

Magyarország éghajlatának jellemzése az ENSEMBLES projektbeli és a hazai regionális modelleredmények együttes vizsgálatával

SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNY ALAPSZAK
METEOROLÓGIA SZAKIRÁNY



Készítette: Zsebeházi Gabriella

Témavezető: Szépszó Gabriella

Konzulens: Dr. habil. Bartholy Judit

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2011

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
1.1. Az éghajlati rendszer	3
1.2. Energiaegyenleg és sugárzási kényszerek	4
1.3. Az éghajlati rendszer belső szabad változékonysága.....	6
1.4. Klímamodellelés.....	6
1.5. Leskálázási módszerek.....	8
1.6. A klímamodellelésben rejlő bizonytalanságok.....	9
1.7. A PRUDENCE és az ENSEMBLES projekt	10
2. Vizsgálatok	12
3. Eredmények	15
3.1. Validáció	15
3.2. Projekciók	37
4. Összefoglalás	56
Irodalomjegyzék	61
Köszönetnyilvánítás	63

1. Bevezetés

1.1. Az éghajlati rendszer

Éghajlati rendszernek nevezzük az atmoszféra, hidroszféra, krioszféra, kontinentális felszín és a bioszféra együttesét, valamint a közöttük lévő bonyolult kölcsönhatások összességét (1.1.1. ábra). Míg az időjárás a légkör egy adott időponthoz tartozó pillanatnyi állapotát jellemzi, az éghajlat nemcsak a légkörnek, hanem az egész éghajlati rendszernek a kellően hosszú idő során kialakult szokásos viselkedését jelenti. Ez egy elméleti fogalom, a gyakorlatban az éghajlatot a meteorológiai állapotjelzők véges időtávra számított statisztikáival jellemezzük: pl. a légköri állapotjelzők átlagát, szórását, szélsőséges események bekövetkeztének gyakoriságát számítjuk. A WMO (World Meteorological Organization, Meteorológiai Világszervezet) ajánlása alapján 30 év az a legrövidebb időszak, amelyen az éghajlatot vizsgálhatjuk, ugyanis ennél rövidebb időszakon az éghajlat változása nem, csupán a klíma fluktuációi (az éghajlat természetes anomáliái, azaz a normális állapottól való eltérései) mutatkoznak meg.

Az éghajlati rendszer központjában a légkör áll, mely a leginkább változékony komponens. Fő összetevői mellett a kis mennyiségben jelen lévő üvegházgázoknak (pl. CO_2 , CH_4 , N_2O) meghatározó szerepük van a légkör energiaháztartásában, mivel elnyelik a földfelszín által kisugárzott infravörös hősugárzást, jelentősen megemelve ezzel a felszíni átlaghőmérsékletet. Ezen kívül a légkörben jelen vannak különböző szilárd és folyékony – természetes és antropogén eredetű – részecskék (aeroszol), melyek fontos szerepet játszanak a felhő- és csapadékképződésben, illetve a beérkező napsugárzásra nézve szintén módosító hatással bírnak.

Hidroszféra alatt az összes felszíni és felszín alatti vizeket értjük. Közülük éghajlati szempontból az óceánok szerepe a legnagyobb. Nagy a hőkapacitásuk, ezáltal sok energiát képesek tárolni, melyet a hőmérséklet- és sűrűségkülönbség hajtotta termohalin cirkuláció oszt szét az egyes területek között. Az óceánok kitüntetett szerepet játszanak a légköri szén-dioxid elnyelésben, aminek azonban a lassú függőleges átkeveredés határt szab.

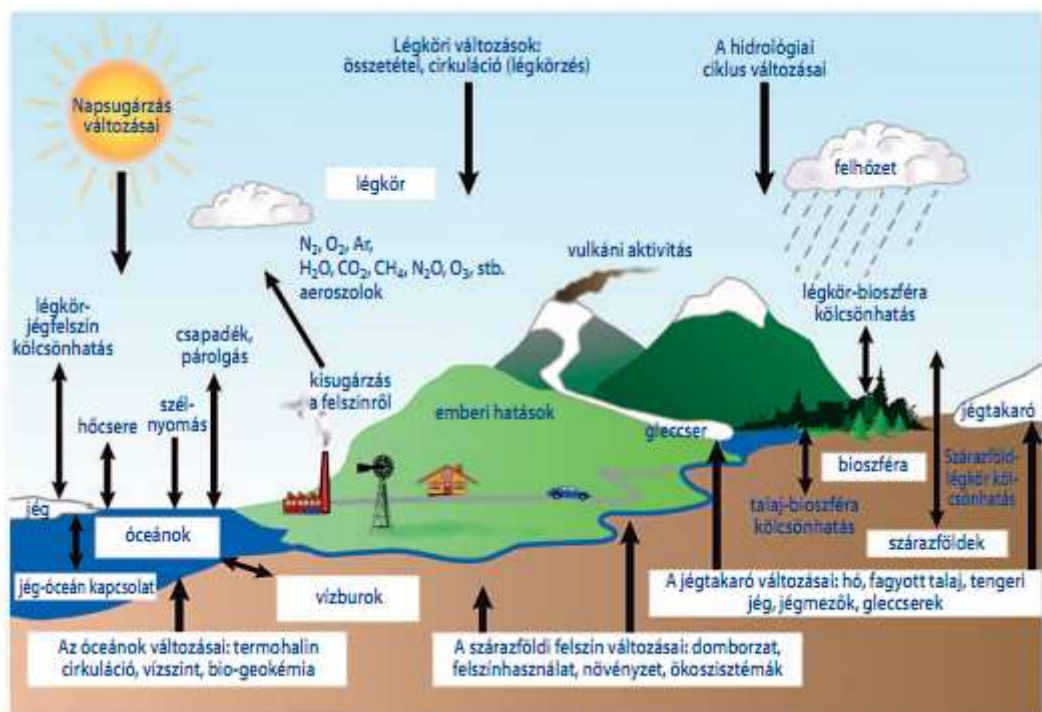
A krioszférába tartoznak Grönland és az Antarktisz jégtakarói, a kontinentális gleccserek és hótakarók, illetve a tengeri jég. A jéggel borított területek nagy albedóval rendelkeznek, azaz a beérkező napsugárzás jelentős részét visszaverik. A sarki jégtömegekben tárolt hatalmas édesvíz-készlet fontos szerepet játszik a mélytengeri

cirkuláció kormányzásában (olvadásával ugyanis a sótartalom-különbség hajtotta mélységi áramlások intenzitása csökkenhet).

A sugárzási egyenleg alakításában a kontinentális felszínnek is fontos szerep jut: egyrészt ez szolgáltatja a légköri aeroszol részecskék legnagyobb hányadát, másrészt maga is visszaveri a beérkező napsugárzás egy részét a vegetáció és talajállapot függvényében.

A bioszféra a Földön található összes életközösséget magában foglalja. Közülük azonban elsősorban a növényzet éghajlati rendszerben betöltött szerepét vizsgáljuk. A növények fontos szén-dioxid nyelők, illetve aeroszol részecskék (pl. virágpor) forrásai is.

E szférákat az általános lég- és vízkörzés kapcsolja össze a hő, tömeg és vízanyag szállítása révén.

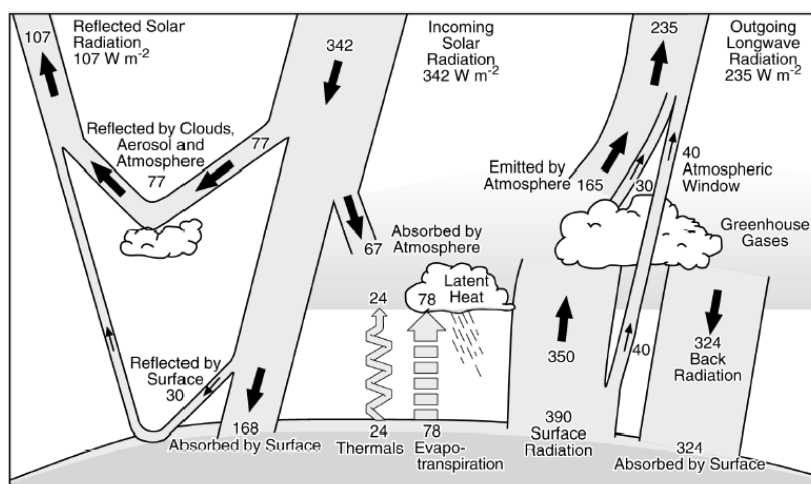


1.1.1. ábra. Az éghajlati rendszer sematikus ábrája. A kép ábrázolja a rendszer összetevőit, a közöttük zajló folyamatokat és kölcsönhatásokat (Forrás: IPCC TAR, 2001).

1.2. Energiaegyenleg és sugárzási kényszerek

A földi sugárzási mérleg legfontosabb elemeit az 1.2.1. ábra mutatja. A légkör felső határára érkező napsugárzás teljesítménye 1367 W/m^2 . A bejövő rövidhullámú sugárzás 31%-át a légkör, a földfelszín és a felhők azonnal visszaverik, a maradék hányadát pedig a légkör és a felszín nyeli el. A felszín által elnyelt energia hosszuhullámú sugárzás formájában bocsátódik ki, melynek komponensei az infravörös hősugárzás, a kondenzáció során felszabaduló látens hő, valamint az ún. légköri ablakon változatlan

formában a világűrbe kijutó sugárzás. A felszín által kisugárzott energiamegnyiség $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os globális középhőmérsékletet eredményezne. Mint tudjuk, ez az érték azonban $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$, amit a természetes üvegházgázok jelenléte okoz, melyek az infravörös hőszugárzást elnyelik és visszasugározzák a földfelszín felé. A legfontosabb természetes üvegházgáz a vízgőz.



1.2.1. ábra. A sugárzási egyenleg komponensei (Forrás: IPCC TAR, 2001).

Normális esetben a beérkező sugárzás átlagos mennyisége megegyezik a kimenő sugárzás átlagos mennyiségével. Bizonyos hatások azonban eltolhatják ezt az egyensúlyt pozitív, vagy negatív irányba, melynek következtében melegek, vagy hűlhet a rendszer. Ezt a hatást sugárzási kényszernek nevezzük, amely kialakulhat mind természetes, mind antropogén hatások következtében. Földünk történetében mindig is voltak éghajlatváltozások, melyeket a természetes éghajlatot alakító tényezők váltottak ki. A Nap sugárzásának intenzitása nem állandó, 0,1% körüli változást mutat a 11 éves napfoltciklusok során. A Föld pályaelemei (például az excentricitás, azaz a földpálya lapultsága, a Föld forgástengelyének ferdesége, a precesszió és a nutáció) szintén meghatározzák a felszínre jutó sugárzást. A Földön egy-egy jelentősebb vulkánkitörés is módosíthatja (csökkentheti) néhány évre az átlaghőmérsékletet: ekkor ugyanis jelentősen megnövekszik a légkör aeroszol koncentrációja, melynek révén csökken a Föld felszínére lejutó napsugárzás.

Az ipari forradalom óta az emberi tevékenység fokozódó sugárzási kényszert vált ki. Folyamatosan növekszik az antropogén eredetű üvegházhatású gázok, illetve aeroszol részecskék légköri koncentrációja. Ez utóbbi kétfajta hatást válthat ki: bizonyos részük a rövidhullámú sugárzás szórásában vesz részt, vannak azonban olyan fekete testként viselkedő részecskék (pl. a korom), amelyek a sugárzás elnyelésével tovább melegítik a légkört. A földfelszín művelés alá vonása során a felszín albedója megváltozik. Például

kevésbé fejlett életközösségek még mindig alkalmazzák az égetéses földművelést, mely során a növényzetet felégetik, csökkentve ezzel a felszín sugárzás-visszaverő képességét.

1.3. Az éghajlati rendszer belső szabad változékonysága

Az éghajlati rendszer az 1.2 pontban említett kényszerek nélkül is képes változni, ez a következőkkel magyarázható:

1. Az egyes szférák igazodási, relaxációs ideje igen eltérő. A legrövidebb idő (hozzávetőlegesen 10 nap) alatt az atmoszféra áll be az új egyensúly állapotára, az óceánnak viszont ehhez sokkal több idő (több év, évtized) szükséges, nagy tehetetlensége miatt. Ez azt eredményezi, hogy a gyorsabban változó külső kényszerek miatt a rendszer soha nem képes az egyensúlyt elérni, folyamatos változásban van.
2. Az éghajlati rendszer elemei kölcsönösen hatnak egymásra. E kölcsönhatások gyengíthetik, illetve erősíthetik egymást, azaz pozitív és negatív visszacsatolások léphetnek fel. Ha például növekszik a besugárzás intenzitása, az növeli a felszíni hőmérsékletet, ezáltal megnövekszik a sivatagos területek aránya, ami hozzájárul a felszín albedójának növeléséhez, tehát kevesebb energiát nyel el a földfelszín. Ez a folyamat tehát a perturbációt csillapítja, negatív visszacsatolásként hat. Pozitív visszacsatolást eredményez a csökkenő besugárzás következtében megnövekvő jégborítottság, ugyanis ez által még több sugárzás verődik vissza.
3. Az éghajlati rendszer tulajdonsága az aperiodikus szabad változékonyság (Götz, 2004), ami annyit jelent, hogy bármiféle külső kényszer nélkül az átlagos állapotától eltérően, kaotikusan viselkedhet.

Összefoglalva tehát az éghajlati rendszert rendkívül bonyolult kölcsönhatások és folyamatok jellemzik, melynek eredője pusztán elméleti úton nehezen meghatározható. Az éghajlati modellek azonban képesek a rendszer, illetve az egyes tagok viselkedését szimulálni, illetve segítségével jobban megérthetjük a bennük zajló folyamatokat és kölcsönhatásokat.

1.4. Klímamodellezés

Az éghajlati modellek numerikus időjárás előrejelző modellekből születtek, melyekben a légkörre felírt tömeg, impulzus és energia megmaradás egyenleteit, azaz a hidro-termodinamikai egyenletrendszer oldják meg, elhanyagolva a súrlódást és hőcserét,

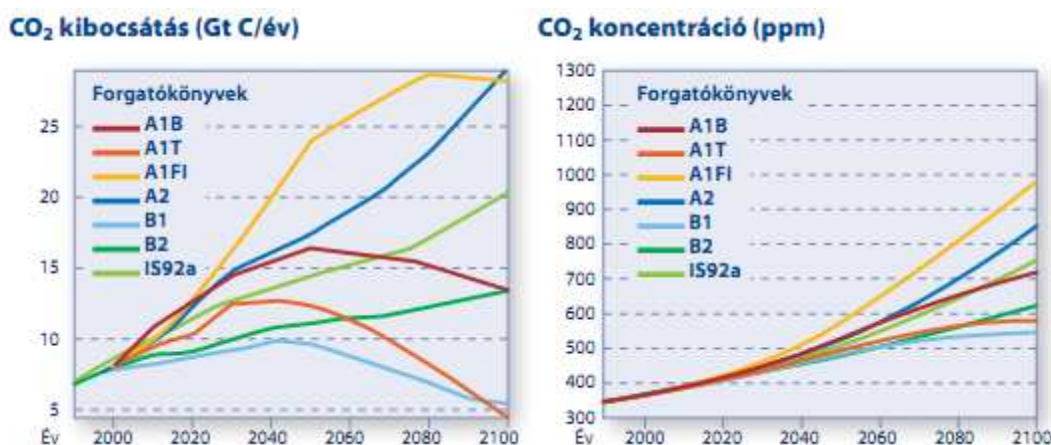
tehát konzervatív rendszert tételezve fel. Ezt az éghajlati modellek esetében nem tehetik meg, mivel a teljes energiájukat időben megőrző rendszerekben nem alakulhat ki állandósult viselkedés. A klímamodellezés során nemcsak a légkörre, hanem az óceánra is felírják a megmaradási egyenleteket, a rendszer további (az óceánnál és a légkörnél kevésbé ismert) összetevőiben lezajló folyamatokat pedig egyszerűsített formában, parametrizáció, vagy empirikus formulák segítségével írják le.

Az éghajlati rendszer egyes komponenseit kormányzó fizikai törvények egy parciális differenciál-egyenletrendszer alkotnak, melynek nem létezik analitikus megoldása, ezért numerikus módszerek segítségével oldjuk meg. Ehhez a térbeli és időbeli deriváltakat közelítenünk kell: a vizsgált mezőt egy háromdimenziós ráccsal fedjük le, és ennek a rácsnak minden egyes rácspontjában adott időintervallumonként számítjuk ki a meteorológiai változókat.

Az éghajlati rendszer egészét kapcsolt globális éghajlati modellekkel írhatjuk le, melyek az összes modell közül a legösszetettebbek. Segítségükkel tanulmányozhatjuk az egyes szférák viselkedését, illetve a közöttük lévő kapcsolatot. Ezen modellek használatosak a megváltozott éghajlati kényszer kiváltotta globális klímaváltozás becslésére is. Mivel nem tudjuk pontosan megmondani, hogy a jövőben hogyan alakulnak az emberi tevékenység éghajlatra hatással bíró részletei (pl. a népességnövekedés, a technológiai fejlődés, a környezetbarát megoldások, a társadalmi különbségek kiegyenlítődése), ezért forgatókönyveket készítenek, melyek optimista, pesszimista, illetve realista képet festenek a világ gazdasági-társadalmi változásáról és ezt az üvegházhatású gázok és aeroszolok kibocsátásának és légköri koncentrációjának mennyiségében számszerűsítik. Négy fő kibocsátási forgatókönyvet különböztetnek meg: A1, A2, B1, B2 (*Nakicenovic et al., 2000*). Ezek közül az A1 scenárión belül az A1FI a leginkább borúlátó, míg a B1 scenárió szerint (a négy forgatókönyv közül egyedül) a CO₂ kibocsátás az évszázad vége felé csökkeni fog a jelenlegihez képest (*1.4.1. ábra*). E négy alapszenárión belül is léteznek még forgatókönyvek, melyek további elképzeléseket adnak az emberi tevékenység változásáról. Mivel az emberi tevékenység alakulásáról csak a fentihez hasonló feltételezéseket adhatunk, a jövőre történő szimulációkat nem előrejelzésnek, hanem éghajlati projekcióknak nevezzük.

Itt meg kell jegyezni, hogy az emberi tevékenység alakulásáról azóta szerzett újabb információk szükségessé tették a fenti ún. SRES (Special Report on Emissions Scenarios) scenáriók felülvizsgálatát, s a fejlődési ütemhez jobban illeszkedő új forgatókönyvek kidolgozását. Az új globális modellfuttatások során a SRES forgatókönyvek helyett tehát

már az ún. stabilizációs (RCP – Representative Concentration Pathways; *Moss et al.*, 2010) scenáriókat alkalmazzák, melyeket a 2100-ra érvényesnek feltételezett sugárzási kényszerrel jellemeznek. Az RCP forgatókönyvet a SRES scenárióknál hosszabb időtávra, 2300-ig készítették el annak érdekében, hogy segítségükkel az éghajlati rendszer hosszú távú válaszát tudják vizsgálni.



1.4.1. ábra. A XXI. század folyamán a globális szén-dioxid kibocsátásának és légköri koncentrációjának alakulása a SRES kibocsátási forgatókönyvek alapján (Forrás: IPCC TAR, 2001).

1.5. Leskálázási módszerek

A globális klímamodellek horizontális rácsfelbontása napjainkban 100-300 km. Ezzel megbízhatóan képesek jellemezni az éghajlati rendszer nagy skálájú folyamatait, viszont nem képesek kellő részletességgel leírni az összetett domborzattal rendelkező helyek, vagy a különböző felszínű területek sajátos éghajlatát. Hogy az éghajlatváltozásról lokális képet kaphassunk, a globális modelleredmények leskálázására van szükség. Ez alapvetően háromféle módszerrel történhet:

- Léteznek az ún. változó felbontású globális modellek, melyek esetében az általános légkörzési modellben megnövelik az érdekes területek felbontását, és változatlanul hagyják az ezen kívül eső részeket (*Déqué et al.*, 1994). Az éghajlati rendszer többi elemének hatását a kapcsolt légkör-óceáni modell-szimuláció szolgáltatja. Ennek a módszernek előnye, hogy a légkör folyamatait továbbra is az egész Földön tekinti, viszont a finomabb felbontáson lezajló légköri változások már nem lesznek képesek visszahatni a kapcsolt modellrészekre.
- A statisztikai leskálázás esetén a múltra vonatkozó éghajlatot vizsgálva statisztikai kapcsolatot állítunk fel a globális modelleredmények és regionális megfigyelések

között és ezt alkalmazzuk a jövőre vonatkozó globális klímaprojekciók regionalizációja során (Wilby *et al.*, 1998). Mivel kérdéses, hogy változó éghajlatunkban e kapcsolat érvényes marad a jövőre is, e módszer vitatható. Továbbá a módszernek az is gyengesége, hogy nem képes a rendszer nemlineáris, kölcsönhatásokkal és visszacsatolásokkal átszőtt bonyolult jellegét figyelembe venni.

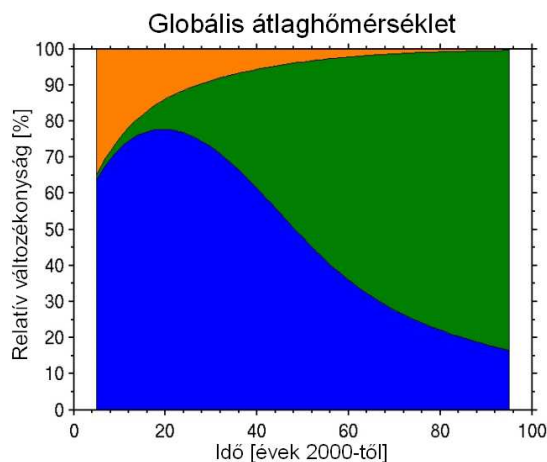
- A harmadik leskálzási módszer a regionális klímamodellezés (Giorgi and Bates, 1989). E modellek fizikai alapja a globális modellekéhez hasonló, azaz ugyanazt az egyenletrendszert oldják meg. A számításokat viszont egy kisebb területre, például egy kontinensre végzik el, ezáltal jelentősen megnövekedhet a modell felbontása (jelenleg 10-25 km) irreális számítógép-kapacitás igénye nélkül. A modell számára a kezdeti feltételeken túl határfeltételeket is meg kell adni, mellyel figyelembe vehetjük a tartományon kívül zajló folyamatokat. E határfeltételeket leggyakrabban globális modellek szolgáltatják.

1.6. A klímamodellezésben rejlő bizonytalanságok

Látható tehát, hogy az éghajlat folyamatainak és jövőbeli viselkedésének modellezése rendkívül összetett feladat, s ebből adódóan többféle bizonytalanságot rejt magában (1.6.1. ábra; illetve Hawkins and Sutton, 2009, 2010):

1. Ez egyrészt az éghajlati rendszer szabad belső változékonyságából adódik. E belső változékonyság minden időskálán megfigyelhető: ezzel magyarázhatjuk a földtörténeti időkben többször lezajlott glaciális ciklusokat, de rövidebb időskálán egy az átlagosnál szárazabb, vagy nedvesebb év előfordulása is ennek köszönhető.
2. Ahogy arra már utaltam, az emberi tevékenység jövőbeli alakulása is többféle pályát követhet, s a különböző feltételezéseken alapuló forgatókönyvek nagy eltéréseket okozhatnak a globális modelleredményekben. Ez a hatás azonban kétséltetett: a forgatókönyvek eltéréseiből származó bizonytalanság csak hosszabb időskálán, az évszázad második felétől érezteti a hatását.
3. Az egyes modellek közötti különbségek szintén bizonytalanságot eredményeznek. A modellek a fizikai folyamatokat eltérő módon írják le, különböző parametrizációkat és közelítéseket alkalmaznak, amelyek eltérő eredményekhez vezethetnek a szimulációk során. A regionális modellezés esetében ezen felül

további bizonytalanságot jelent a különböző területre, más felbontással, határfeltételekkel történő modellfuttatás.



1.6.1. 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, 2009,2010).

1.7 A PRUDENCE és az ENSEMBLES projekt

A fenti bizonytalanságok okán nem támaszkodhatunk csupán egyetlen modelleredményre. Nagyon fontos, hogy több szimuláció készüljön ugyanazon területre. Ezek összehasonlítása információt szolgáltat a projekció valószínűségéről. Ugyanis, ha a modellek jó egyezést mutatnak, akkor arra a területre, változóra nagy bizonyossággal tudunk információt adni a jövő klímaváltozásával kapcsolatban, illetve a különböző modelleredmények nagy bizonytalanságot sejtetnek. A bizonytalanságok összetett vizsgálata és a több modellkísérlet együttes megvalósítása érdekében több európai projekt is létrejött, köztük elsőként a PRUDENCE projekt (Christensen, 2005). A projekt célja volt több regionális klíma-szimuláció végrehajtása az évszázad végére, valamint a szélsőséges időjárási események jövőben történő megváltozásának megbízható becslését szintén fontosnak tartották. A több modellfuttatás lehetővé tette a bizonytalanságok vizsgálatát is. A regionális klímamodellek 50 km-es rácsfelbontással futottak, melyek számára a kezdeti és határfeltételeket általános cirkulációs modellek szolgáltatották. A sugárzási kényszert pedig kapcsolt légkör-óceán általános cirkulációs modellekkel két kibocsátási forgatókönyv (a pesszimistább A2 és az optimistább B2) alapján írták le.

Ezt követte a 2004-2009 között zajlott ENSEMBLES projekt (van der Linden et al., 2009). Míg a PRUDENCE projektben inkább 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:

- A legújabb, nagyfelbontású, Európában fejlesztett globális és regionális modellek alkalmazása
- Nagyfelbontású, minőségileg ellenőrzött, Európát lefedő rácsponti megfigyelési adatbázis létrehozása a nemzeti mérési adatok felhasználásával, s segítségével a modelleredmények validálása. Ennek eredményeként jött létre az ún. ECA (European Climate Assessment) adatbázis (*Haylock et al., 2008*), amelyet én is használtam a vizsgálataim elvégzéséhez.
- Átfogó ensemble vizsgálati módszer kidolgozása, hogy számszerűsítsék az éghajlati rendszer modellezésében lévő bizonytalanságokat.

Az ENSEMBLES projektben tizenöt intézet futtatott regionális klímamodelleket már 25 km-es horizontális felbontáson, amelyeknek öt globális modell szolgáltatja a kezdeti és határfeltételeket. E globális modellekben viszont a PRUDENCE projekttől eltérően már csak egy SRES forgatókönyvet, az A1B scenáriót használták, mely egy „átlagos” forgatókönyv az optimista és a pesszimista scenáriók között. Összesen 25 RCM/GCM kombinációval végeztek a teljes XXI. századot lefedő szimulációkat.

Hazánkban az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ), illetve az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Meteorológiai Tanszékén foglalkoznak regionális klímamodellezéssel. E két intézményben négy modellt adaptáltak: az OMSZ-nál az ALADIN-Climate 4.5 és REMO 5.0, az ELTE-n a RegCM és PRECIS 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. E négy modelles család közül hármat az ENSEMBLES projekt keretein belül is futtattak más tartományon, eltérő rácsfelbontással, illetve különböző modellverzióval.

2. Vizsgálatok

A dolgozat célja egyrészt modelljeink működésének jobb megértése, s mivel ezen modellek hazánkban is elérhetőek, ez mélyrehatóbb vizsgálatokat tesz lehetővé. Másrészt azzal, hogy a hazai (mini-)ensemble vizsgálatokban részt vevő modellek számát tovább bővítjük – olyan modellekkel, amelyeket már bizonyos mértékben ismerünk –, árnyaltabb képet kaphatunk a Kárpát-medence jövőbeli éghajlatának alakulásáról, s ezáltal a régióra vonatkozó modellezésben rejlő bizonytalanság még jobban feltérképezhető.

Az ENSEMBLES modellek közül a hazai eredményekkel való összehasonlítás érdekében a következő három modell került kiválasztásra: a francia meteorológiai szolgálatnál fejlesztett és futtatott ALADIN-Climate 4.5 és 5.1 verziója, a hamburgi Max Planck Intézet REMO 5.7 modellje, illetve az eredetileg NCAR-ban (National Center for Atmospheric Research) kifejlesztett, majd a trieszti Abdus Salam Nemzetközi Elméleti Fizikai Intézet (International Centre for Theoretical Physics, ICTP) kutatócsoportja által továbbfejlesztett RegCM3 regionális klímamodell. 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 és RegCM modellek határfeltételeit az ECHAM5/MPI-OM kapcsolt, míg az ALADIN modellnél az ARPEGE-Climate általános légköri klímamodell szolgáltatta. Az ALADIN modellt hazánkban 25 és 10 km-es felbontással is futtatták, előbbi Közép- és Kelet-Európa, utóbbit a Kárpát-medence térségére, a RegCM-et szintén a Kárpát-medencére 10 km-es felbontással, a REMO modellt pedig 25 km-es horizontális felbontással Közép-és Kelet Európára futtatták (*2.1. ábra*). A hazai RegCM kísérlet esetében meg kell említeni, hogy a 10 km-es modellfuttatás nem közvetlenül, hanem egy 25 km-es RegCM futtatás közbeiktatásával skálázta le az ECHAM5/MPI-OM modell eredményeit. Az ALADIN és RegCM modellek esetén három időszakra, 1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100-ra készültek szimulációk, míg a REMO-val egy az 1951–2100 időszakot folytonosan lefedő (ún. tranziens) modellkísérletet hajtottak végre. (Itt meg kell jegyezni, hogy a dolgozat megkezdése óta az ALADIN-Climate modell eredményei is az 1961–2100 időszakon állnak rendelkezésre). Az ENSEMBLES projektben 25 km-es horizontális felbontással Európa területére 1961–2100-ig (néhány esetben 2050-ig) terjedő tranziens futtatásokat végeztek. A jövőbeli projekciók készítésekor mind hazánkban, mind külföldön az átlagosnak tekinthető A1B forgatókönyvet használták, ugyanis mint korábban említettem, az évszázad első feléig nem

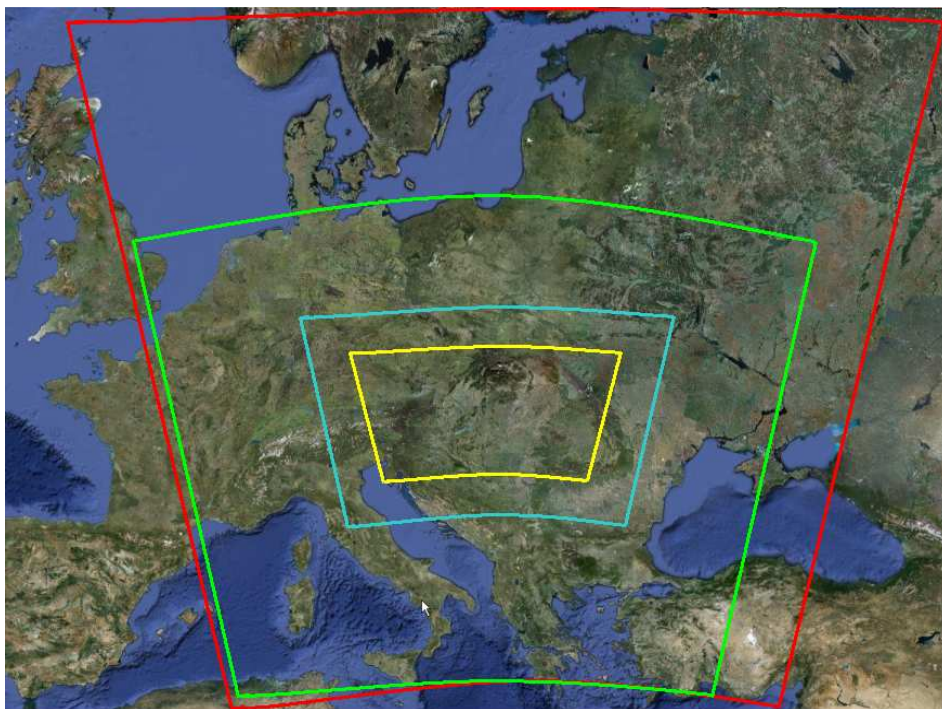
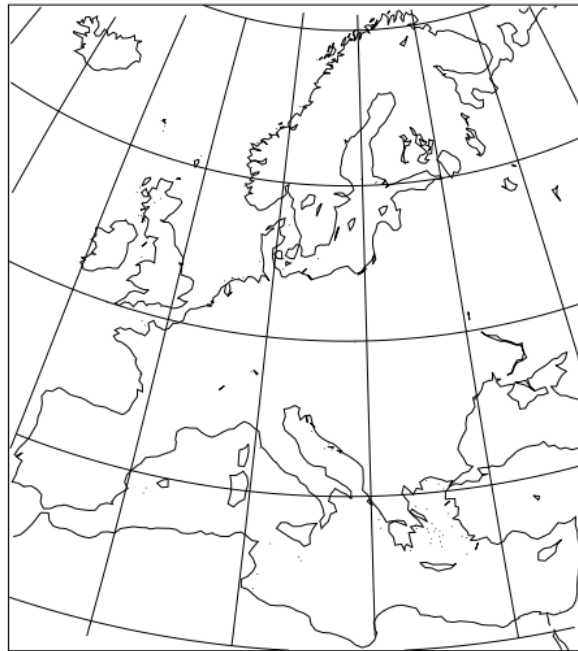
adódnak különbségek az eltérő scenárióval, de ugyanazon modellel történő futtatás esetén, s a forgatókönyv választás csak az évszázad végén érezteti hatását.

	ENSEMBLES kísérletek				Hazai kísérletek		
	ALADIN-Climate		REMO	RegCM	ALADIN-Climate	REMO	RegCM
Verzió	4.5	5.1	5.7	3	4.5	5.0	3
Intézet	Météo France	Météo France	Max Planck Intézet	ICTP	OMSZ	OMSZ	ELTE
Felbontás	25 km	25 km	25 km	25 km	25 és 10 km	25 km	10 km
Tartomány	Európa	Európa	Európa	Európa	Közép- és Kelet-Európa, Kárpát-medence	Közép- és Kelet-Európa	Kárpát-medence
Időszak	1951–2050	1951–2100	1951–2100	1951–2100	1961–1990 2021–2050 2071–2100	1951–2100	1961–1990 2021–2050 2071–2100
Határfeltételek	ERA-40 és ARPEGE-Climate	ARPEGE-Climate	ERA-40 és ECHAM5/MPI-OM	ERA40 és ECHAM5/MPI-OM	ERA-40 és ARPEGE-Climate	ERA-40 és ECHAM5/MPI-OM	ERA-40 és ECHAM5/MPI-OM (RegCM_25)

2.1 táblázat. A dolgozatban vizsgált modellek és modellkísérletek jellemzői.

Mielőtt a modellek jövőre történő szimulációit megkezdjük, 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. A dolgozatban a kiválasztott modellkísérletek 1961–1990 időszakra történő validációját végeztem el, amihez a referenciát rácsra interpolált megfigyelések szolgáltatták. A modellhibák ismerete segíti a modellfejlesztést, s a vizsgálataimban megkísérletem magyarázatot adni egyes hibák eredetére. A gyakorlatban azonban a fejlesztés nagyon időigényes folyamat, ezért a jövőre vonatkozó szimulációk készítésénél a felismert modellgyengeségeket nehezen tudják figyelembe

venni. Ezt a dolgot sem tűzte ki célul, a modellprojekciókat a 2021–2050 időszakra értékeltem ki, az 1961–1990 időszak adott modellátlagaihoz viszonyítva a változásokat.



2.1. ábra. Az ENSEMBLES (fent), valamint a hazai (lent) modellek által lefedett tartományok. Az alsó képen látható színes keretek az egyes modellek tartományának határát jelölik (piros: ALADIN_25km, zöld: REMO, kék: RegCM, sárga: ALADIN_10km).

3. Eredmények

3.1. Validáció

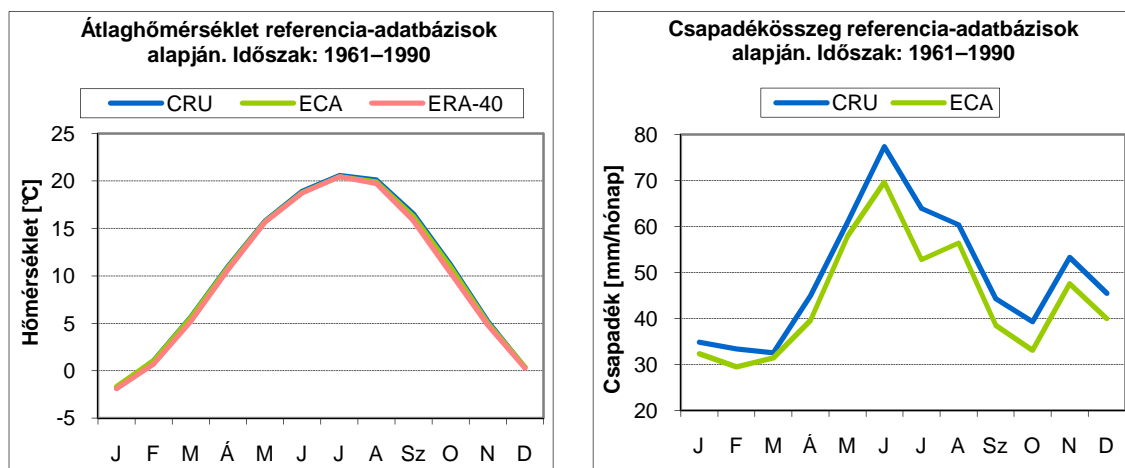
A modellek múltbeli időszakon való tesztelése során kétféle szimulációt vizsgálnak:

1. Egyrészt a regionális modellek számára szükséges határfeltételeket szolgáltathatja egy tökéletesnek mondható, múltra előállított ún. re-analízis adatbázis. A leggyakrabban használt ilyen adatbázis az ERA-40 (*Simmons and Gibson, 2000*), amelyet az Európai Középtávú Előrejelző Központban (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) futtatott globális időjárási modell segítségével modern adatasszimilációs módszerek alkalmazásával készítettek numerikus előrejelzések, az 1957 és 2002 között fellelhető (felszíni, magaslégköri, távérzékelési, stb.) mérések és egyéb információk felhasználásával. Az adatbázis 60 függőleges szinten, 125 km-es horizontális és 6 órás időbeli felbontásban áll rendelkezésre. A re-analízis adatbázissal történő futtatás során a kezdeti és határfeltétel mezőket „tökéletesnek” feltételezzük (*3.1.1. ábra*), ezért a kapott eredmények elsősorban a regionális modellek hibájáról nyújtanak információt. Továbbá elvárjuk, hogy a re-analízisek leskálázásával végrehajtott modell-szimulációk megfelelően jellemezzék ne csak a több évtizedre jellemző átlagos éghajlati viszonyokat, de az egyes éveket is.
2. Másrészt szükséges a regionális klímamodellek globális modellekkel történt meghajtásának múltra vonatkozó vizsgálata is, mivel a klíma-projekciók során a határfeltételeket már csak globális modellek szolgáltathatják. Ezért fontos tudni, hogy e határfeltételek pontatlansága milyen további hibával terheli a regionális eredményeket. Mivel a globális klímamodellek csak egy hosszabb időintervallum éghajlati viszonyait képesek visszaadni, ezért ezeknél az eredményeknél megelégszünk azzal, ha a modell ezen időszakra átlagosan jól teljesít. A globális modellek peremfeltételként való alkalmazása nem felétlenül jár a hiba növekedésével, ugyanis a rendszer nemlineáris volta és a két modell közötti kölcsönhatások következtében a globális és regionális modell egyedi hibái olykor „semlegesíthetik” egymást.

A validáció elvégzéséhez nélkülözhetetlen a jó minőségű, finom felbontású, rácsponti megfigyelés. A dolgozatban az ENSEMBLES eredményeket az ECA 3.0 (European Climate Assessment vagy E-OBS adatok; *Haylock et al., 2008*), míg a hazai eredményeket többnyire a CRU TS2.1 (Climatic Research Unit; *Mitchell et al., 2004*) megfigyelési

adatbázissal hasonlítottuk össze. Ennek oka az, hogy a hazai eredményeket az OMSZ és ELTE kutatói a korábbi években már kiértékeltek a CRU adatbázissal, ezt az átfogó munkát nem szerettem volna megismételni. A dolgozat elsődleges célja az ENSEMBLES modelleredmények feldolgozása, melynek során a validációt a jelenleg legmegbízhatóbb rácsponti adatbázis felhasználásával kívántam elvégezni. Mindkét megfigyelési adatbázis nemzeti adatsorokra támaszkodva készült, az ECA esetében 25, a CRU esetében megközelítőleg 18 km-es (10-ívperces) térbeli felbontással. Bár a felbontást illetően a CRU előnyösebb választás, mégis elterjedtebb az ECA adatbázis használata, mivel alapját homogenizált napi adatok, minimum- és maximum hőmérsékletek képezik, míg a CRU adatbázisban havi átlagok szerepelnek.

Hogy képet kapjunk arról, hogy a referencia adatbázisok Magyarország felett hogyan viszonyulnak egymáshoz, ezek havi átlaghőmérsékleteit és csapadékösszegeit az *3.1.1. ábra* szemlélteti. Láthatjuk, hogy az átlaghőmérséklet havi értékeit a különböző adatbázisok nagy egyetértéssel jellemzik. A csapadék évi menetét szintén hasonlóan írják le, az egyes hónapok csapadékösszegére viszont különböző értékeket adnak: a CRU alapján több csapadék hullott a referencia-időszakban, s az eltérés a két adatbázis között nyáron a legnagyobb (júliusban 20%), tavasszal a legkisebb (márciusban 5%).



3.1.1. ábra. A felhasznált referencia adatbázisok alapján készített havi átlaghőmérséklet [°C] (balra) és csapadékösszeg [mm/hónap] (jobbra) Magyarország felett. Időszak: 1961-1990.

A vizsgálatok során Európára vonatkozóan átlagos évi, évszakos és havi hibaterképeket készítettem az ENSEMBLES honlapjáról (<http://ensemblesrt3.dmi.dk>) letöltött havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg adatokból, Magyarországra nézve pedig havi átlagokat, illetve átlagos eltéréseket számoltam.

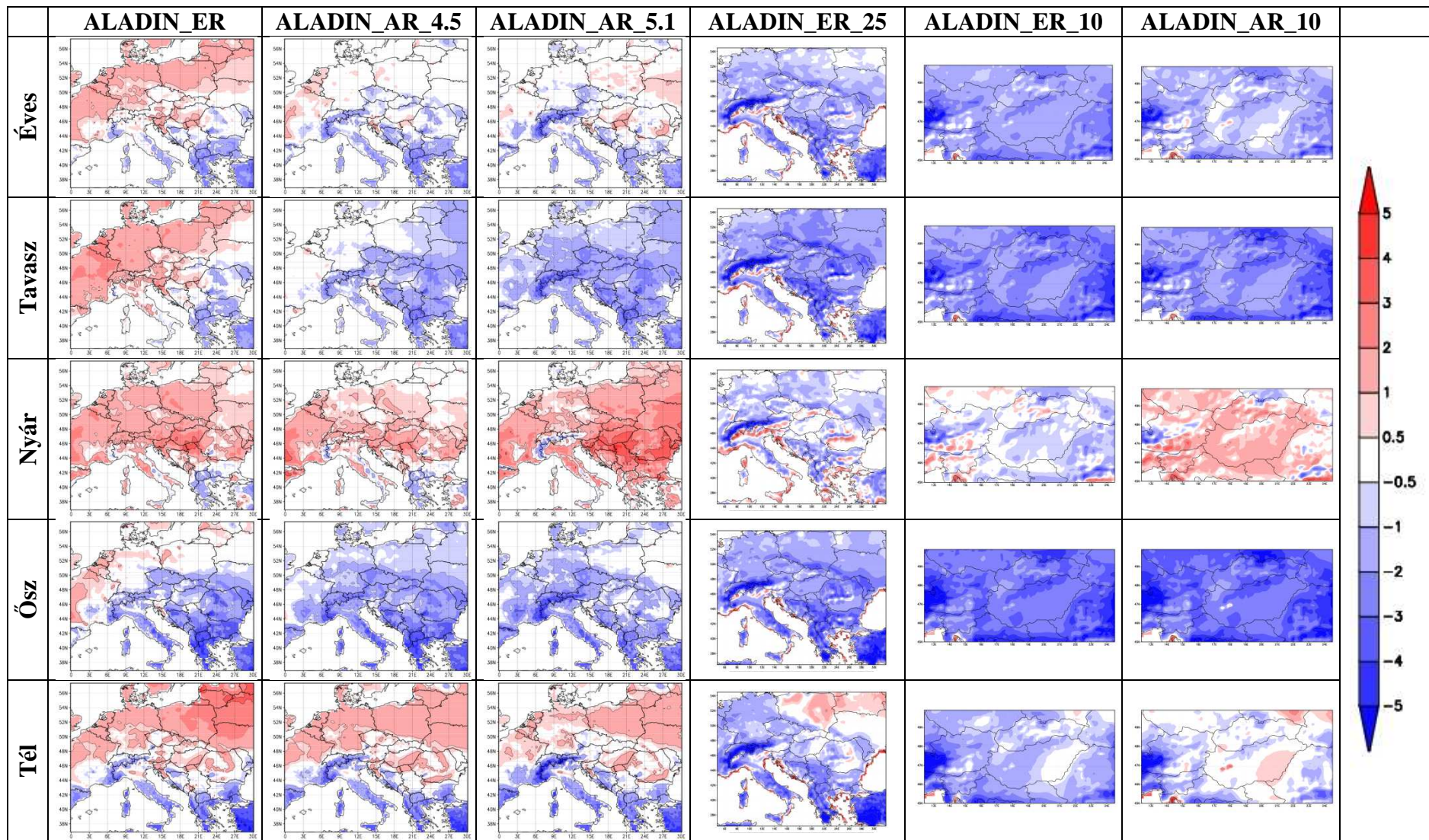
Hőmérséklet

ALADIN-Climate

Az éves hibák térbeli vizsgálata során elmondható (3.1.2 ábra), hogy az ALADIN modellnek a hazai szimulációkban tapasztalt egyöntetű hűvösségét (felülbecslések egyedül a partokon, illetve a nagyobb tartomány esetében a hegyvidéki területeken láthatók) az új eredmények némiképp „ellensúlyozzák”. Ugyanis a modell az északi területek éves átlaghőmérsékletét már inkább felülbecsli (de a déli területeken továbbra is az alulbecslés jellemző), bár az ARPEGE adta peremfeltételekkel e terület éves viszonyait pontosan írja le.

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál az ALADIN modellt 10 km-es felbontású rácson is futtatták, s az ERA-40 meghajtású kísérletnél ez nagyobb (negatív) hibákat eredményezett, mint a 25 km-es felbontással (Csima és Horányi, 2008). A legnagyobb hibák a tartomány határára esnek – mely érinti, illetve metszi az Alpok és Kárpátok hegyvonulatait (2.1. ábra) –, ami egyrészt a határfeltételek numerikus kezeléséből ered, másrészt abból, hogy a modellek nem pontosan írják le a topográfiai viszonyokat, s e kettő kölcsönhatása a határfeltételeken keresztül nagy hibákat vihet a regionális modellbe. Ezért a tartományt lehetőség szerint úgy kell kijelölni, hogy annak határai távol legyenek a hegységektől. (Erre az ALADIN kísérlet esetében nem volt mód, mert a tartomány megválasztásánál szem előtt kellett tartani a felbontás finomítása miatt megnövekedett számítási kapacitást). Az ENSEMBLES kísérletek esetében hasonló zajok megjelenését azért nem láthatjuk, mert a kiértékelési területet az ECA adatbázis kiterjedése határozta meg, ami jóval kisebb a modell integrálási tartományánál.

A modellek általában nehezebben tudják visszaadni a magashegységek területének jellemző éghajlati viszonyait, mely az orográfia már korábban említett pontatlan leírásából adódik. Így nem meglepő, hogy a hazai szimulációkban a magasabb területeken jelennek meg a legnagyobb hibák. Az ENSEMBLES-beli ALADIN re-analízissel végzett meghajtásában ez a fajta gyengeség nem jelentkezik ilyen markánsan.



3.1.2. ábra. A szimulált éves és évszakos átlaghőmérsékletek eltérése a mérésektől [°C] az 1961–1990 időszakban az ENSEMBLES-beli (első három oszlop), valamint a hazai (utolsó három oszlop) ERA40- és ARPEGE-meghajtású ALADIN-Climate modell kísérleteire.

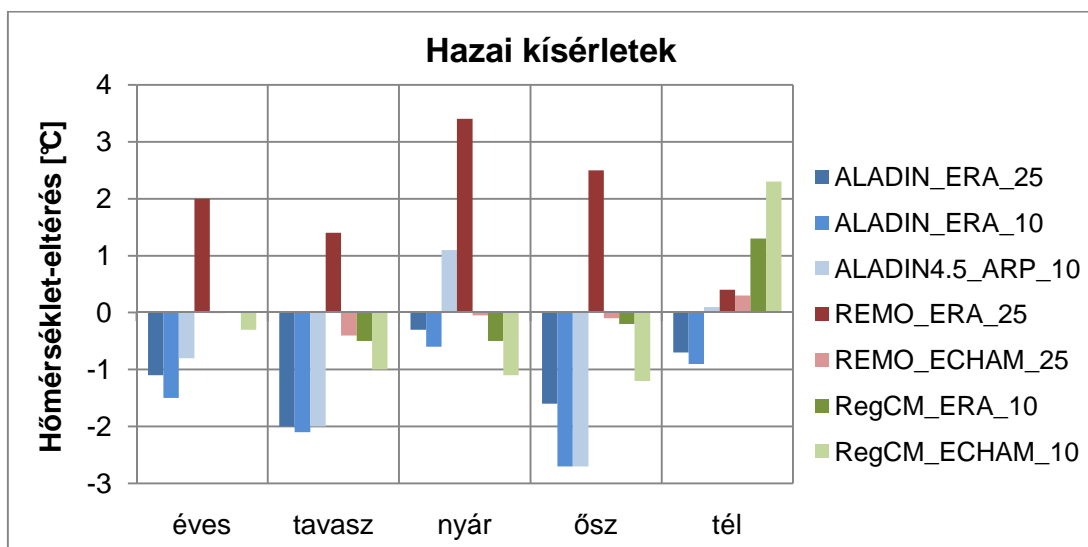
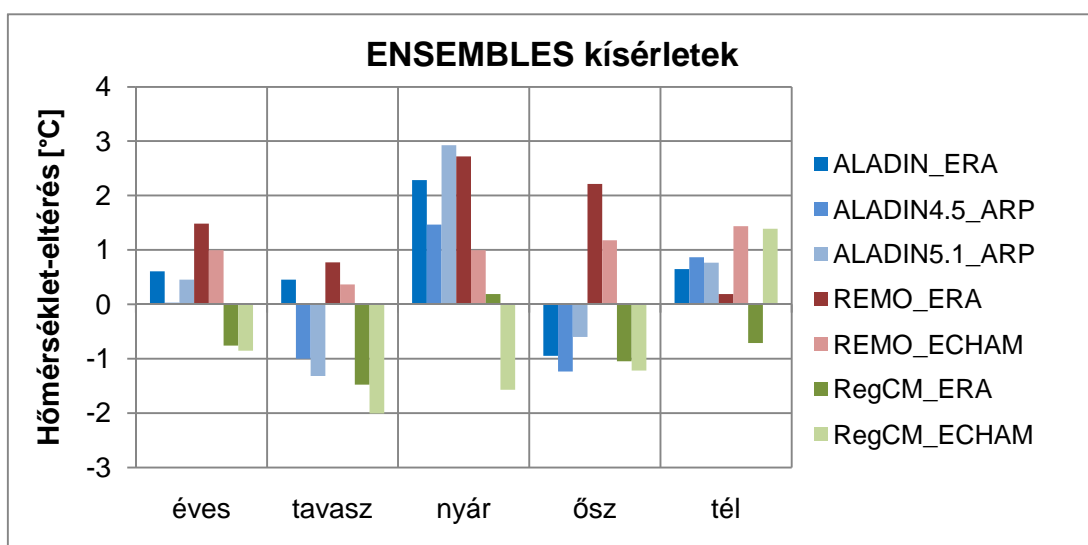
Az évszakos átlagoknál már árnyaltabb különbségek jelennek meg (3.1.2. ábra). A téli évszakban a Météo France-nál futtatott kísérletben szintén jelentkezik az éves átlagokban megfigyelt hibák térbeli eloszlása, nevezetesen, hogy egy szinte tökéletes (0,5 foknál kisebb hibával rendelkező) sávtól északra a pozitív hibák, délre a negatív hibák helyezkednek el. A hegységek területére koncentrálva láthatjuk, hogy az év első felében (tavasszal és nyáron) pozitív, míg az év második felében negatív hibákkal jellemzi az Alpok térségét, ezáltal éves átlagban itt „pontos” becslések adódnak. Az ENSEMBLES és a hazai kísérletekben továbbra is ellentétek mutatkoznak, mivel utóbbi esetben egész évben alábecslés jellemzi a tartományt, leszámítva az éves átlagában megfigyelt part menti és hegyvidéki fölébecslési pontokat, amelyek minden évszakban jelentkeznek.

Magyarországra az ENSEMBLES re-analízis meghajtású ALADIN modellje az ősz kivételével minden évszakban a valóságosnál magasabb hőmérsékletet jelez, tavasszal a legkevésbé és nyáron a leginkább (3.1.3. ábra). Ezzel szemben a 25 km-es felbontású hazai modellváltozatban többnyire alábecslés dominál. Tekintve, hogy az ENSEMBLES és a hazai modellkísérletekben a re-analízis határfeltételek, az alkalmazott modellverzió, valamint a horizontális térbeli felbontás megegyeznek, ezért a különbségeket a tartomány számlájára írhatjuk. Látható (2.1. ábra), hogy az ENSEMBLES kísérletek esetében az integrálási tartomány azon túl, hogy egész Európát lefedi, teljes egészében magában foglalja a Földközi-tengert, továbbá belenyúlik az Atlanti-óceánba is, s ezek döntően meghatározzák a regionális modell által leírt cirkulációt.

Az ENSEMBLES-beli modell ARPEGE határfeltételekkel történő futtatása Magyarországot és a tőle északra fekvő területeket az átmeneti évszakokban negatív hibákkal, nyáron és télen pedig pozitív hibákkal jellemzi – miként a hazai eredményekben. Ezekben a kísérletekben tehát jóval nagyobb egyezés figyelhető meg, mint a re-analízis meghajtású szimulációkban, ami arra enged következtetni, hogy ebben az esetben nem a tartomány, nem is a felbontás, hanem sokkal inkább a határfeltételek határozzák meg a hőmérsékleti viszonyokat. A hazai 10 km-es felbontású kísérletek esetében az éves eredményeknél már említett, az integrálási tartomány pereménél fellépő problémát tavasszal, ősszel és télen egyaránt tapasztaljuk a tartomány déli és keleti határa mentén.

Ami az ENSEMBLES-ben alkalmazott két ALADIN-Climate (4.5 és 5.1) modellverziót illeti, az ALADIN 5.1 az év első felében valamivel gyengébben teljesít, mint elődje. Nevezetesen tavasszal az egész tartományon egyöntetűen hideg, míg nyáron egyöntetűen meleg, s ezek a hibák markánsabbak, mint az ALADIN 4.5 esetében. Ősszel viszont az újabb modell-szimulációval kapjuk a pontosabb becslést. A két regionális

modell peremfeltételeit ugyanaz a globális ARPEGE-Climate modellverzió szolgáltatja, valamint a fizikai parametizációjuk lényegében megegyezik, a talaj mélyebb rétegeit azonban eltérő módon kezelik. A 4.5-ös modellváltozatban a mélyebb talajrétegek nedvességét mesterségesen „relaxálják” az ARPEGE mezőkhöz, mert ha ezt nem tennék, akkor a felszín-légkör kölcsönhatások következtében a nyári hőmérsékletértékek „túlmelegednének”. Az újabb ALADIN-Climate verzióban egy fejlettebb leírást használnak ezekre a folyamatokra, ami szükségtelenné teszi a relaxációt. A nyári felülbecslés ezáltal csökkent, de a javítás még nem éri el azt a mértéket, amit a 4.5-ös változat esetében a relaxáció hozott.

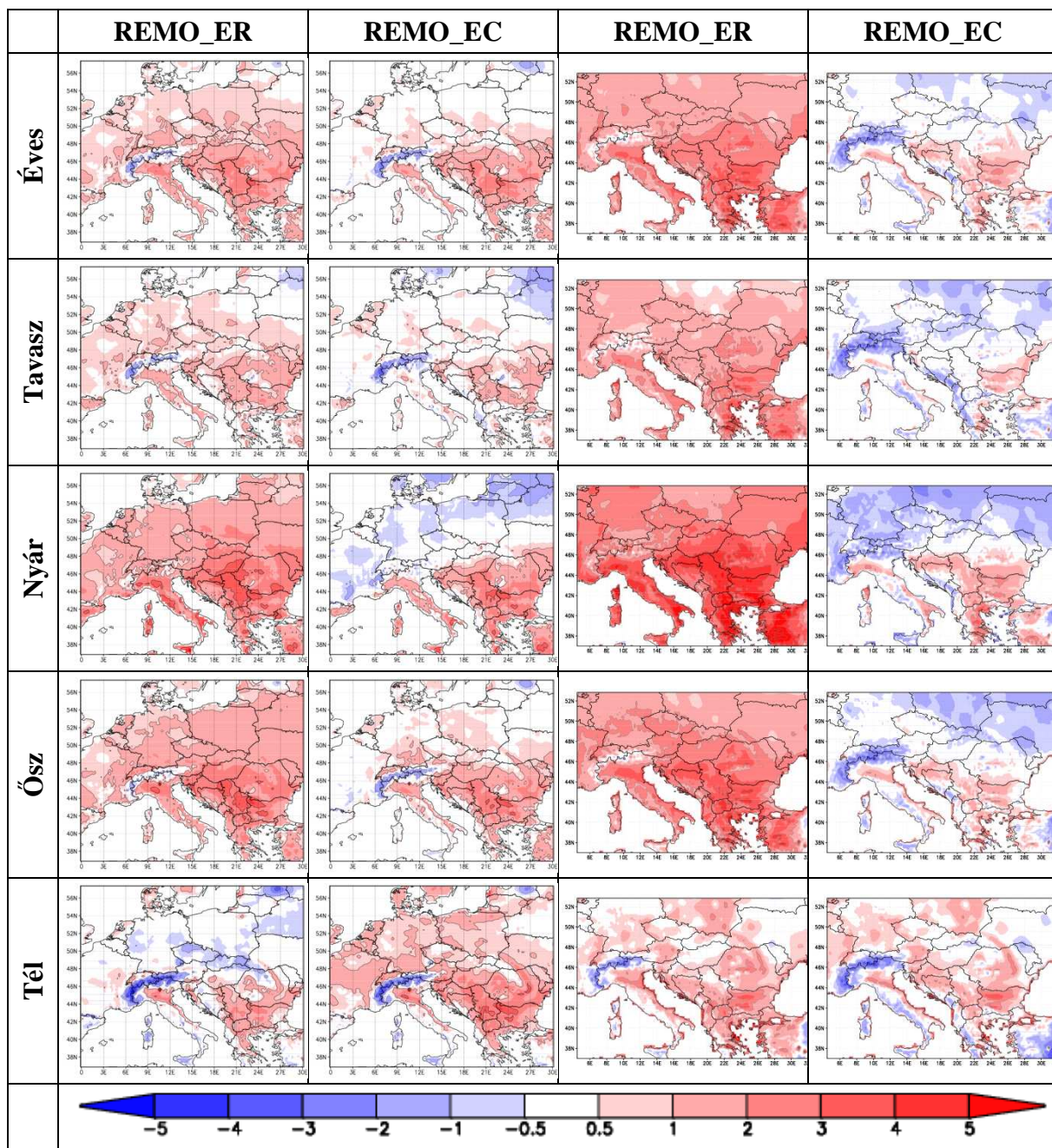


3.1.3. ábra. Az ENSEMBLES (fent) és a hazai (lent) kísérletek éves és évszakos hőmérséklet-eltérése [°C] Magyarország felett, az ENSEMBLES eredmények esetében az ECA, a hazai eredmények esetében a CRU adatbázishoz viszonyítva. Időszak: 1961-1990.

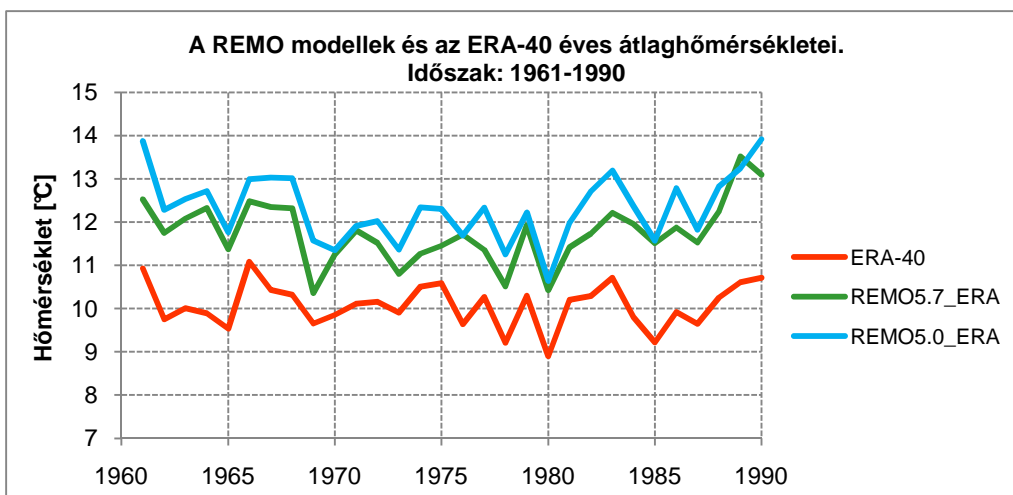
REMO

A REMO re-analízissal történő meghajtása esetében az éves átlagokat tekintve (3.1.4. ábra) az ENSEMBLES és a hazai eredmények összhangban vannak, azaz szinte egész Európát melegebbnek találják a valóságnál. Egyedül az Alpok térségében jelennek meg negatív hibák. A legnagyobb fölébecslés a Kárpát-medence, illetve az attól délkeletre fekvő területek felett látható. A hibák mértéke viszont eltérő: a hazai modellkísérletek 1-2 fokkal nagyobb felülbecslést mutatnak. A pozitív hőmérsékleti hibák hátterében az állhat, hogy a REMO modell a leskálázás során egy járulékos melegedést vezet be a peremfeltételek mezőibe, így az eredetileg realiztikus ERA-40 hőmérséklet-értékek „elromlanak” mindkét kísérletnél (3.1.5. ábra). A romlás nagyobb hazai mértéke adódhat egyfelől az eltérő modellváltozat, másfelől a kisebb modelltartomány alkalmazásából (2.1. ábra).

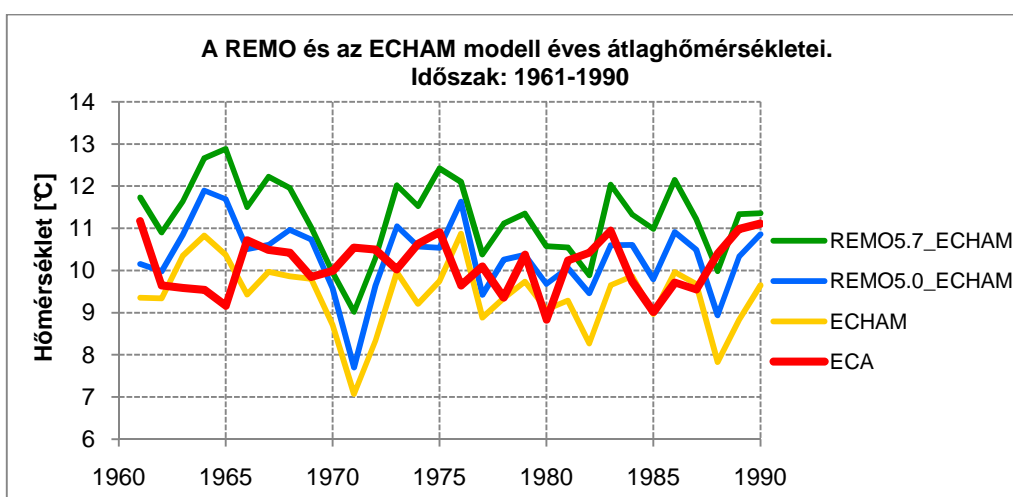
Az ECHAM peremfeltétellel készült kísérleteknél viszont előjelbeli eltérések tapasztalhatók: míg a Max Planck Intézetben futtatott modell az északi területeket pontosan írja le, a hazai eredményekben itt alábecslések láthatók. Ugyanakkor Európa délkeleti része felett az ENSEMBLES-ben használt 5.7-es modellváltozat jóval nagyobb fölébecslést eredményezett. Tudjuk, hogy a Kárpát-medence felett az ECHAM modell alacsonyabb hőmérsékletet ad a valóságnál, s ehhez a REMO 5.0 modell egy melegítést ad (3.1.6. ábra, illetve Szépszó és Horányi, 2008). Az eredményekből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a REMO5.7 nagyobb melegítést okoz a leskálázás során, mint a nálunk alkalmazott korábbi 5.0 modellverzió, mely adódhat a két regionális modell közötti különbségből, de eltérések származhatnak ugyanazon modell, különböző tartományon történő futtatásából is.



3.1.4. ábra. A szimulált éves és évszakos átlaghőmérsékletek eltérése a mérésektől [$^{\circ}\text{C}$] az 1961–1990 időszakban az ENSEMBLES-beli (első két oszlop), valamint a hazai (utolsó két oszlop) ERA40- és ECHAM-meghajtású REMO modell kísérleteire.



3.1.5. ábra. Az ERA-40 (piros), valamint az ENSEMBLES-beli (zöld) és a hazai (kék) REMO re-analízis meghajtású kísérletei által szimulált éves átlaghőmérsékletek [°C] Magyarország felett. Időszak: 1961-1990.



3.1.6. ábra. Az ENSEMBLES-beli (zöld) és a hazai (kék) REMO globális meghajtású modell, az ECHAM (sárga), valamint az ECA adatbázis (piros) éves átlaghőmérsékletei [°C] Magyarország felett. Időszak: 1961-1990.

Az évszakos átlagokra áttérve a re-analízis meghajtású REMO modell az egész év során az ALADIN-nál jóval homogénebb területi hibaeloszlást mutat, szinte minden évszak melegebb a valóságnál, csupán az Alpok területét szimulálja hidegebbnek (3.1.4. ábra). Az éves átlagban kapott eredményt az évszakos bontás csak kis mértékben finomítja: mindkét verzió nyáron és ősszel az éves átlagnál nagyobb hibákat eredményez (az összes modellel összehasonlítva a legnagyobb hibákat, mely a déli területeken eléri a 3–4 fokot), tavasszal és főként télen a becslés pontosabb. Az ECHAM meghajtással mérsékeltebb fölébecslést kapunk az egyes évszakokban, mint az ERA-40 peremfeltételekkel. A hazai eredményekben ez a fölébecslés kisebb mértékű, mint az

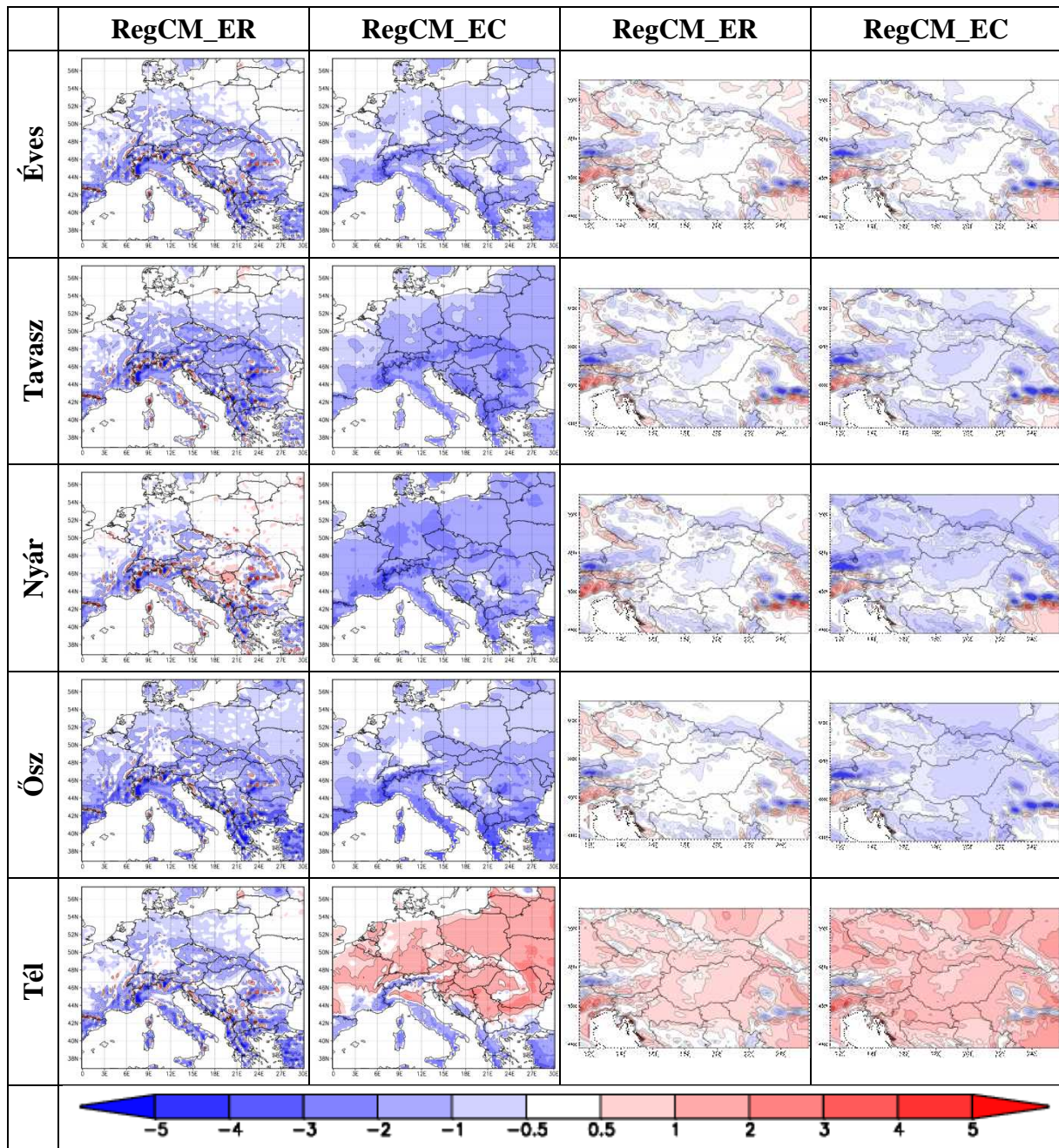
ENSEMBLES kísérletben, viszont itt az éves átlagnál tapasztalt északi negatív hibák tél kivételével minden évszakban megjelennek.

RegCM

A RegCM modell éves átlagait nézve (3.1.7 ábra) különösen az északi területeken az ICTP-ben futtatott modell jobban teljesít a re-analízissel történt meghajtással, a hazai szimulációkban viszont – melyeket nagyobb felbontással kisebb területen végeztek el - a két meghajtás között alig látható különbség. A RegCM az ENSEMBLES modellek közül egyöntetű hűvösségével tűnik ki, a hazai futtatások viszont Magyarország területének évi átlaghőmérsékletét szinte hibátlanul adják vissza. Ez a re-analízissel meghajtott szimuláció esetében nem is „csoda”, a hazai modellkísérletben ugyanis egyes fizikai parametrizációk csomagjait kifejezetten azzal a céllal vizsgálták és hangolták, hogy a hibákat minimalizálják. A változtatások döntően a nagyskálájú csapadék leírását érintették (*Torma et al.*, 2008). Mindkét RegCM re-analízissel végzett szimulációjában a hegységek mentén egymás mellett nagy fölé- és alábecslési pontok láthatók. Azonban míg az ENSEMBLES projektbeli RegCM modellben az ECHAM peremfeltételek alkalmazásával ez a jelenség eltűnik, a hazai eredményekben nem látható változás. Ez annál is érdekesebb, mivel a hazai kísérlet esetében dupla leskálázás történt: a határfeltételeket nem közvetlenül az ECHAM globális mezői szolgáltatták, hanem az ENSEMBLES 25 km-es felbontású RegCM eredményei. Az okokra részben magyarázatot adhat *Torma et al.* cikke (2011), melyből kiderül, hogy a hazai modelleredményeknek a CRU helyett az ECA 1.0.1.1. verziójával való összehasonlítása már nem mutatja ezt a jellegzetes hibaszerkezetet. Mindez megerősíti, hogy az ECHAM-határfeltételek alkalmazásával ez a jelenség valóban nem lép fel olyan markánsan, továbbá arra utal, hogy kisebb felbontása ellenére az ECA adatbázis előállításához használt domborzat-leírás valószerűbb, mint a CRU esetében alkalmazott.

Az RegCM modell évszagos átlagai (3.1.7. ábra) között a globális modell peremfeltételekkel készült futtatás tele kitűnik, hiszen míg a többi évszakban az alábecslés dominál, addig télen a déli területeken kívül mindenütt fölébecslés látható (ez a fölébecslés megjelenik a hazai eredményekben is, azonban ott mindkét futtatásban). Az ENSEMBLES ERA-40 meghajtású kísérletében az évi átlagban látott hibák nyáron, az északi területeken jelentősen mérséklődnek, sőt bizonyos területeken (köztük Magyarországon is) fölébecslés is megjelenik. A hazai modellfuttatások során Magyarország területére pontosabb eredmények születtek, mint az ENSEMBLES szimulációban látottak, különösen a re-

analízis adta peremfeltétel használata során (ami nem meglepő a már említett paraméterhangolás ismeretében) (3.1.3. ábra).



3.1.7. ábra. A szimulált éves és évszakos átlaghőmérsékletek eltérése a mérésektől [$^{\circ}\text{C}$] az 1961–1990 időszakban az ENSEMBLES-beli (első két oszlop), valamint a hazai (utolsó két oszlop) ERA40- és ECHAM-meghajtású RegCM modell kísérleteire.

A hegységek mentén évszakosan is erős és térben gyorsan változó fölé- és alábecslés látható, azonban míg az ICTP-nél futtatott RegCM esetében a szimulált

peremfeltétellel kapott eredményekben e jelenség jelentősen megszűnik, a hazai modell-szimulációkban semmilyen változást nem látunk.

Az évszakos átlaghőmérséklet 1961–1990 időszakon belüli változékonyságát tekintve (3.1.1. táblázat) látható, hogy a múltbeli mérések télen mutatják a legnagyobb (1,2 fokos) és nyáron a legkisebb (0,6 fokos) ingadozást. A modellkísérletek többsége ezt jól visszaadja, kivéve az ENSEMBLES projekt ALADIN modellszimulációit, melyek a nyarat jellemzik a legmagasabb és a tavaszt illetve az ősz a legalacsonyabb szórásértékkel. A RegCM esetében az ECHAM meghajtású szimulációk a nyári viszonyokat jól jellemzik, viszont a legnagyobb változékonyságot nem téltre, hanem tavaszra adják.

	Modellek	tavasz	nyár	ősz	tél
ENS	ALADIN4.5_ERA_25	1,3	1,6	1,0	1,3
	ALADIN_4.5_ARPEGE_25	1,1	1,1	1,3	1,4
	ALADIN_5.1_ARPEGE_25	0,8	1,7	1,2	1,5
OMSZ	ALADIN_4.5_ERA_25	1,1	1,0	1,2	1,3
	ALADIN_4.5_ERA_10	1,1	0,9	1,1	1,2
	ALADIN_4.5_ARPEGE_10	0,8	1,2	1,3	1,4
ENS	REMO5.7_ERA_25	1,3	1,4	1,1	1,9
	REMO_5.7_ECHAM_25	1,3	1,0	1,1	1,3
OMSZ	REMO_5.0_ERA_25	1,3	1,3	1,4	1,8
	REMO_5.0_ECHAM_25	1,2	1,0	1,1	1,4
ENS	RegCM_ERA_25	1,4	1,2	1,0	2,0
	RegCM_ECHAM_25	1,3	0,7	1,0	1,2
ELTE	RegCM_ERA_10	1,1	0,7	1,1	1,4
	RegCM_ECHAM_10	1,3	0,9	1,0	1,1
ECA		1,0	0,6	1,0	1,2

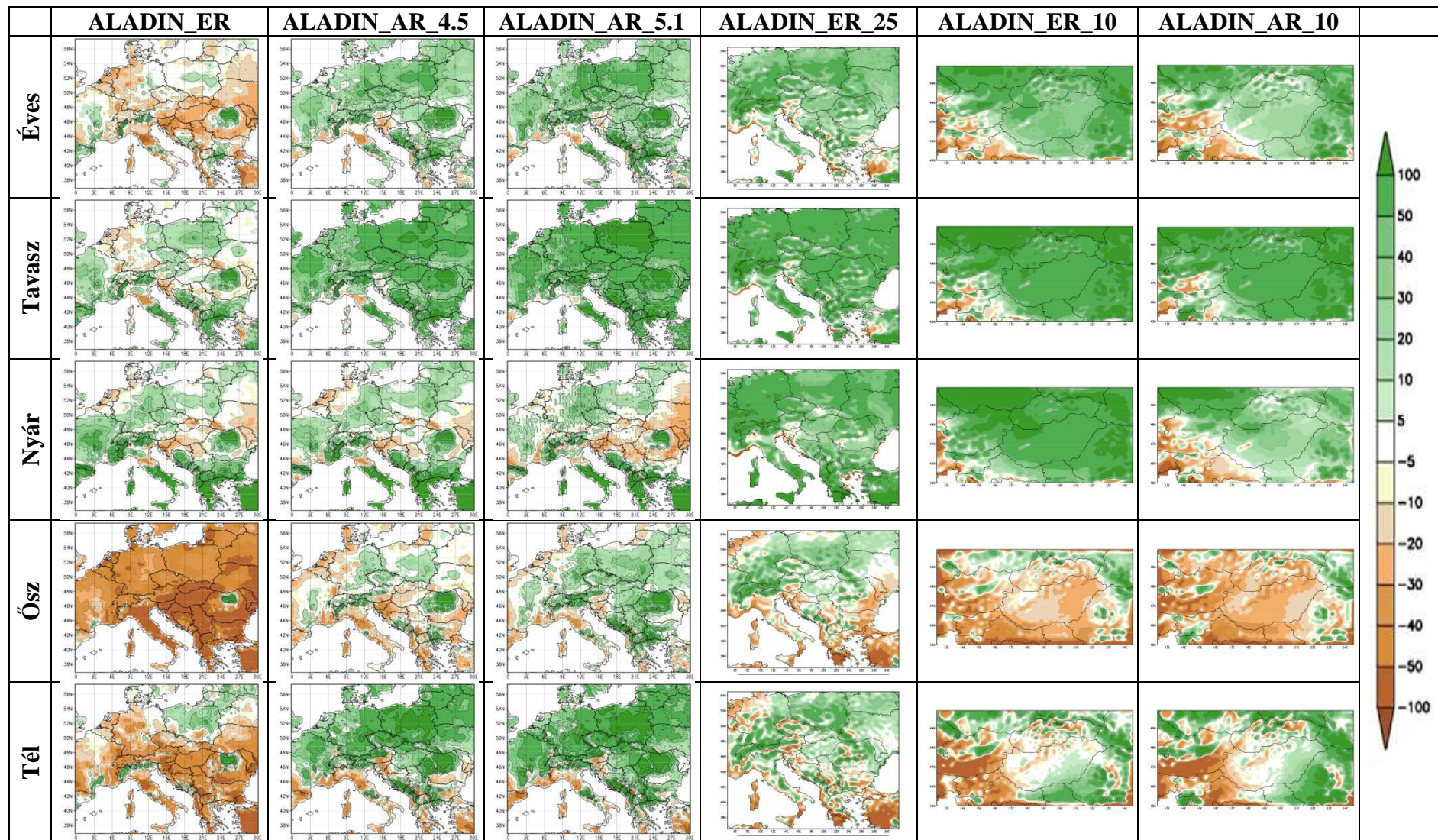
3.1.1. táblázat. A mérések alapján számított (ECA), valamint a modellekkel szimulált évszakos hőmérséklet időbeli szórása [$^{\circ}\text{C}$] Magyarország felett az ENSEMBLES projektbeli (ENS) és a hazai (OMSZ és ELTE) regionális modelleredmények alapján. Időszak: 1961–1990.

Csapadék

A csapadék egy nehezebben modellezhető meteorológia elem, így nem meglepő, hogy a hibaterképeken megjelenő alá- és fölébecslés területileg sokkal változatosabb, mint a hőmérséklet esetében.

Az éves átlagokat tekintve (3.1.8. ábra) az ALADIN modell re-analízissel történő futtatása a terület nagy részén (beleértve Magyarországot is) alulbecsli a csapadékokat, ez alól kivételt képeznek az Alpok és a Kárpátok egyes vonulatai, valamint Európa északi területei. A hazai modell ezzel ellentétben szinte az egész tartományt pozitív hibával jellemzi, csupán a part menti területeken láthatunk alábecslési pontokat. A globális szimulációkkal meghajtott hazai és ENSEMBLES projektbeli modellek már nagyobb hasonlóságot mutatnak, mindkét esetben a Kárpát-medencét pozitív hibával jellemzik – a magyarországi modell azonban pontosabb becslést ad. Az ENSEMBLES projekt keretében futtatott két ALADIN verzió (4.5 és 5.1) közül a korábbi verzió többnyire kisebb hibával becsüli a csapadékokat. A hazai 10 km-es felbontással készült futtatásban csakúgy, mint a hőmérséklet esetében, a tartomány határán nem realiztikus hibák jelennek meg: a fölébecslés területét egy vékony alábecslési sáv szegélyezi.

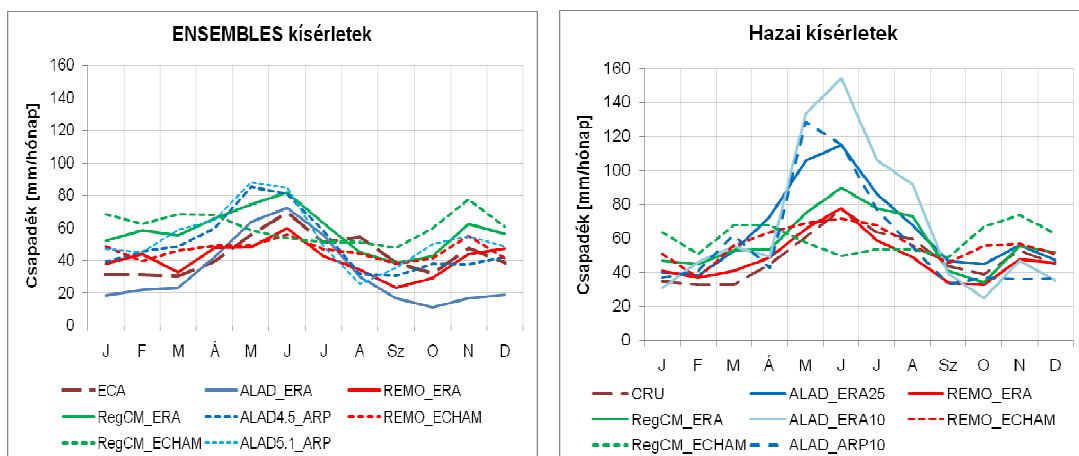
Az évszakos átlagokat tekintve (3.1.8. ábra) elmondható, hogy az ALADIN re-analízissel történő futtatása esetében Magyarország területére tavasszal a modell szinte tökéletesen teljesít (a hiba 3%), nyáron több helyen, ősszel (ekkor a legnagyobb, 50%-ot meghaladó mértékben) és télen viszont teljes mértékben alábecsli a csapadékokat. A hazai 25 km-es felbontással készült modelledményekben ezzel szemben a fölébecslés dominál: a csapadékhiány csak délen jelentkezik ősszel és télen, az északi területeken, illetve tavasszal és nyáron egész Európára csapadéktöbblet látható. A Kárpát-medence felett azonban az eredmények minden évszakban nedvesebbek a valóságnál, ami a finomabb, 10 km-es felbontással készült szimuláció esetében ősszel és télen már nem teljesül. Ősszel a tartomány nagy részén, télen már csak a nyugati részeken (főként a Kelet-Alpokban) kevesebb csapadékokat ad a modell. E két évszakban egyébként a tartomány déli és keleti peremén nagyon erős alábecslések láthatók (mind az ERA-40, mind az ARPEGE peremfeltételek alkalmazásával futtatott kísérletekben), amelyek – csakúgy, mint a hőmérséklet esetében – a határfeltételek kezeléséből eredő zajoknak tudhatók be.



3.1.8. ábra. A szimulált éves és évszakos csapadékösszegek relatív eltérése a mérésektől [%] az 1961–1990 időszakban az ENSEMBLES-beli (első három oszlop), valamint a hazai (utolsó három oszlop) ERA40- és ARPEGE-meghajtású ALADIN-Climate modell kísérleteire.

Az ARPEGE globális modellel készült peremfeltételek használatával nagy hasonlóságot látunk a 4.5 és 5.1 ENSEMBLES modelleredményeiben. Tavasszal az egész tartományt (apró foltok kivételével) jóval nedvesebbnek találják a valóságnál - az újabb verzió kissé nagyobb mértékben, mint az ALADIN 4.5. Nyáron és ősszel a hibák előjele területileg nagyon változatos, hazánk felett azonban az 5.1 verzió őszi évszakát kivéve kevesebb csapadékot jeleznek. Télen a tartomány nagy részén - beleértve Magyarországot is – mindkét változat felülbecsli a csapadékmennyiséget, a déli hegyvidékes területeket viszont negatív hibával jellemzik. A hazai kísérlet eredményei a felbontás és az integrálási terület különbségei ellenére jó egyezést mutatnak az ENSEMBLES-beli 4.5-ös modellváltozat eredményeivel. A hazai szimulációkban a re-analízis és a globális modell szolgáltatott peremfeltételekkel 10 km-es felbontáson készült modell-szimulációk nagyobb egyezést mutatnak, mint az azonos ERA-40 határfeltételekkel, de különböző rácsfelbontással végrehajtott kísérletek.

A hőmérsékleti és csapadékhibák Magyarországra vonatkozó együttes vizsgálata alapján arra következtethetünk (3.1.3. és 3.1.9. ábra), hogy az ENSEMBLES projektbeli ERA-40 meghajtású eredmények esetében a modell által túlmelegített területek egyben túl nedvesek is voltak, a hőmérséklet-alábecslést pedig gyakran csapadékhiány kísérte. Az ARPEGE modellel meghajtott kísérletekben éppen fordított az elrendeződés: a hideg területek felett legtöbbször csapadéktöbblet, a meleg területek felett pedig a csapadék alábecslése volt jellemző. A kétféle viselkedés betudható a peremfeltételek eltérő hatásának: míg a re-analízisek esetében a hűvösebb felszíni hőmérsékletek hatására vélhetően csökken a szimulált párolgás, s ezáltal kevesebb csapadék hullik (pl. ősszel), addig az ARPEGE határfeltételekkel nyáron a melegebb léghőmérséklet a talaj mélyebb rétegeinek kiszáradásához és ezáltal csapadékhiányhoz vezet. Hasonló összefüggés nem állapítható meg a hazai kísérletek esetében, ahol többnyire túl alacsony hőmérsékletértékek és felülbecsült csapadék a jellemzők.



3.1.9. ábra. Az ENSEMBLES (balra) és a hazai (jobbra) modellekkel Magyarország felett szimulált havi csapadékösszeg [mm/hónap]. Időszak: 1961-1990.

REMO

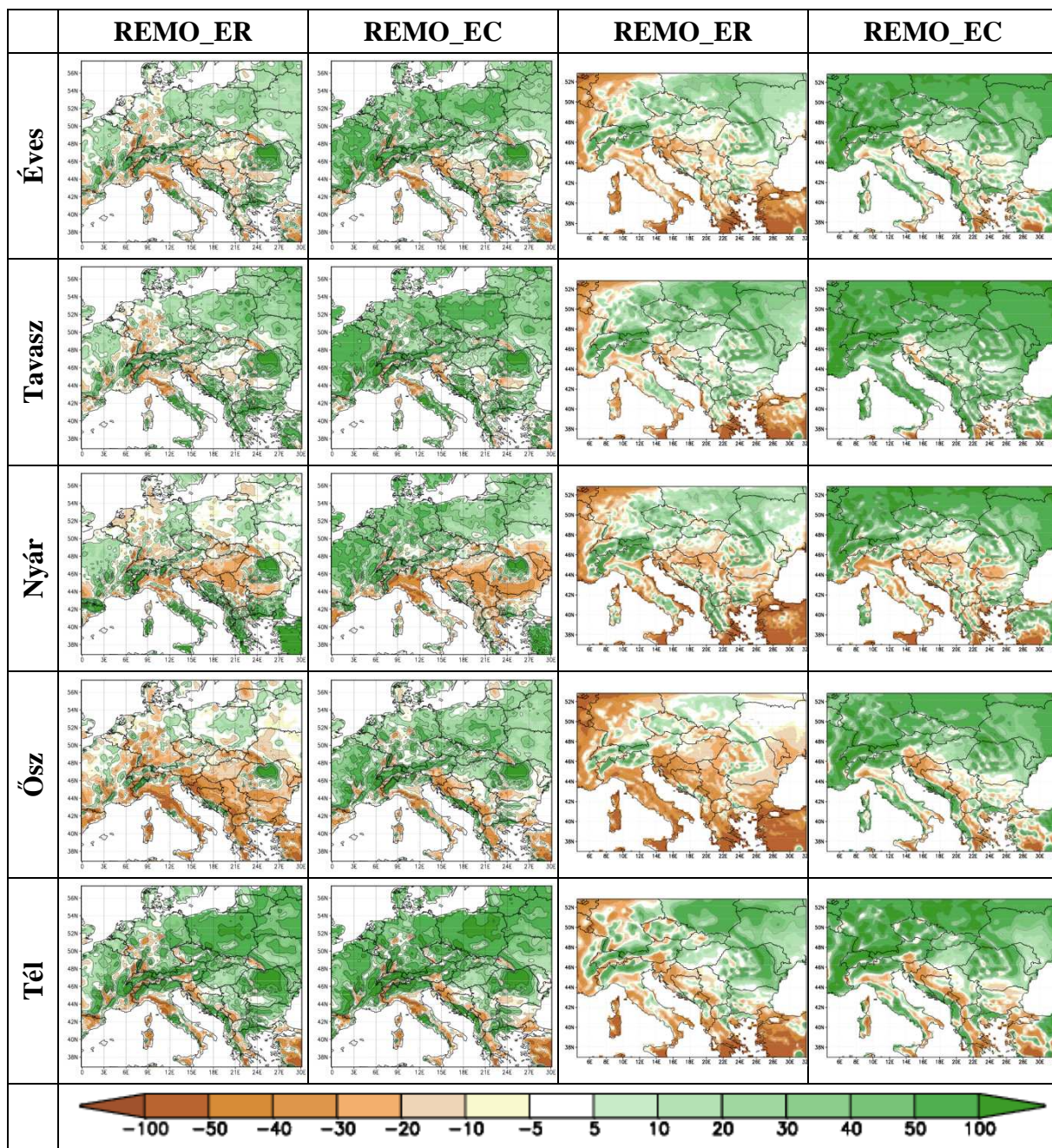
A REMO modell éves átlagaiban (3.1.10. ábra) északon csapadéktöbblet, délen pedig csapadékhiány figyelhető meg, mely a hazai eredményekben szintén felfedezhető, bár ez esetben a globális peremfeltételekkel e negatív hibák nagyon kis területre koncentrálnak. Az ECHAM peremfeltételeivel készült futtatás mindkét modellverzióval az északi területeket nagyobb hibával írja le az ERA-40 meghajtással készült szimulációkhoz képest. A hazai REMO re-analízissel meghajtott eredményeiben a tartomány ÉNy-i illetve DK-i peremlein nagy negatív hibák láthatók. A hegységek menti erős fölébecslés mindegyik szimulációban jól látszik.

A REMO modell évszakos eredményeiben (3.1.10. ábra) az ENSEMBLES során végzett két futtatás hibatérképei hasonlóak, noha a globális szimulációkkal történt meghajtás esetén a pontosság rosszabb. Hazánk felett mindkét modellkísérlet tavasszal és télen eltúlozza a jellemző csapadékmennyiséget, nyáron viszont (ahogy a hazai modellváltozat re-analízissel végzett szimulációja is) alábecsüli azt (3.1.9. ábra). A hőmérsékletnél láttuk, hogy a re-analízis határfeltételekkel a REMO ebben az évszakban a valóságnál melegebbnek jellemzi a Kárpát-medencét (Szépszó, 2008). Már korábbi vizsgálatok során fény derült arra, hogy a regionális, illetve globális modellek egy része a nyári évszakot a Duna vízgyűjtő területére melegebbnek és szárazabbnak találja a méréseknél. A modellek e hőmérsékletre és csapadéokra jellemző hibáját a szakirodalomban együttesen nyári szárazság problémának nevezik (Hagemann et al., 2002). Felismerése óta számos vizsgálatot folytattak le az okára vonatkozóan, melyek azonban nem egy

meghatározott végkövetkeztetéssel zárultak, csak a modellfejlesztés lehetséges irányait jelölték ki.

Az említett nyári szárazság probléma az ENSEMBLES projektbeli eredményeknél mindkét meghajtás esetében fennáll, sőt, az ERA-40 alkalmazásával végzett kísérletekben ősszel is megmarad. Ekkor a globális modell meghajtással végrehajtott szimuláció viszont már fölébecsli a csapadékot Magyarország felett. A két kísérlet különböző őszi eredményeit a határfeltételek eltérő minőségével tudjuk magyarázni. A regionális modell ugyanis általában több csapadékot eredményez, mint a globális ECHAM modell (ábrán nem mutatom be). Ez a többlet az ERA-40 jelentősen száraz mezőivel való kölcsönhatásban alábecslést, míg a nedvesebb ECHAM mezőkkel fölébecslést eredményez a tartomány ezen részén (Szépszó, 2011).

A hazai kísérletekben a re-analízissel végzett meghajtás esetében tavasszal és télen a tartomány középső, illetve északi, északkeleti részén fölébecslés látható. Nyáron és ősszel a szárazabb területek aránya növekszik, a nyári szárazság probléma fokozottabban jelentkezik, különösen az őszi évszakban, amikor már csak az Alpok, Kárpátok, illetve néhány hazánktól északra található területen történik fölébecslés. A magyarországi kísérletekben azonban a REMO globális modellel történő meghajtása jóval nedvesebb eredményekkel szolgál, mint a re-analízissel végzett kísérletek. Magyarország felett a nyár kivételével – ekkor a modell nagyon pontosan becsüli a csapadékösszeget - minden évszakra csapadéktöbbletet eredményez (3.1.9. ábra). Nyáron mivel az ECHAM jelentős alábecsléssel terhelt (Szépszó és Horányi, 2008), ezért ez a nedvesítés gyakorlatilag „eliminálja” a szárazság-problémát, ami ebben a kísérletben már valóban csak egy kis területre korlátozódik.



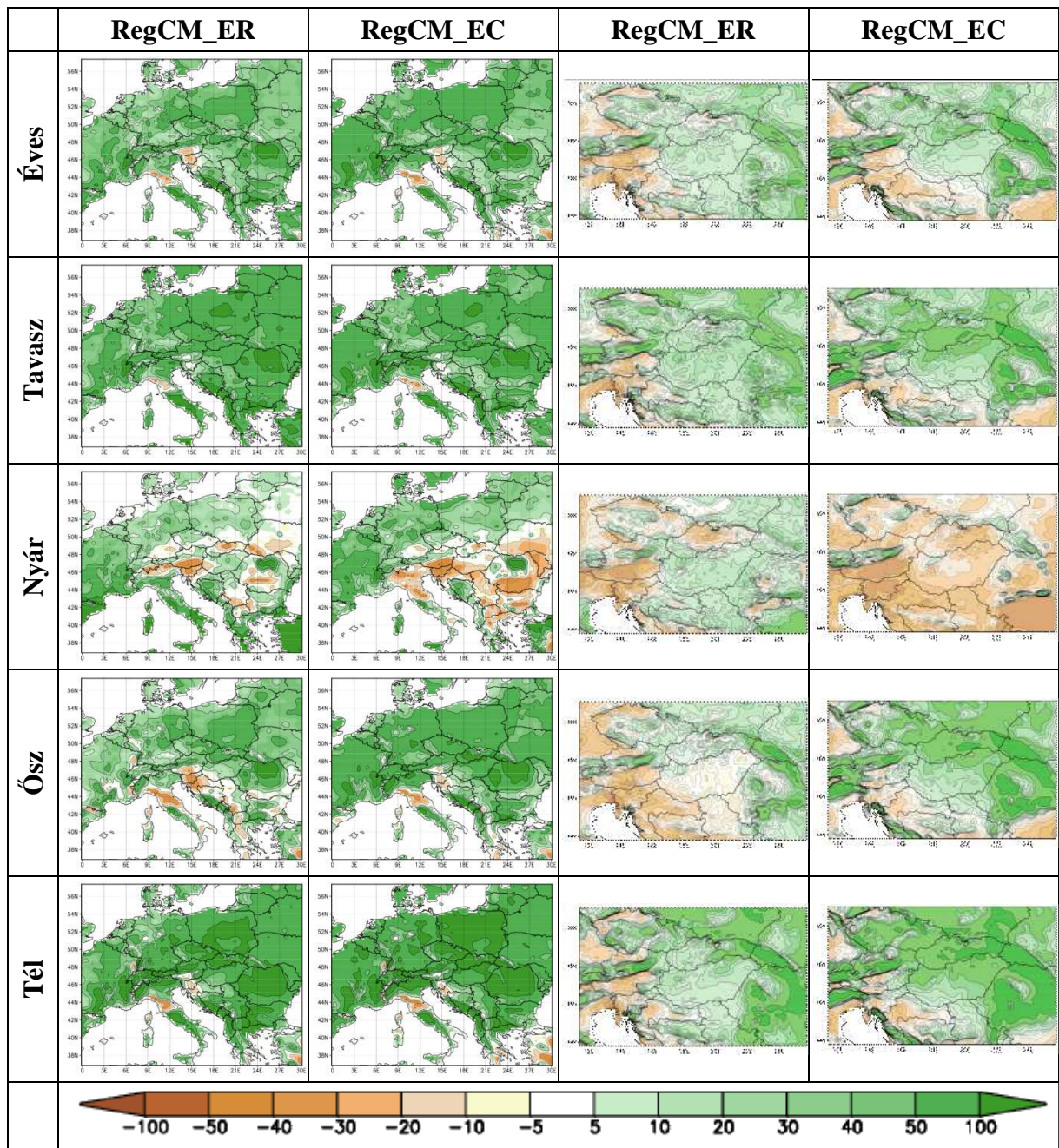
3.1.10. ábra. A szimulált éves és évszakos csapadékösszegek relatív eltérése a mérésektől [%] az 1961–1990 időszakban az ENSEMBLES-beli (első két oszlop), valamint a hazai (utolsó két oszlop) ERA40- és ECHAM-meghajtású REMO modell kísérleteire.

RegCM

A RegCM modell éves átlagainak hibaterképét tekintve (3.1.11. ábra) láthatjuk, hogy szinte egész Európában felülbecsli a csapadék mennyiségét, legfőképpen a hegyvidéki területeken. A hazai modelleredményekben is főként felülbecslés látható, bár a tartomány Ny-i részén (illetve az ECHAM meghajtással délen is) szárazabb területek jelennek meg. Az ENSEMBLES eredményeiben a két futtatás között alig vehető észre különbség. A hazai modelleredményekben a globális peremfeltételekkel történt szimuláció a Kárpátokat nagyobb hibával írja le, valamint a negatív hibával jellemzett területek aránya is kiterjedtebb.

A RegCM modell évszakos átlagainál (3.1.11. ábra) a különböző meghajtásokkal végzett szimulációk, csakúgy, mint a REMO esetében nagyon hasonlóak. A vizsgált modellek közül a legnedvesebbnek mondható, mivel szinte minden évszakban a valóságnál több csapadékot ad a teljes tartományra. Az ENSEMBLES eredmények esetén a fölébecslés mértéke a nyári évszakban csökken, sőt egyes területeken – az ECHAM meghajtással pedig szinte az egész déli térségben – alábecslésbe vált át. Magyarország területét nyáron a re-analízis meghajtással végzett kísérlet pozitív, míg a globális modell peremfeltételekkel készített szimuláció negatív hibával jellemzi. Ez utóbbi kísérlet a csapadék évi menetét, azaz a hazánkat jellemző nyári maximumot és téli minimumot nem képes visszaadni (3.1.9 ábra). A modell a leggyengébben a tavaszi és téli évszakokban teljesít (tavasszal +56%, télen +88% a hiba).

A magyarországi RegCM kísérletek tavasszal és télen mindkét peremfeltétellel (az ECHAM meghajtással nagyobb mértékben) leginkább fölébecslik a tartományra jellemző csapadékmennyiséget, csupán a tartomány nyugati és déli szélein fordulnak elő negatív hibák. Nyáron – ahogy az ENSEMBLES modellkísérletében is – hazánk felett a re-analízis meghajtás esetében fölébecslés, az ECHAM peremfeltétellel viszont alábecslés jellemző (3.1.9. ábra). A modell az őszi évszakban az ERA-40 adatbázis alkalmazásával Magyarország évszakos csapadékátlagát pontosan adja vissza, míg az ECHAM meghajtás pozitív hibákat eredményez. A hazai modellkísérletre is érvényes, hogy az ECHAM határfeltételek alkalmazásával, a RegCM által leírt évi menet nem realiztikus, ami minden bizonnyal a határfeltételek és a regionális modell kölcsönhatásának eredménye. (A jelenség azért nem írható egyedül az ECHAM-mezők „számlájára”, mert a REMO esetében a csapadék Magyarországra jellemző éves menete felismerhető.)



3.1.11. ábra. A szimulált éves és évszakos csapadékösszegek relatív eltérése a mérésektől [%] az 1961–1990 időszakban az ENSEMBLES-beli (első két oszlop), valamint a hazai (utolsó két oszlop) ERA40- és ECHAM-meghajtású RegCM modell kísérleteire.

Az évszakos csapadékátlagok évek közötti változékonyságát tekintve (3.1.2. táblázat) azt tapasztaljuk, hogy a vizsgált referencia-időszakban a mérések alapján ez nyáron volt a legnagyobb (15 mm/hónap). A modellkísérletek ezt többnyire jól jellemzik, de a RegCM ECHAM meghajtású, valamint az ENSEMBLES egyes ALADIN kísérleteiben ősszel, illetve télen kapjuk a legnagyobb szórásértékeket. Ami a mértéket illeti, a modelleredmények legtöbbször túlbecslik a változékonyság nagyságát, gyakoriak a 20 mm/hónapot meghaladó értékek.

	Modellek	tavaszi	nyári	ősz	téli
ENS	ALADIN4.5_ERA_25	14	17	7	11
	ALADIN_4.5_ARPEGE_25	15	13	12	17
	ALADIN_5.1_ARPEGE_25	14	18	19	19
OMSZ	ALADIN_4.5_ERA_25	17	25	16	16
	ALADIN_4.5_ERA_10	18	27	13	14
	ALADIN_4.5_ARPEGE_10	16	22	14	15
ENS	REMO5.7_ERA_25	9	17	11	15
	REMO_5.7_ECHAM_25	11	13	12	11
OMSZ	REMO_5.0_ERA_25	14	22	15	16
	REMO_5.0_ECHAM_25	17	20	16	11
ENS	RegCM_ERA_25	17	23	16	14
	RegCM_ECHAM_25	15	13	17	14
ELTE	RegCM_ERA_10	16	23	16	15
	RegCM_ECHAM_10	18	18	19	17
ECA		12	15	14	13

3.1.2. táblázat. A mérések alapján számított (ECA) és a modellekkel szimulált évszakos csapadék időbeli szórása [mm/hónap] Magyarország felett az ENSEMBLES projektbeli (ENS) és a hazai (OMSZ és ELTE) regionális modelleredmények alapján.

Időszak: 1961–1990.

A validáció során kapott eredmények összefoglalása

- ALADIN
 - A hazai eredmények általános hűvösségével szemben az ENSEMBLES kísérleteiben az északi területeken hőmérsékleti fölébecslések jelennek meg, s ez nyáron és télen a Kárpát-medence felett is inkább fölébecslést eredményez. Ezen különbségek hátterében az ENSEMBLES-beli és a hazai kísérletekben alkalmazott eltérő integrálási tartomány állhat.
 - A csapadékot illetően ősszel és télen különböző előjelű hibák adódnak az ERA-40 meghajtású 25 km-es felbontású két modellkísérletben, aminek magyarázata szintén a tartományok különbözősége lehet.

- Az ENSEMBLES projektben használt két modellváltozat esetében a 4.5-ös verzió az év első felében jobb eredményekkel szolgál (mind a hőmérséklet, mind a csapadék tekintetében). Az eltérések okát elsősorban a talajhőmérsékletek kezelésében kereshetjük.
 - A magyarországi 10 km-es felbontású kísérleteknél a tartomány túl kicsinek bizonyult, mivel a peremeken zajszerű hibák láthatók (a korábbi vizsgálatokból ez már ismeretes volt).
- REMO
 - A különböző modellverzióval készített futtatások nagy hasonlóságot mutatnak: az ERA-40-es kísérlet során az egész tartományon, míg az ECHAM meghajtással a déli területeken a modellek felülbecslik az átlaghőmérsékletet, a csapadékot tekintve pedig az északi területeket pozitív, míg a déli területeket negatív hibák jellemzik.
 - A nyári és őszi évszak átlaghőmérsékletét a modellek Magyarország felett fölé-, míg a nyári csapadékmennyiséget (illetve az ERA-40-es kísérlettel az őszt is) alábecslik.
 - Az ERA-40 meghajtású kísérlet összességében nagyobb hőmérsékleti és kisebb csapadék hibákat eredményezett, mint a globális modell peremfeltételekkel végzett futtatás.
 - Tekintve, hogy az ENSEMBLES projektben és a hazánkban elvégzett REMO kísérletek határfeltételei és felbontása megegyeztek, a tapasztalt kisebb különbségek két okra vezethetők vissza: az eltérő modellváltozatra és integrálási tartományra.
 - RegCM
 - Az ENSEMBLES-beli modell az egész tartományon túl hidegnek bizonyult, míg a hazai verzió a tartomány nagy részén pontosan adja vissza a jellemző átlaghőmérsékletet. A hazai eredmények megbízhatóbb voltát több tényező okozhatja: a kisebb modelltartomány, finomabb felbontás, a dupla leskálázás, de sokkal valószínűbb, hogy a modell parametrizációs eljárásainak hangolása vezetett jobb eredményekhez.
 - A csapadék tekintetében mindkét kísérletben felülbecslések láthatók, valamint az ECHAM peremfeltételekkel meghajtott hazai és ENSEMBLES-beli modell is a

hazánkra jellemző évi csapadékmenetet nem képes visszaadni. Utóbbi háttérben az ECHAM által a Kárpát-medence felett gyengén leírt éves ciklus állhat.

- A globális határfeltételekkel futatott modell nagyobb hibákat eredményezett, mint az ERA-40-es meghajtással végzett kísérlet.

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 vizsgálatokat az évszázad első felére, azaz 2050-ig végeztem el. A 2021–2050 közötti időszakra előállt modelleredményeket nem a megfigyelési adatbázishoz, hanem a modellfuttatások 1961–1990 közötti normálidőszakra (referencia-időszakra) számított átlagértékeihez viszonyítottam. Ennek egyik előnye, hogy ha feltételezzük, a modellekben rejlő hibák az idő folyamán nem változnak, akkor e különbségképzéssel azok kiküszöbölhetőek. A korábbi vizsgálatokból persze tudjuk, hogy a modellhibák sok tényezőtől függenek; példának okáért a hőmérsékleti hibák a különböző hőmérsékleti tartományokban eltérő nagyságúak lehetnek (*Christensen et al.*, 2009; *Szépszó*, 2011). Tehát egy változó éghajlat szimulálása során a fenti feltételezés megkérdőjelezhető, a módszer mégis általánosan elfogadott a klímamodellezők körében. A másik előny, hogy míg a megfigyelés és a projekció eltérő rácsfelbontású lehet – ami további bizonytalanságokat visz a kiértékelésbe –, addig ez a probléma a modelleredmények múltbeli időszakához történő viszonyítás során nem lép fel.

A várható változások kiértékelése során az egész tartományt lefedő térképeket készítettem. Az integrálási tartományon belül Magyarország területére a modellek által valószínűsített változások időbeli szórását, illetve a csapadék és hőmérséklet éves és évszakos értékeinek időbeli menetét vizsgáltam. Az átlagok időbeli alakulását az ENSEMBLES projekt modellkísérletei, valamint a hazai REMO szimuláció esetében a teljes 1961–2050 időszakra, míg a hazai ALADIN-Climate és RegCM modellváltozatoknál az 1961–1990 és a 2021–2050 időszakokra tekintettem. (Ennek oka az, hogy a vizsgálatok megkezdésekor az utóbbi két modellre az említett harmincéves időszakokra álltak rendelkezésre eredmények). Szeretném rögzíteni, hogy munkám során új számításokat csak az ENSEMBLES projektbeli modellkísérletekre végeztem el, a hazai eredmények esetében a korábbi vizsgálatokra támaszkodtam.

A továbbiakban az ALADIN-Climate különböző modellverzióinak eredményeit külön tárgyalom a REMO és a RegCM modellek eredményeitől. Ezt az indokolja, hogy míg a REMO és a RegCM kísérletek számára az ECHAM5/MPI-OM, addig az ALADIN esetében az ARPEGE-Climate globális modell szolgáltatja a nagyskálájú kényszereket. A határfeltételeknek fontos kormányzó szerepük van a regionális modellszimulációkban, s az azonos peremfeltételekkel készített regionális eredmények több közös vonást mutathatnak.

Hőmérséklet

A változás térképeket tekintve (3.2.1, 3.2.4, 3.2.5. ábra) szembevetve, hogy a modellek egyértelműen a hőmérséklet egyirányú, pozitív változását mutatják, azonban a melegedés mértékét eltérően szimulálták, bizonytalanságot hozva ezzel a becslésbe.

ALADIN Climate

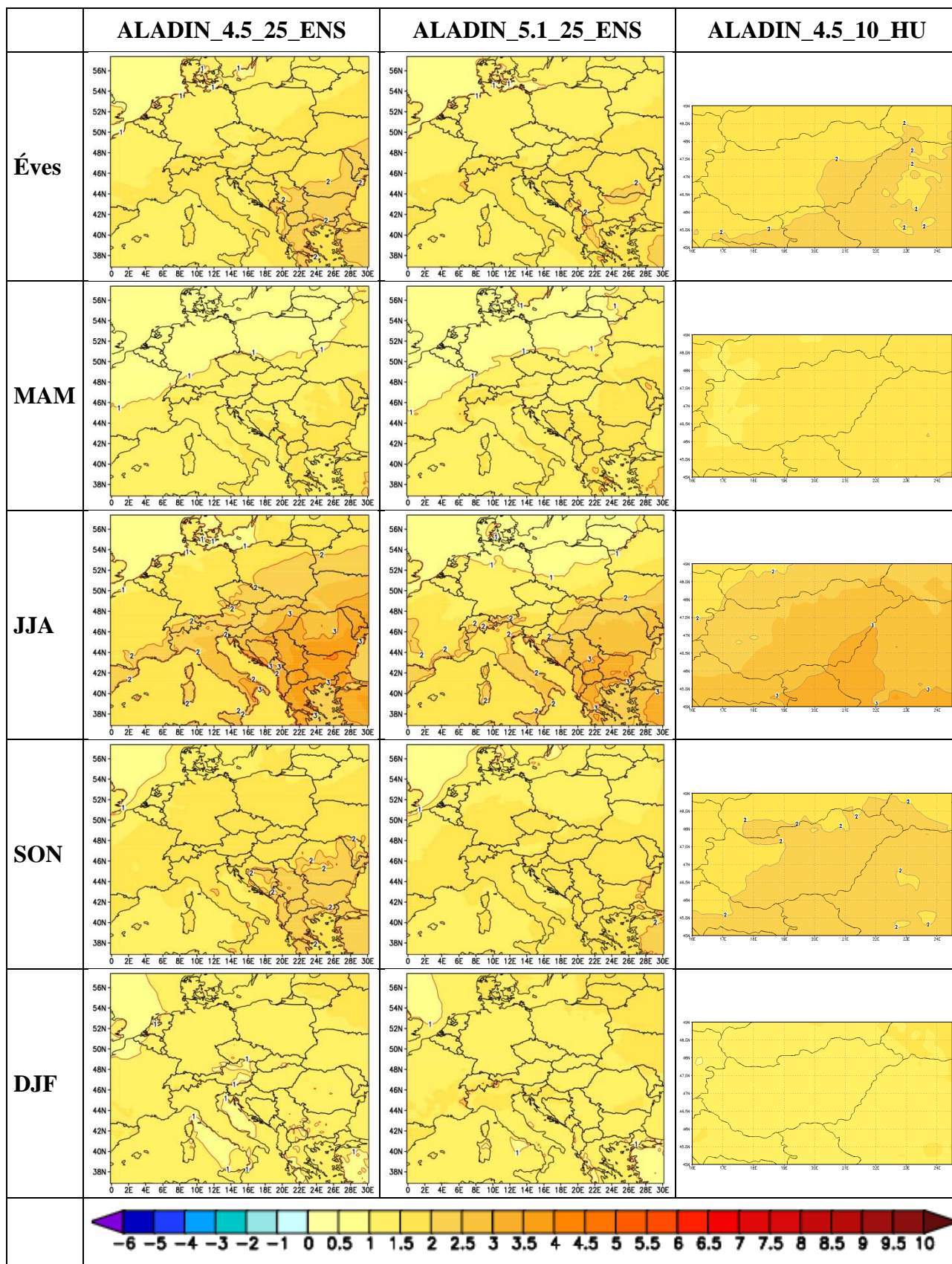
A hőmérséklet éves átlagának változásában a hazai és az ENSEMBLES eredmények egységesek (3.2.1. ábra): az évszázad első felére a melegedés mértéke ÉNy-ről DK felé (azaz az óceántól távolodva és földrajzi szélesség csökkenésével) nő, bár az újabb verzió a Balkán-félszigetre kisebb (2 fok alatti) hőmérsékletemelkedést ad, mint a 4.5 modellverzió.

Az évszakos változás-térképek (3.2.1. ábra) alapján elmondhatjuk, hogy az előbb említett hőmérséklet-változási irány télen egyik modelleredményben sem jelenik meg, ekkor az óceánoktól és az Egyenlítőtől távolodva növekszik a változás gradiense (azaz az északkeleti területek melegednek a leginkább). Mindkét modellváltozat esetén – ahogy a hazai eredményekben is – a legnagyobb változást a nyári évszakra kapjuk, s ez az ENSEMBLES eredményekben a július és az augusztus hónapban különösen magas: Délkelet-Európa felett akár 4-4,5 fokot is meghaladó (nem mutatom be). A nyári melegedés mértéke az 5.1 modellverzióban kisebb, viszont a 4.5 változat az egész vizsgált időszakon alacsonyabb átlaghőmérsékleteket ad, mint az újabb verzió, így a nagyobb melegedésnek köszönhetően 2050-re utoléri az 5.1 verziójú modell által előrejelzett értékeket (3.2.2. ábra). Az ENSEMBLES projektbeli modellek szerint tavasszal várható a legkisebb melegedés, a hazai változat ezzel ellentétben a téli évszakra adja a legcsekélyebb mértékű növekedést. Megjegyezném, hogy a havi átlagok egyes esetekben az évszakos átlagoktól eltérő tendenciát tükröznek. Például az újabb modellverzióban Franciaország

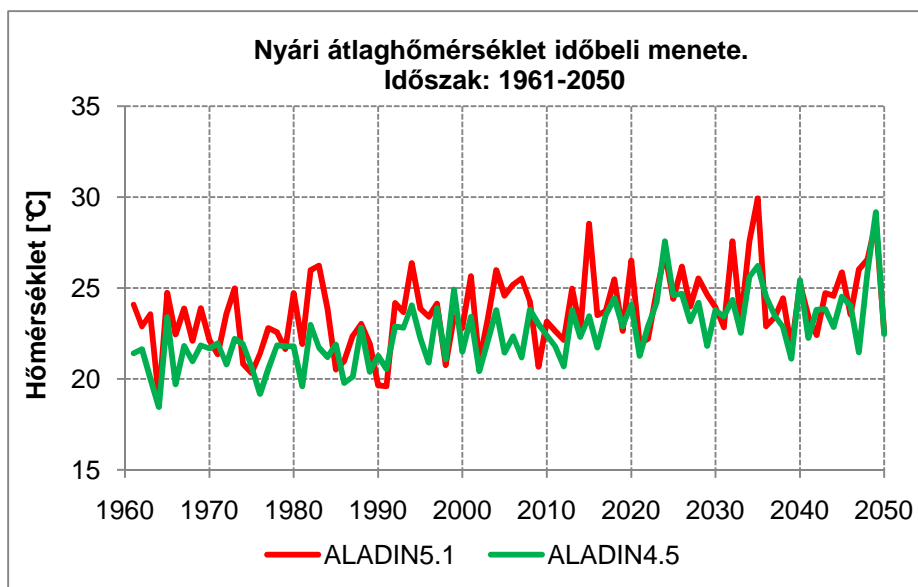
északnyugati része felett a június havi hőmérséklet-változásban (0,5 °C-t nem meghaladó) hőmérsékletcsökkenést tapasztalunk.

Ha csupán a Kárpát-medencére koncentrálnak, akkor a melegedés fent említett térbeli szerkezete (ÉNy-DK irányú gradiense) nyáron, illetve a finomabb felbontású hazai eredményekben ősszel is kitűnik. Magyarország területének hőmérséklet-változására (3.2.1. táblázat) a különböző futtatások télen közel azonos (1,2–1,4 °C-os) értéket adnak, tavasszal és ősszel azonban a hazai ALADIN változat nagyobb melegedést jósol, mint az ENSEMBLES-beli modell. A nyári évszakban az ALADIN5.1 a már említett alacsonyabb értékével tűnik ki.

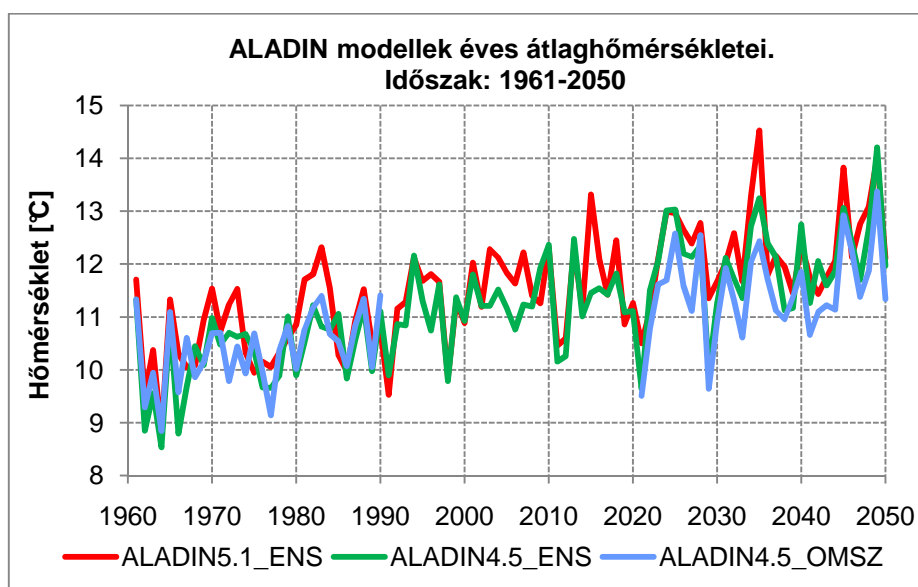
Az éves és évszagos átlagok időbeli menetét tekintve (csak a nyári és az éves ábrákat mutatom be; 3.2.2. és 3.2.3. ábra) nemcsak azt láthatjuk, hogy a hőmérséklet hosszabb időszakon emelkedő tendenciát mutat, hanem azt is, hogy az egyes évek átlagait nagyobb ingadozások jellemzik (egy adott év akár hidegebb is lehet az azt megelőzőhöz képest). Ez – mint már korábban említettem – az éghajlat belső szabad változékonyságával hozható kapcsolatba. Az is látható továbbá, hogy a melegedés ellenére a jövőben is szép számmal lesznek az átlagosnál hűvösebb évek. A vizsgált időszak vége felé haladva a változékonyság gyakran megnő, amit az időbeli szórások számszerűsítve is alátámasztanak (3.1.1. és 3.2.2. táblázat). A modellkísérletek a 2021–2050 időszakra a legnagyobb változékonyságot egyöntetűen a nyári évszakra adják – azonban az ALADIN 4.5 verziója (a hazai és az ENSEMBLES eredményeiben is) a referencia-időszakban még a téli évszakban mutatta a legnagyobb változékonyságot (3.1.1. táblázat). A három kísérlet átlagainak időbeli alakulását együtt vizsgálva látható (3.2.3. ábra), hogy a fluktuációk hasonló menetet követnek, ami nem meglepő, hiszen a határfeltételeket ugyanaz az ARPEGE-Climat szimuláció biztosította. Azt is észrevehetjük, hogy a két 4.5 verziójú modellfuttatás jó egyezést mutat, azonban az ALADIN5.1 szinte az egész időszak folyamán magasabb hőmérsékletet mutat, mint a korábbi modell-verzióval végzett kísérletek.



3.2.1. ábra. A hőmérséklet 2021–2050 időszakra várható éves és évszakos változása az ENSEMBLES-beli (első két oszlop), valamint a hazai (utolsó oszlop) ALADIN-Climate modell alapján. Referencia: 1961-1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.



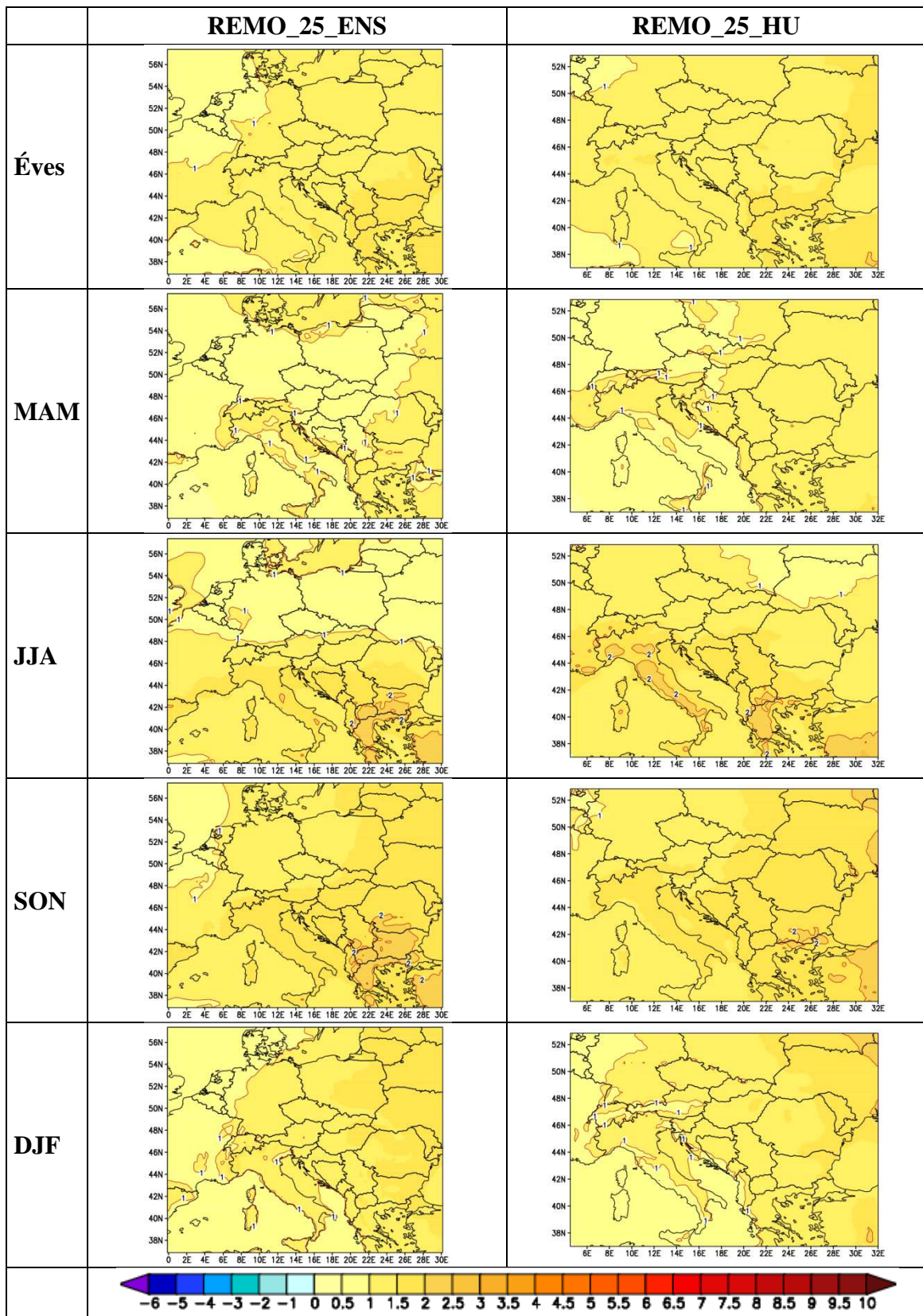
3.2.2. ábra. Az ENSEMBLES-beli ALADIN5.1 és ALADIN4.5 verzióval modellezett nyári átlaghőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$] alakulása az 1961-2050 időszakon Magyarország felett.



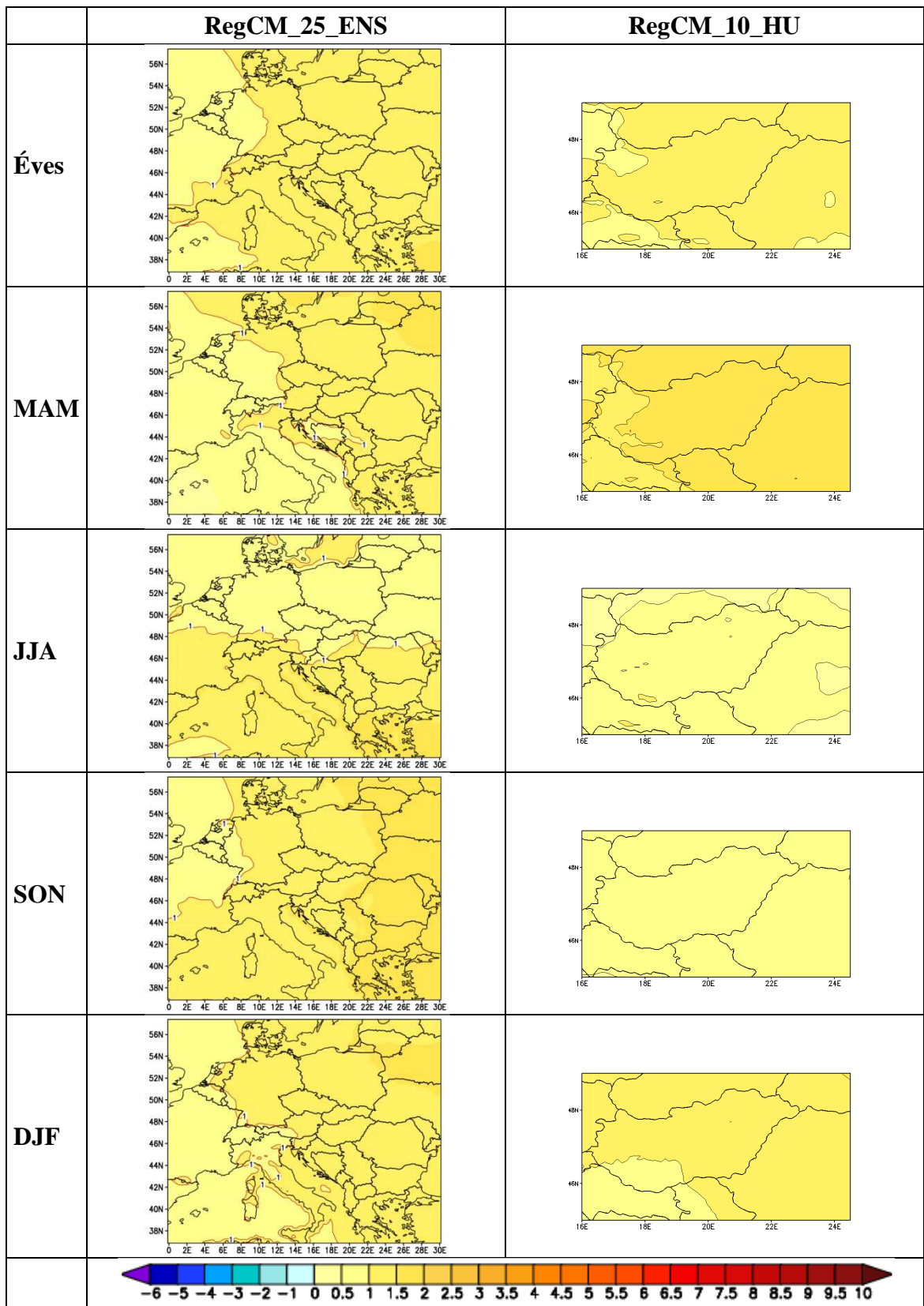
3.2.3. ábra. Az ALADIN modellel végzett három kísérlet éves átlaghőmérsékletei Magyarország felett az 1961-2050 időszakon.

A REMO és RegCM modellek

A hőmérséklet térbeli változását tekintve a REMO és a RegCM éves eredményei (3.2.4. és 3.2.5. ábra) között nagy hasonlóságot fedezhetünk fel. Az ALADIN esetében látott ÉNy-DK irányú gradiens itt is megfigyelhető, csak kevésbé markánsan jelentkezik a melegedés kisebb mértéke miatt. A két ENSEMBLES-beli modellkísérlet éves változásmezője között csupán annyi az eltérés, hogy a REMO a tartomány DK-i részére nagyobb növekedést mutat.



3.2.4. ábra. A hőmérséklet 2021–2050 időszakra várható éves és évszakos változása az ENSEMBLES-beli (első oszlop), valamint a hazai (utolsó oszlop) REMO modell alapján. Referencia: 1961–1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.



3.2.5. ábra. A hőmérséklet 2021–2050 időszakra várható éves és évszakos változása az ENSEMBLES-beli (első oszlop), valamint a hazai (utolsó oszlop) RegCM modell alapján. Referencia: 1961-1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.

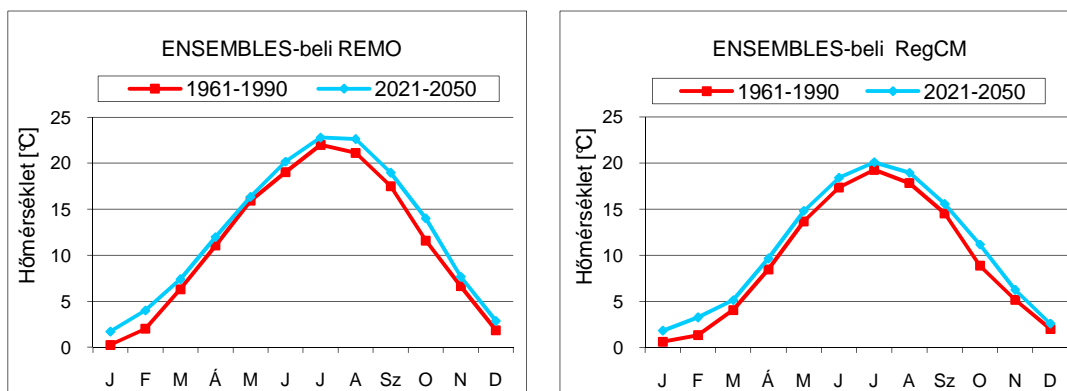
A REMO modell évszakos átlagaiban a nyár kivételével az óceántól a kontinens felé haladva egyre nagyobb változásokat láthatunk (3.2.4. *ábra*), nyáron viszont a változás mértéke az Egyenlítőtől távolodva csökken. Ez utóbbi évszakban a melegedés mértéke jóval alulmarad az ALADIN eredményeihez képest: a 2 fokot csak Európa délkeleti szegletében haladja meg. Tavasszal Európa nagy részére, míg nyáron az északi területekre a hazai modell nagyobb (1-1,5 fokos) melegedést mutat, mint az ENSEMBLES változata (mely szerint csupán 0,5-1 fokos hőmérsékletnövekedés várható). Összhangban a hazai eredményekkel a legnagyobb, 1-2,5 fokot elérő melegedést az őszi évszakra kapjuk, míg tavasszal (az összes modellel összevetve is) a legkisebb változást adja, s az egyes hónapokat külön vizsgálva észrevehetjük, hogy márciusban és decemberben a tartomány nyugati peremén akár hőmérsékletcsökkenésre is számíthatunk (hasonló az ICTP RegCM eredményeiben is tapasztalható). Az ENSEMBLES modelleredményekben télen hazánk keleti részén nagyobb melegedés várható, ami az OMSZ kísérleteiben nem jelentkezik. Magyarország éves átlagait (3.2.1. *táblázat*) tekintve láthatjuk, hogy az év első felében (azaz tavasszal és nyáron) a REMO5.7 modellváltozat eredményei alacsonyabb hőmérséklet-emelkedést, ősszel azonos, míg a téli hónapban nagyobb változást mutatnak, mint a hazai szimulációk. A REMO5.7 alacsonyabb tavaszi és nyári változásértéke és a referencia-időszakban mutatott nagyobb pozitív hibája együttesen hasonló tavaszi és nyári átlaghőmérsékletet eredményez a 2021–2050 időszakra a két modellverzióban, míg ősszel és télen az ENSEMBLES modellkísérlet a jövőre magasabb átlagértékeket jelez (ábrán nem mutatom be).

Az ENSEMBLES-ben alkalmazott RegCM modell alapján a 2021-2050 közötti időszakban várható hőmérséklet-változás térbeli elrendeződése ősszel és télen közel azonos az éves átlagban látottakkal (3.2.5. *ábra*) Tavasszal azonban a melegedés DNy-ÉK, nyáron pedig a REMO-hoz hasonlóan É-D irányú növekedést mutat. A legnagyobb melegedés – ahogy a REMO esetében is – az őszi évszakban várható. A korábban már említett, a tartomány nyugati peremén márciusban megjelenő hőmérsékletcsökkenés területe jóval kiterjedtebb, mint a REMO-nál, illetve decemberben az Alpok területén látható.

Magyarországot tekintve nyáron a déli-délkeleti, míg ősszel a keleti országrészben nagyobb hőmérséklet-változást jelez az ENSEMBLES-beli modell. Hasonló térbeli különbségek a hazai kísérletben a másik két évszakban láthatók: tavasszal nyugaton, míg télen délnyugaton kisebb mértékű melegedés várható, mint az ország többi részén. Bár a RegCM hazai változatát 10 km-es horizontális rácsfelbontás mellett futtatták, az évszakos

hőmérsékleti változásokat 0,5 °C-os felbontással ábrázoló térképeken nem látható finom térbeli szerkezet. Ezen modell eredményei alapján a Magyarország területére várható melegedés elég homogén eloszlású a 2021-2050 közötti időszakra.

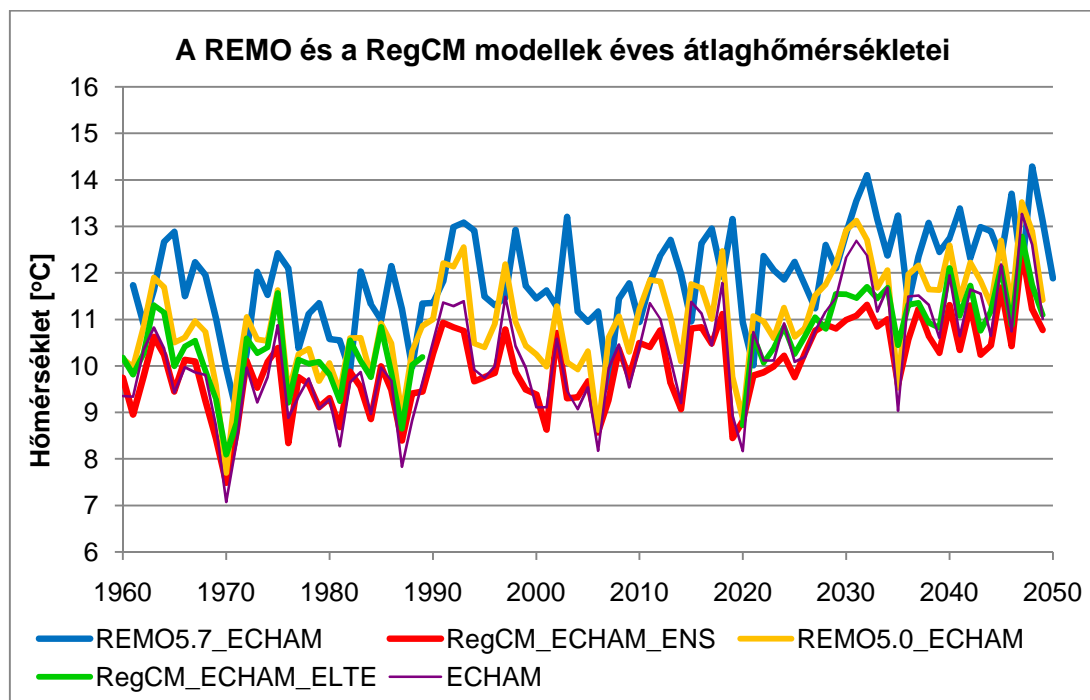
A Magyarországra eső rácsponti adatokból előállított átlagokat (3.2.1. táblázat) vizsgálva, az ENSEMBLES projektbeli modell esetében az évszakok között nagy eltérés nem tapasztalható (egyedül ősszel várható nagyobb, 1,5 fokos melegedés), ellentétben a hazai eredményekkel. Az ELTE-n alkalmazott modellváltozat eredményeiben a melegedés mértéke az egyes évszakokban igen különbözik az ENSEMBLES projektbeli modell eredményeitől, azoknál általában alacsonyabb értékeket mutatva – egyedül tavasszal ad nagyobb (1,6 fokos) melegedést a hazai modell. A havi átlagokat tekintve a REMO és a RegCM eredményeiben is a február és az október hónap nagy értékeivel tűnik ki. A hőmérséklet éves menetét a referencia- és a 2021-2050 közötti időszakra (3.2.6. ábra) vizsgálva magyarázatot kaphatunk a fenti különös viselkedésre. A múltban a februári átlaghőmérséklet közelebb volt a (téli) januárhoz, mint a (tavaszi) márciusához; októberben viszont a szeptemberi átlaghőmérsékletéhez képest jóval hidegebb volt. A jövőben a REMO és RegCM szerint kevésbé éles váltások várhatók az évszakok között, azaz a február átlaghőmérséklete közelít a márciusihoz, míg az októberi a szeptemberihez.



3.2.6. ábra. Az ENSEMBLES-beli REMO (balra) és RegCM (jobbra) modellek havi átlaghőmérsékletei Magyarország felett az 1961–1990, illetve a 2021–2050 időszakon.

Az éves átlaghőmérséklet időbeli menetét tekintve láthatjuk (3.2.7. ábra), hogy az ENSEMBLES projekt modelljei közül a REMO a vizsgált időszak során végig magasabb hőmérsékleti értékeket szimulál, mint a RegCM, tulajdonképpen egy szisztematikus melegítéssel hozzájárulva az ECHAM által leírt évi átlaghőmérsékletekhez. A hazai eredményekben viszont a REMO és a RegCM az 1961–1990-es időszakban még együtt futnak (de az ECHAM globális klímamodell éves hőmérsékleti átlagainál mindkét modell magasabb hőmérsékleti értékeket jelez), az évszázad közepére azonban a REMO már

nagyobb melegedést jósol, mint a RegCM, ami szinte minden évben a globális modell által leírt menetet követi. Az ENSEMBLES kísérleteiben télen (az évszakos ábrákat nem mutatom be) a két modellel kapott eredmény mindvégig szinte tökéletes egyezést mutat és mindkettő melegebb a meghajtó mezőül szolgáló ECHAM eredményeinél, a hazai kísérletben azonban ez már csak a 10 km-es felbontású RegCM-re igaz: minden évben magasabb hőmérsékletet eredményez, mint a REMO, melynek átlagértékei már az időszak kezdetén visszaesnek a globális modell hőmérsékleteinek szintjére és ez a vizsgált időszak (2021-2050) végig így is marad. Nyáron és ősszel a REMO mindvégig magasabb hőmérsékletet ad a RegCM-nél, azonban a hazai eredményekben az időszak végére a két modell által szimulált hőmérsékleti értékek eltávolodnak egymástól (akár 1,5-2 °C is lehet a különbség közöttük az évszázad közepére) – ez az eltávolodás kevésbé markánsan, de ugyancsak megfigyelhető az ENSEMBLES modellkísérleteiben.



3.2.7. ábra. Az ECHAM, valamint az ENSEMBLES-beli (ENS) és a hazai (OMSZ és ELTE) REMO és RegCM modellek éves átlaghőmérsékletei [°C] Magyarország felett.
Időszak: 1961–2050.

Az ELTE-n alkalmazott RegCM változékonysága jóval nagyobb (2 fokot meghaladó) az ICTP-ben használt változathoz képest (ahol csak 0,9-1,3 fok közötti a szórás mértéke) – a REMO szimulációk esetében viszont nagy különbség nem tapasztalható (3.2.2. táblázat). Mindkét modellel a legnagyobb változékonyság a téli

évszakban várható, így a REMO esetében a múltbeli megfigyelésekhez képest ez nem változik az eredmények alapján (3.1.1. táblázat).

	Modellek	éves	tavasz	nyár	ősz	tél
ENS	ALADIN_4.5_25km	1,7	1,2	2,8	1,8	1,2
	ALADIN_5.1_25km	1,6	1,2	2,1	1,7	1,4
OMSZ	ALADIN_4.5_10km	1,9	1,6	2,6	2,0	1,3
ENS	REMO_25km	1,3	0,8	1,2	1,6	1,5
OMSZ	REMO_25km	1,4	1,1	1,4	1,6	1,3
ENS	RegCM_25km	1,2	1,1	1,0	1,5	1,2
ELTE	RegCM_10km	1,1	1,6	0,7	0,8	1,1

3.2.1. táblázat. A hőmérséklet átlagos változása [$^{\circ}\text{C}$] Magyarország felett az ENSEMBLES projektbeli (ENS) és a hazai (OMSZ és ELTE) regionális modelleredmények alapján. Időszak: 2021–2050, referencia: 1961–1990.

	Modellek	tavasz	nyár	ősz	tél
ENS	ALADIN_4.5_25km	1,2	1,8	1,2	1,2
	ALADIN_5.1_25km	1,2	2,0	1,2	1,2
OMSZ	ALADIN_4.5_10km	1,0	1,5	1,3	1,1
ENS	REMO_25km	1,1	1,5	1,3	1,5
OMSZ	REMO_25m	1,2	1,3	1,5	1,6
ENS	RegCM_25km	1,3	0,9	1,1	1,3
ELTE	RegCM_10km	2,7	2,4	2,4	2,8

3.2.2. táblázat. A hőmérséklet-változás időbeli szórása [$^{\circ}\text{C}$] Magyarország felett az ENSEMBLES projektbeli (ENS) és a hazai (OMSZ és ELTE) regionális modelleredmények alapján. Időszak: 2021-2050.

Csapadék

A továbbiakban tapasztalni fogjuk, hogy a csapadék – nagy térbeli és időbeli változékonysága, ezáltal a hőmérséklethez viszonyított nehezebb modellezhetősége miatt – megváltozásának még az iránya sem annyira egyértelmű, mint ahogy azt a hőmérsékletnél láthattuk.

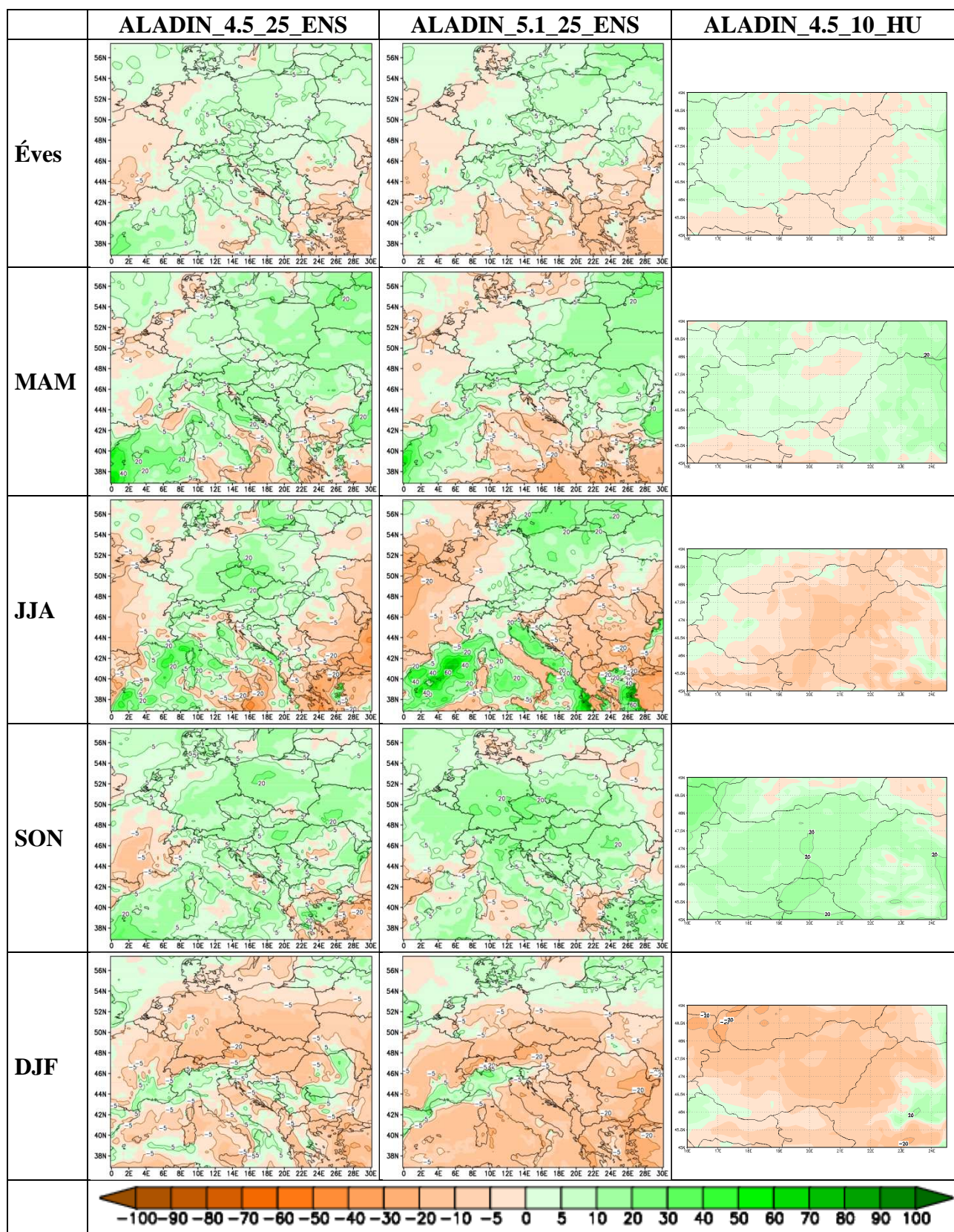
ALADIN-Climate

A csapadék éves átlagait (3.2.8. *ábra*) vizsgálva az ENSEMBLES projektbeli modell szerint Európa nagy részén 2021–2050-re a csapadék növekedése várható, mely térbeli eloszlását tekintve egy ÉK–DNy irányú vonal mentén helyezkedik el. Az újabb modellverzió valamivel szárazabb, főként a tartomány DK-i részén látható kiterjedtebb csapadékcsökkenés. A Kárpát-medence térségét szemlélve az 5.1 verzióval kapott eredmény nagy hasonlóságot mutat a hazai kísérlettel, mely szerint a tartomány keleti-délkeleti részén szárazodás várható, Magyarország nyugati területei viszont nedvesebbé válhatnak.

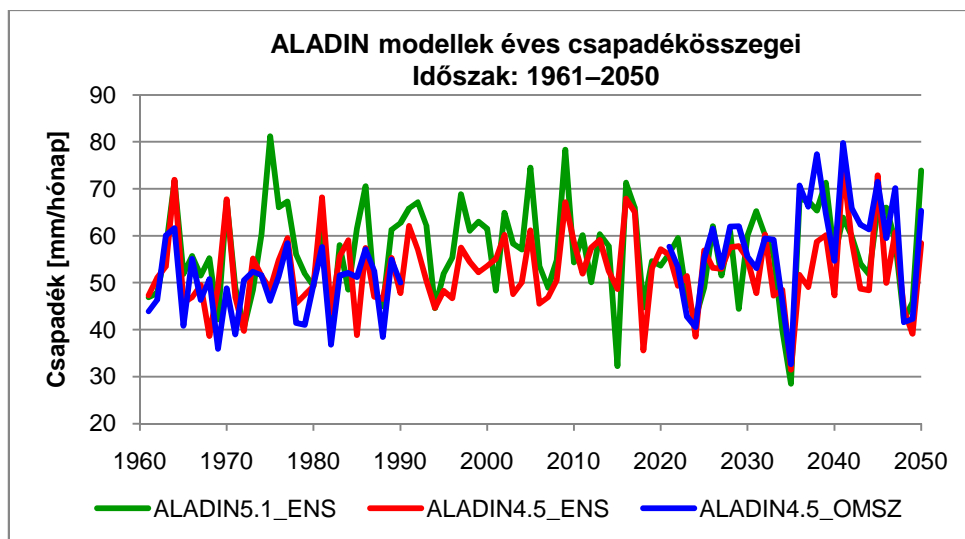
Az évszakos változásokra áttérve az ALADIN újabb (5.1) verziója továbbra is kevesebb csapadékot szimulál, mint a korábbi modell-változat. Az átmeneti évszakokban főként csapadéknövekedés látható, mely – összhangban a hazai eredményekkel – Magyarország területét is érinti. Nyáron az ÉK-DNy-i tengely menti növekedés jóval kisebb területen érvényesül az ALADIN-Climate 5.1 eredményeiben. A Kárpát-medence jövőbeli csapadék viszonyait ez utóbbi évszakban a két ENSEMBLES-beli modellkísérlet eltérő előjellel szimulálja, az 5.1 modell – ahogy a hazai kísérlet is – szinte az egész térségben csapadékcsökkenést jelez. A téli évszakban már csak a hegyvidékek, illetve az északi területek mentén látható a csapadékösszeg megnövekedése, Magyarország területén szárazodásra lehet számítani, mely a hazai eredményekben szintén megmutatkozik.

A Magyarország feletti évszakos csapadékösszegek átlagos változásaiban (3.2.3. *táblázat*) jól látható, hogy a hazai eredmények az őszi kivételével mindig mérsékeltebb változást jeleznek az ENSEMBLES projekt modelljeihez képest.

A két ALADIN verzióval modellezett éves magyarországi csapadékösszeg időbeli alakulását együtt vizsgálva láthatjuk (3.2.9. *ábra*), hogy az egyes értékek kevésbé futnak szinkronban, mint azt a hőmérséklet esetében tapasztaltuk. Annak ellenére, hogy a 2021–2050 időszakra az újabb modellváltozat és a hazai 4.5 verzió kismértékű csökkenést jelez a referencia-időszak átlagához képest, az időszak végére magasabb éves értékeket jeleznek, mint az ENSEMBLES-beli ALADIN4.5. Az évszázad végére nyáron és ősszel a változékonyság megnő, melyet az ENSEMBLES ALADIN4.5 verziója szintén alátámaszt (3.2.2. és 3.1.2. *táblázat*).



3.2.8. ábra. A csapadékösszeg 2021–2050 időszakra várható éves és évszakos változása az ENSEMBLES-beli (első két oszlop), valamint a hazai (utolsó oszlop) ALADIN-Climate modell alapján. Referencia: 1961-1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.



3.2.9. ábra. Az ALADIN modellel végzett három kísérlet éves csapadékösszegei Magyarország felett. Időszak: 1961-2050.

A REMO és a RegCM modell

A csapadékváltozás éves átlagaiban (3.2.10. és 3.2.11. ábra) láthatjuk, hogy a jövőben a földrajzi szélesség növekedésével a csapadékhiányos területek fokozatosan csapadékban gazdagabb területekbe váltanak át, a REMO azonban jóval kisebb területen ad csapadéknövekedést. A hazai REMO modell szintén ezt a térbeli eloszlást mutatja, azonban a növekedés itt már alacsonyabb szélességeken is valószínűsíthető.

Hazánk felett a két ENSEMBLES kísérlettel eltérő eredményt kaptunk, a REMO szerint 2021–2050-re Magyarország felett csapadékcsökkenés, míg a RegCM szerint csekély mértékű csapadéknövekedés várható. A hazai eredményekben a változás előjelében egyezés látható: mindkét modell kiterjedt területen jelzi az éves csapadékösszeg csökkenését (a RegCM esetében az ország területének túlnyomó részén). A RegCM finomabb felbontása érezteti hatását, azaz a csapadékváltozás mértéke a területen belül igen változó, azonban legtöbbször nagyobb abszolút értékű, mint a REMO eredményeiben.

Évszakos skálán tavasszal és nyáron mindkét modell esetében – ahogy a hazai eredmények is mutatják – főként csapadékcsökkenés várható, ez alól kivételt képez az ICTP-nél futtatott RegCM modell nyári évszaka, ahol a csapadéknövekedés a tartomány nagyobb részét jellemzi. A modell Magyarországra és környezetére hangolt hazai változata csupán a hazánkat lefedő tartomány keleti felére ad több csapadékot. Ősszel és télen az éves átlagban már látott területi elrendeződés figyelhető meg, azaz a déli-délnyugati részeken inkább szárazodás, míg az északi-északkeleti területeken a csapadékösszeg megnövekedése figyelhető meg. A hazai REMO projekció őszi évszakában a tartomány

DK-i részén kiterjedtebb csapadéknövekedés látható, a téli évszak viszont nagyon hasonlít az ENSEMBLES projektben alkalmazott modellverzió eredményeihez.

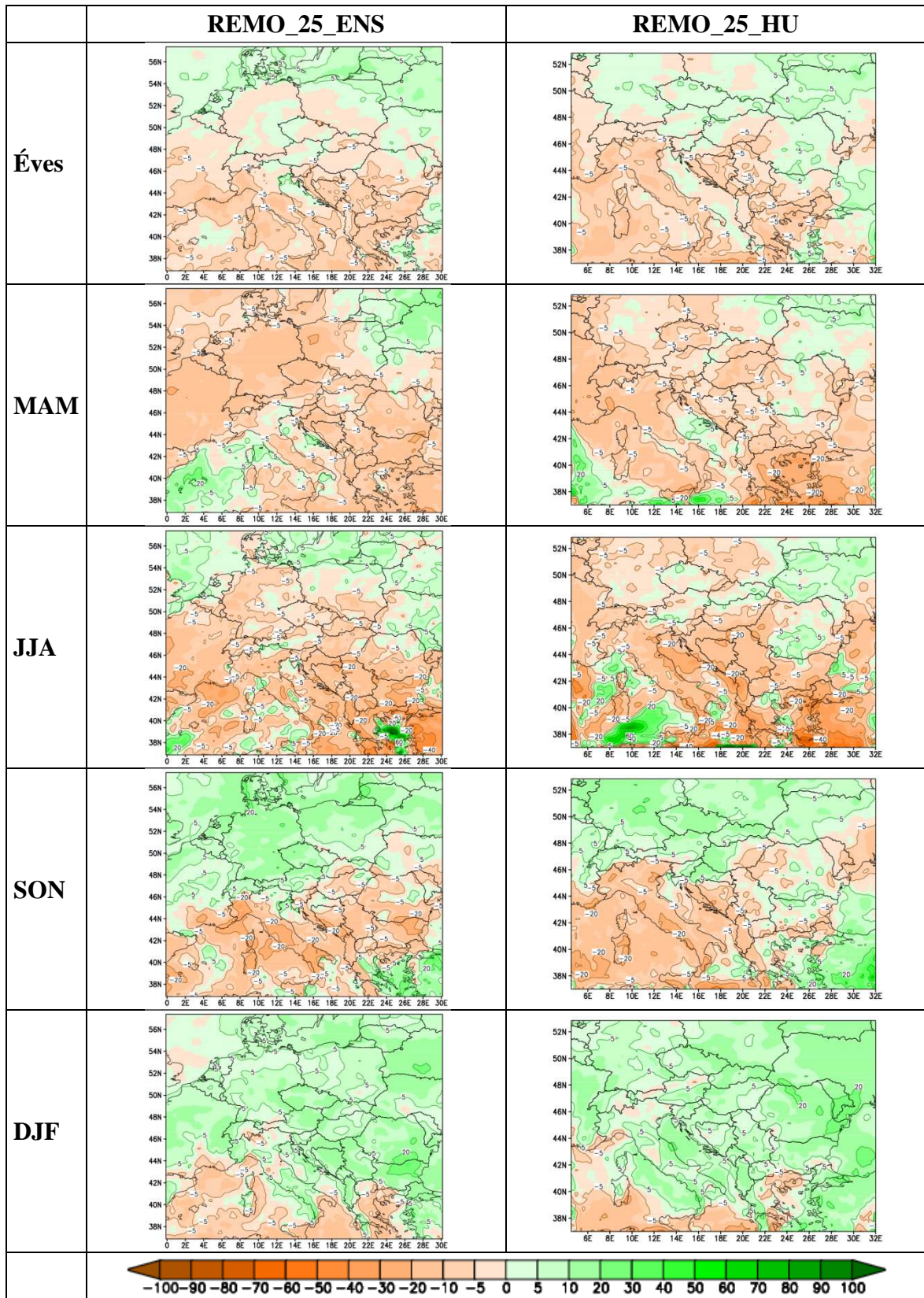
Hazánk területére koncentrálva a REMO egyedül a téli hónapban jelez (7%-os) csapadéknövekedést. A két verzió csak az őszi évszakban tér el egymástól, ugyanis a hazai REMO Magyarország területének nyugati részére csapadéknövekedést, keleti részére csökkenést jósol, mely az átlagban (3%-os) növekedést eredményez – az 5.7-es modellváltozat ugyanilyen mértékű csökkenést valószínűsít (3.2.3. táblázat). Míg az ENSEMBLES-beli RegCM az európai tartomány nagy részén összhangban van a REMO eredményeivel, ha csupán hazánk területét vizsgáljuk, jelentős eltérések láthatók. Itt ugyanis a RegCM szerint a tavasz kivételével minden évszakban csapadéknövekedés várható. Az ENSEMBLES projektbeli és az ELTE-n adaptált RegCM jövőbeli csapadékváltozásra adott válasza sem egyöntetű, mivel utóbbi minden évszakban szárazodást vetít előre a tartomány legnagyobb részén, és csupán nyáron és ősszel várható Magyarország északkeleti részén csekély mértékű növekedés.

A modellek Magyarországra vonatkozó csapadékatlagainak időbeli fejlődését vizsgálva (3.2.12. ábra) markáns különbségek láthatók. Az ENSEMBLES projektbeli modellek közül a REMO végig alacsonyabb mennyiségeket szimulál, mint a RegCM. A hazai modellek közel azonos (az ECHAM értékeinél nagyobb) csapadékatlagokat adnak az időszak folyamán.

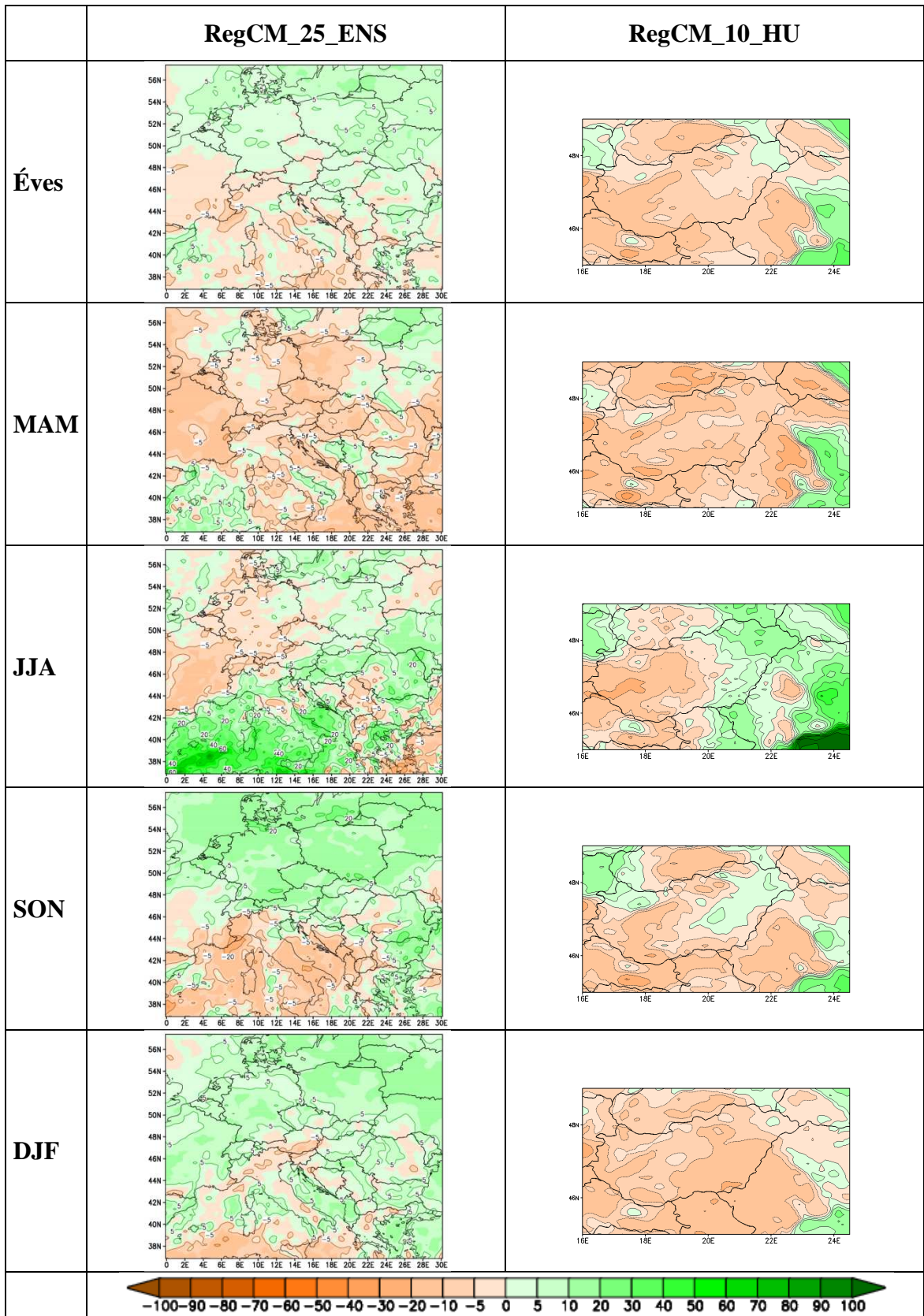
Az évszakai átlagok esetében (ábrán nem mutatom be) tavasszal és télen az ENSEMBLES szimulációk közötti különbségek a vizsgált időszak végére csökkennek. A hazai eredményekben az előbbi évszakban a modellek átlagai az időszak folyamán eltávolodnak egymástól, míg télen inkább „konvergálnak” egymáshoz. A nyári és őszi évszakban az idő előrehaladtával a modellek átlagai közötti különbségek valamelyest növekednek.

A hazai eredményeknél nyáron a REMO, míg ősszel a RegCM ad nagyobb csapadékatlagokat, mindkét esetben (de nyáron a leginkább) az ECHAM alulmarad a regionális modellek értékeihez képest.

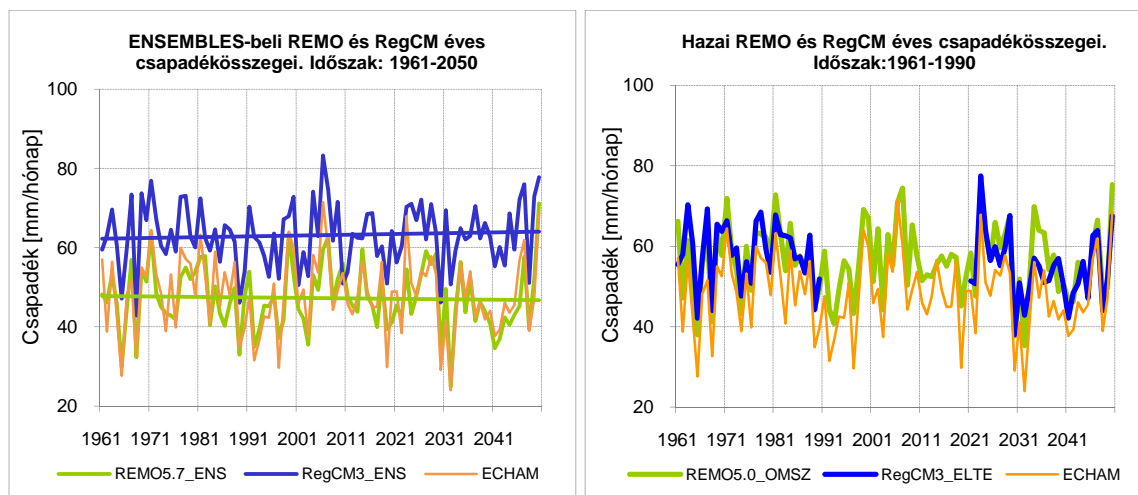
A két REMO modell változékonysága (3.2.4. táblázat) közel azonos nagyságú (10 és 20 mm/hónap között). A RegCM modell esetében a hazai verzió különösen nagy (30-45 mm/hónap) változékonysággal jellemzi a csapadék éves átlagait, míg az ENSEMBLES-projektbeli modellverzió a REMO-val azonos mértékű szórásértékeket mutat. A legnagyobb változékonyságra a jövőben a REMO esetében nyáron, illetve a RegCM szimulációk alapján ősszel számíthatunk.



3.2.10. ábra. A csapadékösszeg 2021–2050 időszakra várható éves és évszakos változása az ENSEMBLES-beli (első oszlop), valamint a hazai (utolsó oszlop) REMO modell alapján. Referencia: 1961-1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.



3.2.11. ábra. A csapadékösszeg 2021–2050 időszakra várható éves és évszakos változása az ENSEMBLES-beli (első oszlop), valamint a hazai (utolsó oszlop) RegCM modell alapján. Referencia: 1961–1990 időszakra vonatkozó modellátlagok.



3.2.12. ábra. Az ECHAM, valamint a REMO és RegCM ENSEMBLES-beli (bal) és hazai (jobb) kísérletének éves csapadékösszegei [mm/hónap] Magyarország felett. Időszak: 1961–2050. A bal oldali ábra egyenesei az időszakra illesztett trendet mutatják.

Modellek		éves	tavasz	nyár	ősz	tél
ENS	ALADIN_4.5_25km	3	5	7	13	-12
	ALADIN_5.1_25km	1	7	-8	13	-11
OMSZ	ALADIN_4.5_10km	0	3	-5	14	-10
ENS	REMO_25km	-2	-4	-7	-3	7
OMSZ	REMO_25km	-1	-7	-5	3	7
ENS	RegCM_25km	2	-8	9	6	4
ELTE	RegCM_10km	-7	-10	-2	-4	-10

3.2.3. táblázat. A csapadék átlagos változása [%] Magyarország felett az ENSEMBLES projektbeli (ENS) és a hazai (OMSZ és ELTE) regionális modelleredmények alapján. Időszak: 2021–2050, referencia: 1961–1990.

	Modellek	tavasz	nyár	ősz	tél
ENS	ALADIN_4.5_25km	15	20	15	15
	ALADIN_5.1_25km	16	18	20	16
OMSZ	ALADIN_4.5_10km	16	24	16	13
ENS	REMO_25km	11	16	15	12
OMSZ	REMO_25km	13	19	18	13
ENS	RegCM_25km	13	13	22	17
ELTE	RegCM_10km	32	32	45	33

3.2.4. táblázat. A csapadék-változás időbeli szórása [mm/hónap] Magyarország felett az ENSEMBLES projektbeli (ENS) és a hazai (OMSZ és ELTE) regionális modelleredmények alapján. Időszak: 2021–2050.

A projekciók során kapott eredmények:

- A modelleredmények kivétel nélkül a hőmérséklet növekedését mutatják, mely az óceántól távolodva és az Egyenlítőhöz közeledve egyre markánsabban jelentkezik.
- ALADIN
 - Magyarország felett a legnagyobb melegedés a nyári évszakban várható
 - Hazánkban, az átmeneti évszakokban főként csapadéknövekedésre, míg nyáron és télen csökkenésre számíthatunk – bár a modell ENSEMBLES-beli 4.5 változata növekedést valószínűsít.
- REMO és RegCM
 - A REMO-ban és az ENSEMBLES-ben alkalmazott RegCM esetében a legnagyobb melegedés az őszi évszakban várható, míg a hazai RegCM kísérlet ezt tavaszra valószínűsíti
 - A nagyobb szélességek felé csapadéknövekedés, a déli területeken pedig szárazodás várható. A különbség a modellek között leginkább abban van, hogy ez a választóvonal pontosan hol húzódik, s ez gyakran a hazánkra vonatkozó eredményeket teszi bizonytalanná.
 - Magyarország felett gyakran az azonos modellel végzett szimulációk is eltérő előjelű változást mutatnak: a csapadék változásában a RegCM-ben tavasz kivételével minden évszakban, a REMO esetében ősszel látható.

4. Összefoglalás

Az éghajlat-dinamikai kutatások 2005-ben kezdődtek meg Magyarországon, amikor az Országos Meteorológiai Szolgálatnál, illetve az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén sor került két-két (összesen négy) regionális klímamodell, az ALADIN-Climate, a PRECIS, a RegCM és a REMO modellek adaptálására. Az elmúlt években a modelleket intenzív tesztelésnek vetették alá, majd ezt követően elkészítették velük az első jövőre vonatkozó hazai éghajlati szimulációkat. Az eredményeket a két intézet szoros együttműködésével, közösen értékelték ki, mert a modelleredmények együttes (ensemble) értelmezése lehetőséget ad a bizonytalanságok azonosítására és számszerűsítésére. (A hazai eredményekbe bővebb betekintést ad *Krüzselyi et al.*, 2011.)

A négy regionális modellel végzett hazai kísérletek értékes, de korlátozott információt nyújtanak a modellek megbízhatóságáról és a szimulációkat jellemző bizonytalanságokról. Az ENSEMBLES projekt keretében viszont az említett modellek közül az ALADIN, a RegCM és a REMO modellekkel további szimulációkat hajtottak végre, melyek az alkalmazott integrálási tartományban, felbontásban, modell-beállításokban és -verzióban különböznek a hazai kísérletektől: a hazai modellkísérleteket 10-25 km-es felbontással végezték el a Kárpát-medence, illetve Kelet- és Közép-Európa területére, míg az ENSEMBLES projektben egy Európát teljesen és Afrika északi területeit részben magában foglaló tartományra 25 km-es felbontással készültek szimulációk. Az ENSEMBLES projekt ezen modelleredményeinek vizsgálata tehát jó alapot szolgáltat ahhoz, hogy segítségükkel a hazánkban adaptált modellek működését mélyrehatóbban megismerjük, illetve a Kárpát-medence jövőben várható éghajlatáról eddig alkotott képet tovább árnyaljuk. A dolgozatomban az ENSEMBLES keretében futtatott fenti három modell eredményeit értékeltem ki, a korábbi hazai vizsgálatokhoz (*Krüzselyi et al.*, 2011) hasonló módszertant követve, s az így kapott eredményeket összevettem a hazai tapasztalatokkal.

Vizsgálataimat a modellek validálásával kezdtem: az 1961–1990 időszakra vonatkozó hőmérsékleti és csapadékeredményeket egy rácsponti megfigyelési adatbázishoz viszonyítottam, s ez alapján számszerűsítettem a hibákat. Az ENSEMBLES keretében a három modellel összesen hét kísérletet hajtottak végre a múltira: 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 validáció során láthattuk, hogy az eltérő modellverzióval, más tartományon, illetve felbontással végzett kísérletek jelentősen különbözhetnek eddigi eredményeinktől. Az ALADIN modell egyöntetű hűvössége az új eredményekben már csak a déli területeken jelenik meg. A csapadékot illetően a re-analízis meghajtással végzett hazai és ENSEMBLES-beli modellkísérletek előjelükben különböző eredményeket adtak a tartomány nagy részén. Az a korábbi vizsgálatok alapján már ismert volt, hogy a hazai verzió 10 km-es felbontású futtatásában a tartomány túl kicsinek bizonyult, mivel a peremeken nagy hibák voltak láthatók. A REMO modell két kísérlete között a hőmérséklet, illetve a csapadék térbeli hibaeloszlását tekintve is nagyobb hasonlóság látható: a re-analízissel történt meghajtással az egész tartomány, míg a globális modell adta peremfeltételekkel inkább a déli területek bizonyultak túl melegnek; valamint az északi területeken a modellek felül-, míg a déli területeken alulbecslik a csapadékot. A hazai és az ENSEMBLES projektben végrehajtott szimulációk közötti hasonlóság nem okozott meglepetést, tekintve az ugyanazon rácsfelbontást, illetve a hasonló modelltartományt. Az ENSEMBLES-beli RegCM modell alapvetően hűvösnek és csapadékosnak mondható, valamint nagyobb hibákat ad, mint a hazai modellverzió. Ez szintén nem váratlan eredmény: az ELTE-n ugyanis a modell beállításánál törekedtek a jó validációs eredményekre, azaz a fizikai parametrizációk egyes részeinél a paramétereket úgy hangolták, hogy a modell jó eredményt adjon a Kárpát-medence területére.

A következőkben a modellek által adott éves és évszakos átlaghőmérséklet, illetve csapadékösszeg hibáit, majd a 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 időszakra számítottam ki, s referenciaként minden esetben az adott modellel 1961–1990-re kapott átlagot tekintettem.

A 4.1 táblázat alapján elmondhatjuk, hogy az évszakos átlagok esetében a hibák átlaga abszolút értelemben minden évszakban 1 °C, illetve 50 százalék alatt marad. Az átlag mögött azonban a modellek nagy eltéréseket mutatnak: a hibák esetenként a 2-3 fokot és a 80 százalékot is eléri. A legnagyobb alábecslést a csapadék és a hőmérséklet esetében is az őszi évszakra kapjuk (-2,7 °C és -62%), viszont ekkor a hőmérséklet fölébecslése is nagy. A legnagyobb pozitív hiba a hőmérséklet esetében a nyári évszakban (3,4°C), míg a

csapadékot tekintve télen fordult elő (88%). A hőmérséklet éves átlagai kiegyenlítik egymást, ezzel az átlagos éves hiba 0-vá válik.

	éves	tavas	nyár	ősz	tél
Legkisebb hiba	-1,5	-2,1	-1,6	-2,7	-0,9
Legnagyobb hiba	2,0	1,4	3,4	2,5	2,3
Átlagos hiba	0,0	-0,8	0,8	-0,5	0,5

	éves	tavas	nyár	ősz	tél
Legkisebb hiba	-24	3	-24	-62	-42
Legnagyobb hiba	41	73	75	60	88
Átlagos hiba	17	42	4	2	25

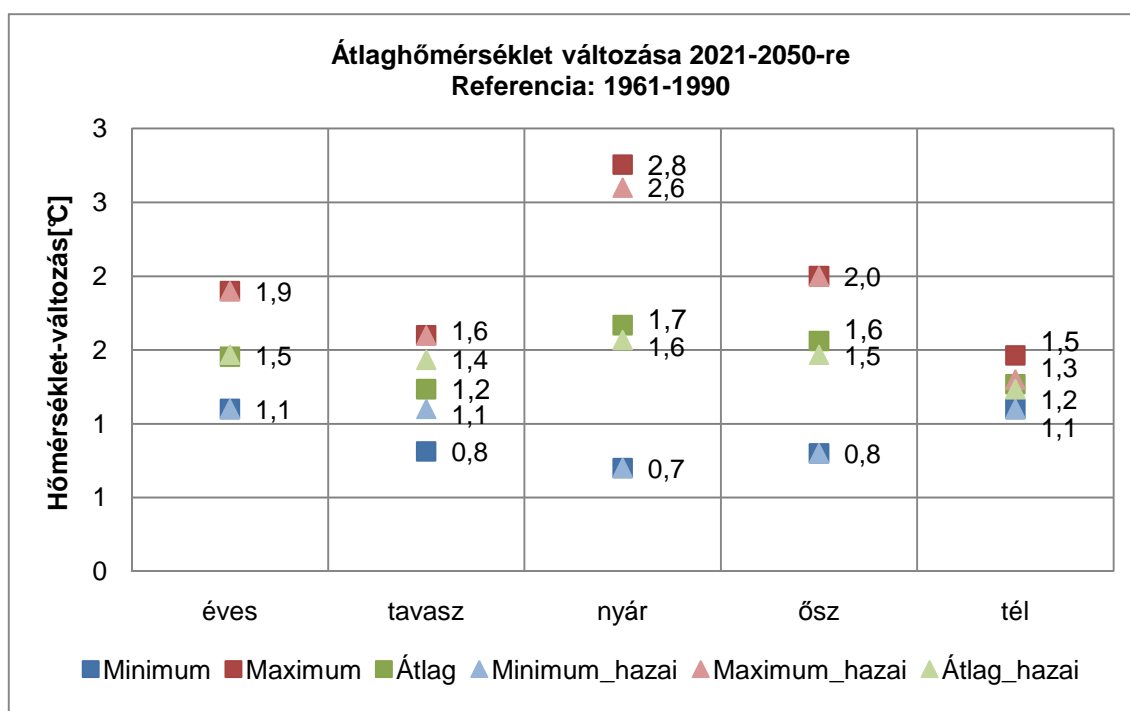
4.1. táblázat. Magyarországgra vonatkozó éves, illetve évszakos átlaghőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$] (fent) és csapadékösszeg hibák [%] (lent) maximuma, minimuma és átlaga a hazai és az ENSEMBLES-beli modelleredményeket együtt tekintve az 1961-1990 időszakon. A hazai kísérletekben a CRU, míg az ENSEMBLES modelljeiben az ECA megfigyelési adatbázis szolgáltatta a referenciát.

Az évszázad közepére a vizsgált modellek egybehangzóan a hőmérséklet növekedését mutatják (4.1. ábra). A legnagyobb mértékű változás nyáron várható, viszont ennek mértéke igen bizonytalan (együttesen tekintve a hazai és az ENSEMBLES-beli eredményeket $0,7-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ezzel szemben tavasszal és télen a növekedés mértéke nagyobb bizonyossággal adható meg (tavasszal $1,2 \pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$; télen $1,3 \pm 0,1-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Az ENSEMBLES eredmények hozzáadása a hazai mini-ensemble eredményeihez csak kis mértékben változtatja eddigi ismereteinket: az egyes évszakokban (a tavasz kivételével) valamivel magasabb értékeket kapunk a statisztikákra.

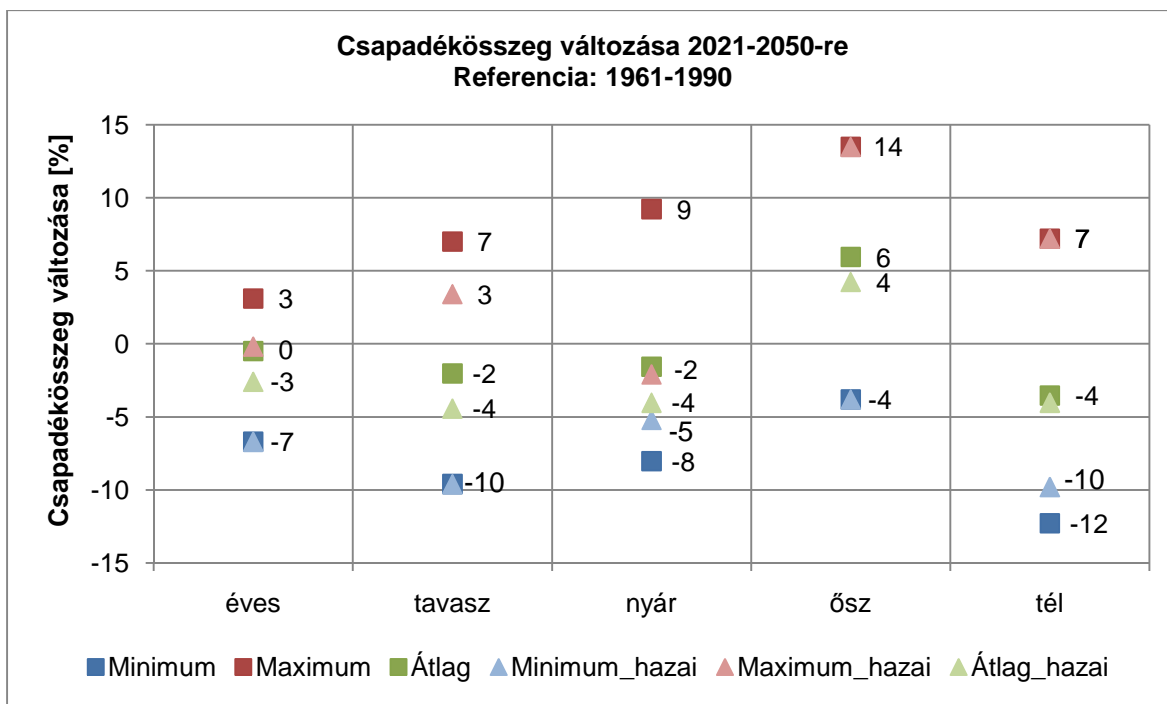
A csapadék változását vizsgálva (4.2. ábra) az ENSEMBLES eredményekkel az éves átlagokban megjelenik a pozitív változás, ugyanakkor azt is láthatjuk, hogy a maximális csökkenés mértéke ennél nagyobb. Viszont azáltal, hogy több modell jelez növekedést, az átlagban nem várható változás. Az évszázad közepére Magyarország felett a modelleredmények átlaga szerint főként a csapadékösszeg csökkenése várható az őszi évszakot kivéve (akkor is, ha csak a hazai eredményeket tekintjük, s akkor is, ha az ENSEMBLES eredményekkel kibővítjük az elemzést), viszont egyik évszakban sem kizárt a növekedés. A bizonytalansági intervallumot vizsgálva elmondhatjuk, hogy a hőmérséklethez hasonlóan a nyári évszak változása a legbizonytalanabb, ekkor ugyanis a csapadékösszeg növekedése és csökkenése közel azonos mértékű lehet ($-8 - +9\%$). Az ENSEMBLES eredmények főként tavasszal és nyáron adtak új információkat a csapadékösszeg változásának mértékéről. Közülük kiemelném a nyári évszakot, amikor a

hazai eredmények kivétel nélkül a szárazodást jelezték, azonban az ENSEMBLES kísérletek figyelembe vételével akár 9%-os csapadéknövekedés is lehetséges. A hazai eredmények ismeretében nagy kérdés volt a téli csapadékváltozás iránya: a korábbi vizsgálatokban három modellkísérletből kettő a csökkenést valószínűsítette. Az ENSEMBLES eredmények ezt a képet is árnyalják némileg: az összesen hét modellkísérletből három vetít előre növekedést a 2021–2050 időszakra.

Dolgozatomban bemutattam az ENSEMBLES projekt keretében az ALADIN-Climate, RegCM és REMO modellekkel végzett kísérletek eredményeinek átfogó elemzését. A kiértékelés során számos érdekes eredményt kaptam, melyek közül jelen munkában a legfontosabbakat mutattam be. A kutatást az eredmények mélyebb megértését célzó vizsgálatokkal (például szignifikancia-vizsgálattal) folytatjuk, valamint tervezzük a jövőre vonatkozó eredményeket az évszázadvégi 2071–2100 időszakra kiterjeszteni és szélsőségvizsgálatokkal kibővíteni.



4.1. ábra. Magyarországra vonatkozó éves és évszakos átlaghőmérséklet [$^{\circ}C$] változása a 2021-2050-es időszakon a hazai és ENSEMBLES-beli modelleredmények (négyzetek), illetve csak a hazai eredmények (háromszögek) alapján. Referencia: 1961-1990 modellátlagok.



4.2. ábra Magyarországra vonatkozó éves és évszakos csapadékösszeg [%] változása a 2021-2050-es időszakon a hazai és ENSEMBLES-beli modelleredmények (négyzetek), illetve csak a hazai eredmények (háromszögek) alapján. Referencia: 1961-1990 modellátlagok.

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.
- Christensen, J.H., F. Boberg, Ph. Lucas-Picher, O.B. Christensen, 2009: Will future summer time temperatures go berserk? Conference Proceedings on 2nd International Lund RCM Workshop (Eds: B. Rockel, L. Barring, M. Reckermann), ISSN 1681-6471, International Baltex Secretariat, Geesthacht, Germany, 188–189.
- Christensen, J.H., F. Boberg, Ph. Lucas-Picher, O.B. Christensen, 2009: Will future summer time temperatures go berserk? Conference Proceedings on 2nd International Lund RCM Workshop (Eds: B. Rockel, L. Barring, M. Reckermann), ISSN 1681-6471, International Baltex Secretariat, Geesthacht, Germany, 188–189.
- Csima, G., Horányi, A., 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service, *Időjárás* 112, 3–4, 155–177.
- Déqué, M., Dreveton, C., Braun, A., Cariolle, D., 1994: The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics*, 10, 249–266.
- 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.
- Hagemann, S., B. Machenhauer, O. B. Christensen, M. Déqué, D. Jacob, R. Jones, P. L. Vidale, 2002: Intercomparison of water and energy budgets simulated by regional climate models applied over Europe, MPI Report 338.
- 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., 2010: 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.
- Küzselyi, I., Bartholy, J., Horányi, A., Pieczka, I., Pongrácz, R., Szabó, P., Szépszó, G., and Torma, Cs., 2011: The future climate characteristics of the Carpathian Basin based on a regional climate model mini-ensemble. *Advances in Science and Research* 6, 69–73.
- Mitchell, T.D., Carter, T.R., Jones, Ph.D., Hulme, M., and New, M., 2004: A comprehensive set of climate scenarios for Europe and the globe. Tyndall Centre Working Paper 55.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., and Wilbanks, T.J., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, 463, 20 747–756.
- 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., 2008: First results with the REMO regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *CLIVAR Exchanges* 46, 13 (3), 24–26.
- 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., 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.
- Torma, Cs., Bartholy, J., Pongrácz, R., Barcza, Z., Coppola, E., and Giorgi, F., 2008: Adaptation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Időjárás* 112, 3–4, 233–247.

- Torma, Cs., Coppola, E., Giorgi, F., Bartholy, J., and Pongrácz, R., 2011: Validation of a High-Resolution Version of the Regional Climate Model RegCM3 over the Carpathian Basin. *J. Hydrometeor.* 12, 84–100.
- 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.
- Wilby, R.L., Wigley, T.M.L., Conway, D., Jones, P.D., Hewitson, B.C., Main, J., and Wilks, D.S., 1998: Statistical downscaling of General Circulation Model Output: A Comparison of Methods. *Water Resources Research* 34, 2995–3008.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Szépszó Gabriellának a szükséges ismeretek megszerzésében és a dolgozat elkészítésében nyújtott sok segítségért, valamint Bartholy Juditnak, belső konzulensemnek és Torma Csabának a RegCM eredmények értelmezésében nyújtott segítségéért. Továbbá köszönöm az Országos Meteorológiai Szolgálatnak és az ELTE Meteorológiai Tanszékének a rendelkezésemre bocsátott adatokat.