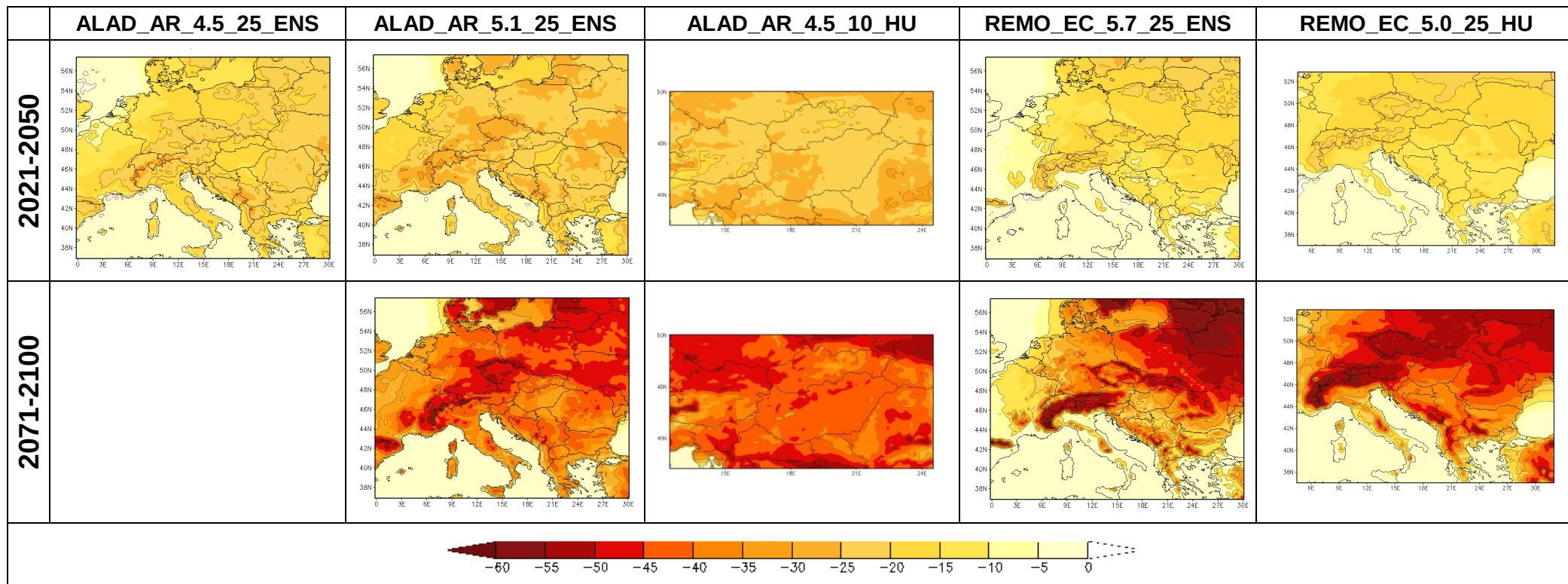


3.3.7. ábra. A trópusi éjszakák (minimumhőmérséklet 20°C feletti) számának évi átlagos változása (napban) a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra az ENSEMBLES-beli (ENS), valamint a hazai (HU) ALADIN-Climate (első három oszlop) és REMO (utolsó két oszlop) modellek alapján. Referencia: 1961-1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.

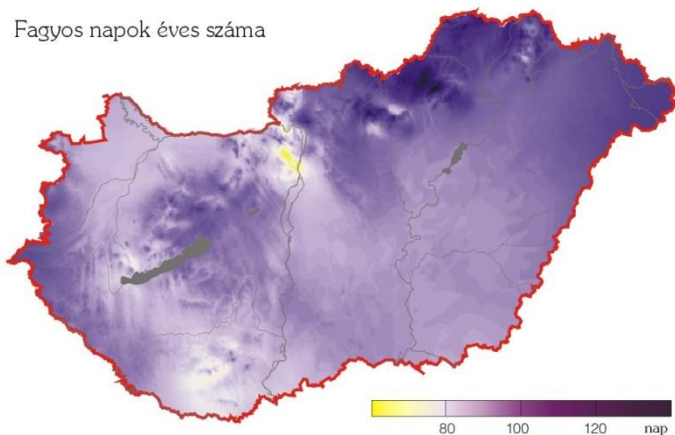
A jövőben a változás egyre intenzívebbé válik, ugyanis a közeljövőben az ALADIN futtatásai alapján a Kárpát-medencében 15-30 nappal csökkenhet a fagyos napok száma (3.2.8. ábra). Az 5.1 verzió és a hazai kísérlet szerint a nyugati országrészben nagyobb mértékű változás várható az ország többi részéhez képest. Az évszázad végére a finomabb felbontású futtatás alapján hazánk jelentős részén a változás 40-45 nap körüli, míg az Északi-középhegységben elérheti az 50 napot (az 5.1 modellverzió kisebb változást jelez, viszont a csökkenés térbeli eloszlása hasonló a hazai eredményhez).

A REMO eredményeiben a hazánk fölötti változás térbeli eloszlása kis mértékben különböző a két modellverzióban. Az ENSEMBLES eredményei szerint – mindkét vizsgált időszakon – a legnagyobb változás a keleti országrészben várható (a közeljövőre 15-20 nap), míg a hazai modell-szimulációban a csökkenés gradiense É – D irányú.

A $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot meghaladó minimumhőmérsékletű napok számának változása (zord napok; 3.2.10. ábra) igen hasonló mértékben és területi eloszlásban jelenik meg a két modellben. Az index előfordulási gyakorisága az északkeleti területeken és a magashegységekben csökken nagyobb mértékben (a 2021-2050 időszakon 10-15 napot), közülük igen jelentősen az Alpokban (az évszázad végére a változás mértéke elérheti az 55-60 napot) és kisebb mértékben a Kárpátokban és a Dinári-hegységben. A tartomány többi részén (beleértve Magyarországot is) az évszázad végére sem várható 10 napnál nagyobb csökkenés (egyedül a hazai modellverzió mutat magasabb változást az Északi-középhegység területére), de ezeken a területeken az ilyen extrém hőmérsékletek ritkábban is fordulnak elő az előbb említett tájakhoz képest. A magyarországi megfigyelések átlaga alapján, az 1961-1990 időszakon évente átlagosan 10 zord nap volt. Az ALADIN finomabb felbontású eredményeiben már a 2021-2050 időszakon is megjelennek olyan területek, ahol a változás elérheti a 10 napot, tehát akár már a közeljövőre is eltűnhetnek az ilyen extrém hideg napok az ország egyes részein (a feltételezés igazolásához azonban szükséges lenne megvizsgálni az index %-os változását is). A két REMO modellverziót összehasonlítva a hazai futtatás valamivel kisebb változást valószínűsít az ENSEMBLES-beli verzióhoz képest.

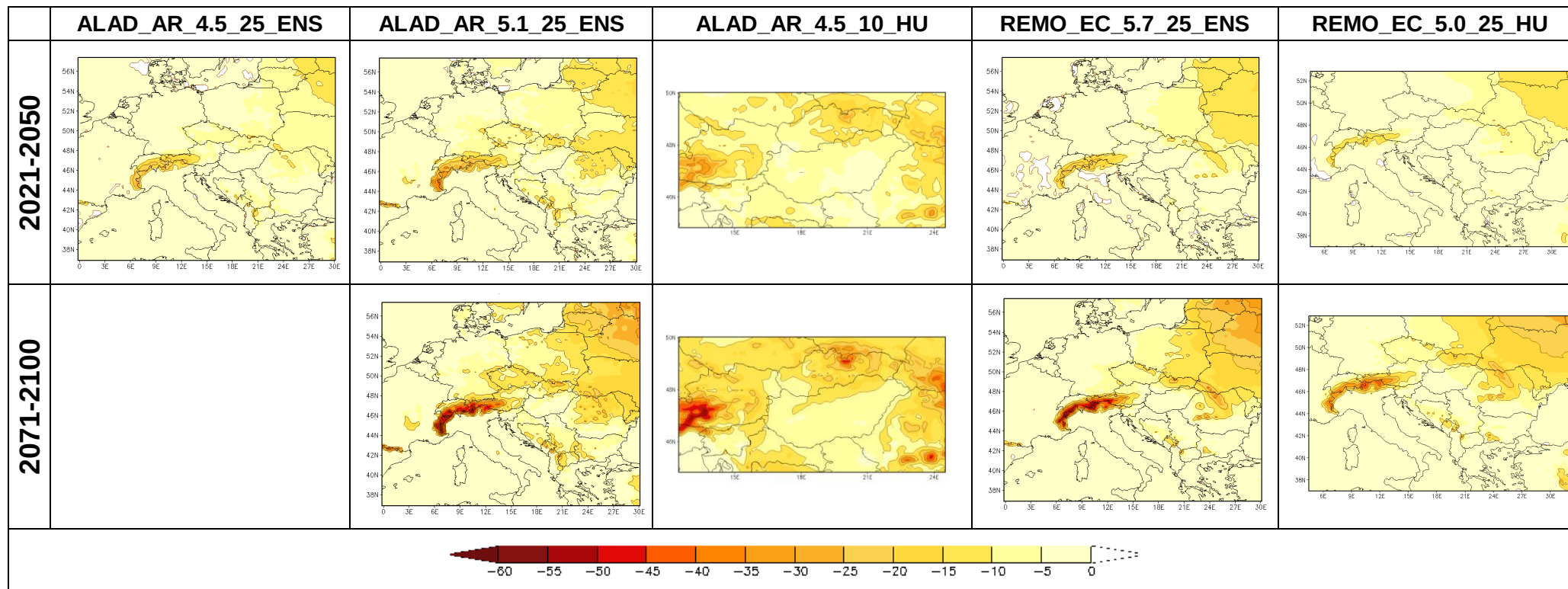


3.2.8. ábra. A fagyos napok (minimumhőmérséklet 0 °C alatti) számának évi átlagos változása (napban) a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra az ENSEMBLES-beli (ENS), valamint a hazai (HU) ALADIN-Climate (első három oszlop) és REMO (utolsó két oszlop) modellek alapján. Referencia: 1961-1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.



3.2.9. ábra. Fagyos napok éves száma Magyarországon. Forrás: Magyarország éghajlati atlasza, 2003

A hőmérsékleti szélsőségek előfordulásának jövőbeli gyakoriságára kapott eredményeinket összefoglalva elmondhatjuk, hogy a 21. század folyamán a pozitív hőmérsékleti extrémumok gyakoriságának növekedésére és a hideg szélsőségek ritkább megjelenésére kell számítanunk, és a változás mértéke a jelentől távolodva egyre növekszik. Az indexek térbeli változékonysága zonalitást mutat: a meleg hőmérsékletértékek az ALADIN esetében ÉNy – DK irányban, a REMO szimulációiban É – D irányban növekvő gyakorisággal jelentkeznek, a hideg és a szélsőségesen hideg hőmérsékletek legnagyobb változása a magasabb szélességeken elhelyezkedő kontinentális területeken és a magashegységekben valószínűsíthető. A modelleredmények alapján hazánkban a keleti és déli területeken számíthatunk a meleg napok legnagyobb mértékű növekedésére, míg a hideg napok esetén ez az irány pont fordított: a fagypont alatti hőmérsékletű napok jelentősen csökkennek az Északi-középhegységben az elkövetkezendő évszázadban.



3.2.10. ábra. A zord napok (minimumhőmérséklet $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti) számának évi átlagos változása (napban) a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra az ENSEMBLES-beli (ENS), valamint a hazai (HU) ALADIN-Climate (első három oszlop) és REMO (utolsó két oszlop) modell alapján. Referencia: 1961-1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.

4. Összefoglalás

Dolgozatomban bemutattam az ENSEMBLES projekt keretében futtatott ALADIN-Climate és REMO modellekkel végzett kísérletek eredményeinek átfogó elemzését, külön hangsúlyt fektetve a hazai modelleredményekkel való összehasonlításra, annak érdekében, hogy megtudjuk, az új eredmények mennyiben bővítik eddigi ismereteinket.

Vizsgálataimat a modellek validálásával kezdtem: az 1961–1990 időszakra magyarországi rácspontok havi hőmérsékleti és csapadékösszeg adatait felhasználva Taylor diagramot készítettem, ahol a referencia adatsort az ECA rácsponti megfigyelési adatbázis szolgáltatta. Az ENSEMBLES keretében a két modellel összesen öt kísérletet hajtottak végre a múltra: egyrészt re-analízisek, másrészt globális modellszimulációk által biztosított határfeltételekkel készült egy-egy szimuláció, továbbá az ALADIN-Climate esetében a Météo France-nál egy fejlettebb modellváltozatot is kipróbáltak. A hazai modellekkel szintén öt futtatást végeztek el a múltbeli időszakra. Az ALADIN modellben két rácsfelbontást is alkalmaztak, viszont a durvább felbontású kísérletben csak az ERA-40-t használták peremfeltételként. A validációs vizsgálatok során megállapítottuk, hogy mindkét változó esetében a REMO eredményei adták vissza legpontosabban a megfigyelés havi átlagértékeit, a csapadék szimulálásában pedig különösen jónak bizonyult a hazai ERA-40 meghajtású modellverzió. Az ALADIN model családból az OMSZ 4.5 verziójú re-analízis meghajtotta modellfuttatása a hőmérséklet tekintetében jól viselkedett, a csapadékot viszont már átlagosan reprezentálta az ENSEMBLES eredményeihez képest. A leggyengébben teljesítő modellnek a hazánkban alkalmazott 10 km-es felbontású ALADIN bizonyult. A modell viselkedése a finomabb felbontáshoz választott tartomány méretével magyarázható. Az ENSEMBLES-beli modell 5.1 verziója szintén rosszabbul teljesített (például a csapadék évi menetét a legkevésbé tudta visszaadni), ami azzal magyarázható, hogy a modellben a felszín-légkör folyamatok leírására alkalmazott új módszerrel az eredmények Magyarország felett némileg elmaradtak a korábbiaktól.

A dolgozatban a XXI. század során hazánkban várható átlaghőmérséklet és csapadékösszeg változásokat együttesen mutattam be. Az eredmények ilyen formában történő összegzése a várható változások bizonytalanságáról, illetve a modellek átlagos gyengeségeiről ad átfogó képet. A vizsgálatokat két jövőbeli időszakra, 2021-2050 és 2071-2100-ra végeztem el, referenciaként az adott modell 1961-1990 időszakra vonatkozó modellátlagok szolgáltak.

A modelleredmények kivétel nélkül a hőmérséklet pozitív változását mutatják. Hazánk fölött a 2021-2050 időszakon átlagosan 1-2 °C-kal, míg a 2071-2100 időszakon 3-4 °C-kal emelkedhet az évi átlaghőmérséklet. A legnagyobb változás nyáron várható, azonban a modellek igen nagy bizonytalansággal jelzik a melegedés mértékét. A csapadék esetében a bizonytalanság jóval nagyobb, sok esetben a modellek még a változás előjelében sem értenek egyet. A nyári évszakra azonban markáns csapadékcsökkenést jeleznek, amelynek mértéke az évszázad végére tovább erősödik. A változás előjele a téli évszakban a legbizonytalanabb, ugyanis kettő modell nedvesedést, míg kettő szárazodást jelez, ezáltal az évszázad első felében az átlaguk nullának adódik (az évszázad vége felé a csökkenést jelző modellben ennek mértéke gyengülni látszik, ebből adódóan a modellek átlaga pozitív).

A dolgozat döntő részét a hőmérsékleti szélsőségek jövőbeli megváltozásának vizsgálata alkotta (mivel ezek az új eredmények még nem kerültek bemutatásra). A szimulált napi minimum-, maximum- és átlaghőmérsékletekből klímaindexeket származtattunk. A meleg és szélsőségesen meleg hőmérsékletek gyakoriságváltozásának vizsgálatához a következő indexeket tekintettük: nyári nap, hőségnap, másodfokú hőhullámok, trópusi éjszaka. A hideg és extrém hideg hőmérsékletek gyakoriságváltozását a fagyos napok és zord napok számának változása szemléltette. Az indexek Magyarországon várható változásait a referencia-időszakban mutatott térbeli jellemzőik tükrében is értékeltük.

Eredményeink alapján nagy bizonyossággal állíthatjuk, hogy a XXI. században az extrém meleg napok száma növekedni, míg az extrém hideg napok száma csökkenni fog. Az indexek térbeli változékonysága zonalitást mutat: a meleg hőmérsékletértékek az ALADIN esetében ÉNy – DK irányban, a REMO szimulációiban É – D irányban növekvő gyakorisággal jelentkeznek, a hideg és a szélsőségesen hideg hőmérsékletek legnagyobb változása a magasabb szélességeken elhelyezkedő kontinentális területeken és a magashegységekben valószínűsíthető. A modelleredmények alapján hazánkban a keleti és déli területeken számíthatunk a meleg és extrém meleg napok számának legnagyobb mértékű növekedésére. Ezeken a területeken a múltban is gyakrabban fordultak elő ilyen küszöbértéket átlépő hőmérsékletű napok. Az ALADIN modell eredményeiben azonban a nyári napok és a másodfokú hőhullámok legnagyobb változása az északi területeken figyelhető meg. Mérések igazolják, hogy a változás már a múltban elkezdődött, azonban a jövőre vonatkozó szimulációink alapján elmondhatjuk, hogy a növekedés jelentősen felgyorsul a XXI. században. Például van olyan modell, amely szerint a hőségnapok száma (maximumhőmérséklet 30 °C feletti) az évszázad végére bizonyos területen akár két hónappal is növekedhet. A múlt században trópusi éjszaka (minimumhőmérséklet 20 °C feletti)

hazánkban igen ritkán fordult elő. Az ALADIN eredményei között azonban volt olyan, amely már a közeljövőre egy havi gyakoriságnövekedést valószínűsít. A változás a hideg napok esetében is igen jelentős. A fagypont alatti hőmérsékletű napok az északkeleti területeken csökken legnagyobb mértékben. A fagyos napok számának (minimumhőmérséklet 0 °C alatti) csökkenése az évszázad végére az egész ország területén meghaladhatja az egy hónapot, a zord (minimumhőmérséklet -10 °C alatti) napok tekintetében pedig van olyan modell, amely már az évszázad első felében valószínűsíti az index teljes eltűnését az ország egyes részein.

A modelleredmények vizsgálatát a jövőben tovább folytatjuk. Terveink között szerepel a csapadék jövőbeli megváltozásának részletesebb vizsgálata céljából csapadékindexek előállítása. A klímaindexek változásának részletesebb megismeréséhez meghatározzuk azok relatív változását. Továbbá szeretnénk az ECA megfigyelési adatbázis alapján nagyobb európai területre megvizsgálni az 1961-1990 időszak éghajlati jellemzőit. Végül a modellek validációs eredményeit kiterjesztjük a klímaindexek validációjával.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Szépszó Gabriellának szakmai iránymutatásáért, biztatásáért valamint áldozatos munkájáért, amelyben hasznos tanácsokkal, észrevételekkel segített a dolgozat elkészítésében.

Továbbá köszönettel tartozom Krüzselyi Ilonának és Szabó Péternek, akik felmerülő kérdéseimre mindig lelkiismeretesen válaszoltak.

Valamint köszönöm az Országos Meteorológiai Szolgálatnak a rendelkezésemre bocsátott adatokat.

Irodalomjegyzék

- Christensen, J.H., 2005: Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects. Final Report. Danish Meteorological Institute, Copenhagen.
- Csima, G., Horányi, A., 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service, *Időjárás* 112, 3–4, 155–177.
- Giorgi, F., and Bates, G., 1989: The Climatological Skill of a Regional Model over Complex Terrain. *Monthly Weather Review* 117, 2325–2347.
- Götz G., 2004: A klímadinamika alapjai. Kézirat.
- Hawkins E. and Sutton, R., 2009: The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of American Meteorological Society* 90, 1095–1107.
- Hawkins E. and Sutton, R., 2011: The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-010-0810-6.
- Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones, M. New., 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)* 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201.
- IPCC Third Assessment Report, 2001: The Scientific Basis.
- Lakatos M. és Bihari Z., 2011: A közelmúlt megfigyelt hőmérsékleti- és csapadéktendenciái. *Klímaváltozás* 2011, 146-169.
- Magyarország éghajlati atlasza, 2003. Országos Meteorológiai Szolgálat.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi, Z., 2000: IPCC special report on emissions scenarios. Cambridge University Press, Cambridge.
- Simmons, A.J., and Gibson, J.K., 2000: The ERA-40 Project Plan. ERA-40 Project Report Series, 1.
- Szépszó, G. and Horányi, A., 2008: Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary. *Időjárás* 112, 3–4, 203–231.

- Szépszó G., Horányi A., Lakatos M., 2011: A Magyarországon megfigyelt éghajlati tendenciák, valamint a jövőben várható változások és bizonytalanságaik elemzése. Szakmai tanulmány az Országos Meteorológiai Szolgálat „Kérdőív a klímaváltozásról” című felmérésének kiértékeléséhez.
(http://www.met.hu/doc/omsz_hirek/2011.08.23/melleklet_2_szakmai.pdf)
- Szépszó, G., 2011: Diagnostic study of the influence of lateral boundary conditions for the REMO RCM simulations over the Carpathian Basin. *Advances in Science and Research* 6, 87–94.
- Taylor, Karl E., 2000: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, PCMDI Report No. 55.
- van der Linden, P., Mitchell, J.F.B. (eds.), 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter EX1 3PB, UK.
- Zsebeházi, G., 2011: Magyarország éghajlatának jellemzése az ENSEMBLES projektbeli és a hazai regionális modelleredmények együttes vizsgálatával. Szakdolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, 63p.
- Zsebeházi, G., 2012: A magyarországi éghajlatváltozás jellemzése az ALADIN-Climate és a REMO regionális modellek eredményei alapján. OFKD dolgozat, XIII. Országos Felsőoktatási Környezettudományi Diákkonferencia, 45p.