



A REMO2015 regionális klímamodell integrálási tartományának megválasztására vonatkozó érzékenységi vizsgálat

Suga Réka, Megyeri Otília Anna, Zsebeházi Gabriella

Országos Meteorológiai Szolgálat



Budapest, 2020. április

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Kohéziós Alap



BEFÉKTETÉS A JÖVŐBE

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Modell és módszerek	5
3. A kísérletek bemutatása	7
4. A kiértékelés bemutatása	9
5. Eredmények	10
5.1. Nyomás.....	10
5.2. Hőmérséklet	14
5.3. Csapadék	18
6. Összefoglalás	27
Irodalomjegyzék	28

1. Bevezetés

Az 5.0 verziójú REMO regionális klímamodell 2004-ben került adaptálásra az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ), hogy segítségével a jövőbeli magyarországi éghajlatváltozásról tudományosan megalapozott, számszerű és részletes információk álljanak elő. A modellt első lépésben rövid (néhány éves) tesztkísérleteknek vetették alá, hogy meghatározzák a célfeladathoz szükséges optimális beállításokat (például a horizontális felbontást). Ezt követően a CLAVIER európai uniós projekt (<http://clavier-eu.org>) keretében a 21. századra vonatkozóan éghajlati szimulációkat készítettek Közép- és Kelet-Európa területére 25 km-es felbontáson (Szépszó and Horányi, 2008). A projekt célkitűzéseinek megfelelő tartomány mérete, valamint az OMSZ rendelkezésére álló számítási kapacitás akkoriban nem tette lehetővé a finomabb térbeli felbontás alkalmazását.

A szuperszámítógépek gyors kapacitásnövekedése azonban az elmúlt években jelentősen kitolta a tíz évvel ezelőtti határokat: a 2018-ban vásárolt Apollo 6000 típusú szuperszámítógép kapacitása hozzávetőlegesen 12-szer nagyobb, mint a korábbi Altix 3700 szuperszámítógépé, melyet 2011 és 2015 között használtunk klímamodellezési feladatokra. Ennek megfelelően már az RCMTÉR projektben (2014–2016; <https://www.met.hu/RCMTeR>) egy a Duna vízgyűjtőjét lefedő tartományon 10 km-es rácsfelbontással végeztünk éghajlati projekciókat az ALADIN-Climate modellel (Szépszó et al., 2016), hogy a 2013-ban létrehozott Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer éghajlati projekcióit korszerű és részletes információkkal egészítsük ki.

A KlimAdat projekt keretében ezt a fejlesztést tovább folytatjuk a REMO legújabb (2015-ös) modellverziójának bevonásával. Az új éghajlatváltozási kísérleteket szintén 10 km-es felbontáson végezzük el egy a Duna vízgyűjtőjét magában foglaló tartományon.

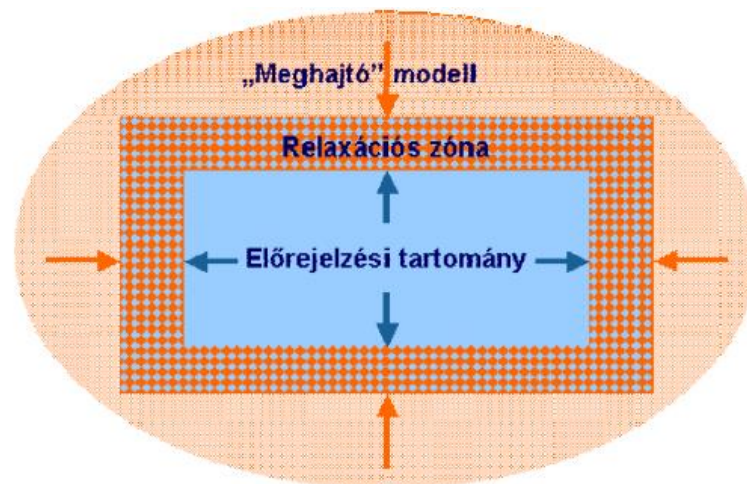
Az éghajlat modellezésének bizonytalansága részben a modellek közötti különbségekből adódik. Az előálló eredményeket számos tényező befolyásolhatja: a modell felépítése, azaz a benne alkalmazott közelítő eljárások (például a folytonos deriváltak, vagy a rácsávolságnál kisebb skálájú folyamatok közelítése) mellett az elvégzendő modellkísérlet paraméterei (a választott horizontális felbontás, regionális klímamodellek esetén a tartomány mérete és elhelyezkedése stb.) is megszabják az eredményeket. Ezért, egy új modellverzió alkalmazása, vagy a kísérlet előbb említett paramétereinek megváltoztatása esetén először rövid tesztkísérleteket végzünk, hogy felmérjük a változtatások hatását, valamint több lehetséges beállítás közül meghatározzuk az adott feladat szempontjából a legalkalmasabbat. **Az alábbiakban a REMO modell legfrissebb verziójával, 10 km-es felbontás mellett keressük azt a tartományt, ami méretére és elhelyezkedésére vonatkozóan megfelel az elvárásoknak, ugyanakkor, amelyen a modell a legkisebb hibával rendelkezik.**

A tartomány megválasztásával kapcsolatban számos hazai és nemzetközi tanulmány foglalkozott, amely alapján a következő szempontokat kell figyelembe vennünk:

- i. A tartomány mérete jóval nagyobb legyen a célterületnél, melynek határai több rácsponttal beljebb essenek a tartomány széleitől (Szépszó, 2014, Szépszó et al., 2015, Seth and Giorgi, 1998), és ne metsszék a magashegységeket. A korlátos tartományú modellek számára a

tartományon kívül zajló nagyskálájú légköri folyamatokról a tartományok peremén, oldalsó határfeltételek adnak információt. A határfeltételek származhatnak például globális modellek eredményeiből, vagy egy nagyobb tartományon, kisebb felbontással futtatott regionális klímamodell eredményeiből. A nagyskálájú információkat a modellintegrálás során minden időlépésben egy a regionális modelltartomány körül néhány (például 8-11) rácspontból álló relaxációs zónában hozzácsatjuk a regionális modell eredményeihez (Davies, 1976; **1. ábra**). Ez az eljárás a tartomány peremén nemrealisztikus eredményekre vezet, melyek a tartomány belsejébe is eljuthatnak és túl kis tartomány esetén elronthatják a számunkra érdekes terület feletti eredményeket.

- ii. A határfeltételek tehát csak a tartomány peremén fejtenek ki külső kényszert a korlátos tartományú modellre. A relaxációs zónán belüli tartományon a határfeltételek által leírt nagyskálájú folyamatok, valamint a regionális modellben megjelenő lokális kiskálájú kényszerek (úgy mint a részletes domborzat, a felszíni turbulens áramok) és a kiskálájú (parametrizált) folyamatok kölcsönhatnak. Minél kisebb a tartomány, annál nagyobb hatást fejtenek ki a határfeltételek, a kiskálájú folyamatok teljes kifejlődéséhez relatíve nagy tartományra van szükség (Jones et al., 1995). Egy túlságosan nagy tartományon azonban a regionális modell által módosított nagyskálájú képződmények jelentősen eltérhetnek a meghajtó modell mezőitől.
- iii. Larsen et al. (2013) a HIRHAM regionális klímamodellrel végzett érzékenységvizsgálataik során megállapították, hogy a számítási kapacitás korlátait figyelembe véve a csapadék modellezésének esetében egy nagyobb tartomány alkalmazása sokkal fontosabb, mint a modell felbontásának finomítása.



1. ábra: A korlátos tartományú modellekben a tartományon kívül zajló nagyskálájú folyamatokat oldalsó határfeltételek formájában vesszük figyelembe. A peremeken határfeltételeket szolgáltatató „meghajtó” modell, valamint a korlátos tartományú modell mezőit egy néhány rácspontból álló relaxációs zónában simítjuk össze. Forrás: Szépszó, 2014.

A tartomány méretének és elhelyezkedésének megválasztása tehát jelentős bizonytalansággal terhelt, ezért körültekintően, a fenti szempontok és a modellezési feladat

figyelembevételével kell eljárni. E bizonytalansági faktor kiküszöbölése végett az elmúlt években koordináltan végzett nemzetközi regionális klímamodellezési kezdeményezések, a PRUDENCE (*Christensen et al.*, 2007), ENSEMBLES (*Van der Linden and Mitchell*, 2009) és a Euro-CORDEX (*Jacob et al.*, 2014) projektekben a szimulációkat azonos tartományon és felbontáson végezték el.

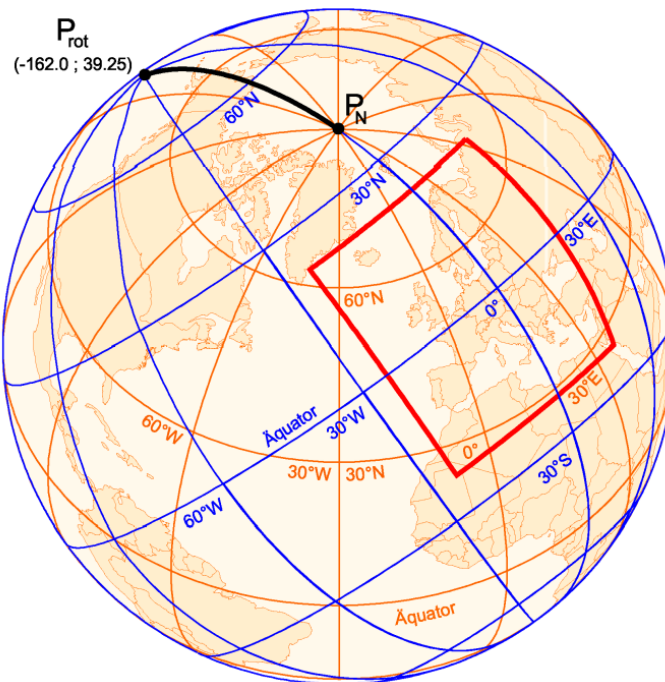
2. Modell és módszerek

A REMO (Regional Model; *Jacob and Podzun*, 1997) egy rácsponti¹, korlátos tartományú, hidrosztatikus² klímamodell, melyet a Német Meteorológiai Szolgálat időjárás előrejelző modelljéből, az Europa-Modellből (*Majewski*, 1991) fejlesztettek ki úgy, hogy az Európa-Modell fizikai parametrizációs csomagját (mely a rövidtávú időjárás-előrejelzésekre alkalmas) az ECHAM4 (*Roeckner et al.*, 1996) légköri cirkulációs modell parametrizációs csomagjával helyettesítették.

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál jelenleg a REMO 2015-ös verzióját használjuk. A modell prognosztikus változói a horizontális szélkomponensek, a felszíni légnyomás, a hőmérséklet, a specifikus nedvesség és a felhővíztartalom. A modell a hidro-termodinamikai egyenletrendszert egy elforgatott szférikus koordináta rendszerben oldja meg, mely módszer lényege, hogy a tartományt az Egyenlítő fölé transzformáljuk úgy, hogy az északi sarkot eltoljuk (pl. a **2. ábrán** az Északi sark új koordinátája: é.sz. 39.25°, ny.h. 162°, mely transzformációval a piros négyzettel kijelölt tartomány közepe épp az elforgatott koordináta rendszer egyenlítőjére esik). A transzformáció számos előnnyel bír: az Egyenlítő fölött egyrészt a rácspontok (amit a földrajzi szélesség és hosszúság koordinátákkal definiálunk) közötti távolság x és y irányban közel azonos, sőt a magasabb szélességekhez képest nagyobb, ami nagyobb időlépcsőt enged meg. A modell horizontális irányban a szférikus Arakawa-C rácsot alkalmazza, mellyel a szélkomponensek kivételével a prognosztikus változókat a ráccella közepén számítja, míg a szélkomponenseket a ráccella határain. Vertikális irányban hibrid koordináta rendszert használ, azaz a légkör alsóbb rétegeiben a modellszintek követik a domborzatot, a magasabb rétegekben azonban a modellszintek azonos nyomáson helyezkednek el – a két módszer közötti átmenet folytonos. A határfeltételek, valamint a REMO integrálási eredmények egy 8 rácspontból álló relaxációs zónában simítódnak össze. A modell fizikai felépítéséről részletes leírást ad *Szépszó* (2014), a legfontosabb jellemzőket az **1. táblázatban** foglaljuk össze.

¹ A modell a légkört egy 3 dimenziós ráccsal fedi le és az egyenleteket a rácspontokban oldja meg.

² Hidrosztatikus közelítésben a vertikális gyorsulásokat elhanyagoljuk, emiatt a konvektív felhő- és csapadékképződést a modellben parametrizálni kell. A hidrosztatikus közelítést alkalmazó modellek legnagyobb horizontális felbontása 8-10 km lehet.



2. ábra: A REMO regionális klímamodell elforgatott szférikus koordináta rendszere (kék háló), amelyben az Északi sark koordinátája: k.h. 162,0°, é.sz. 39,25° (Buntemeyer et al.).

1. táblázat: A REMO regionális klímamodell legfontosabb jellemzői.

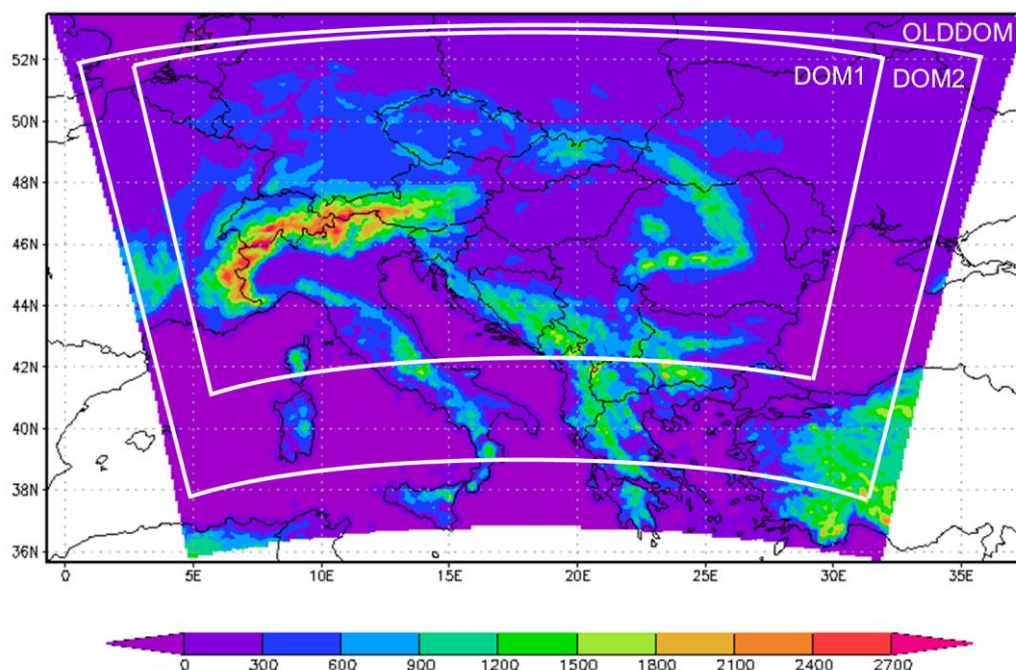
REMO 2015 regionális klímamodell	
Kiindulási modell	Dinamika: Europa-Modell LAM
	Parametrizációk: ECHAM4 AGCM
Dinamika	
Horizontális deriváltak kezelése:	Véges differencia módszer
Vertikális koordináta rendszer:	Felszínkövető–nyomási hibrid
Hidrosztatikus közelítés	Hidrosztatikus
Prognosztikus változók	Horizontális u, v szélkomponensek, Felszíni nyomás, Hőmérséklet, Specifikus nedvesség, Felhővíztartalom
Időbeli sémák:	Leapfrog séma szemi-implicit korrekcióval és Asselin szűrővel
Fizikai parametrizációk	
Sugárzás:	Rövidhullámú sugárzás: Fouquart and Bonnel (1980) Hosszúhullámú sugárzás: Morcrette (1989)
Felszíni modell:	Tiling módszer: 3-féle felszín típus (föld-, víz- és jégfelszín) relatív aránya egy rácscellán belül Talajhőmérséklet: 5-rétegű séma Talajnedvesség: Manabe (1969)
Vertikális diffúzió és turbulens fluxusok:	Monin and Obukhov (1954)
Konvekció:	Tiedtke (1989)

3. A kísérletek bemutatása

A modellszimulációk elkészítésénél alapvető célunk, hogy a kísérleteket reális idő alatt el tudjuk végezni, és az eredmények széleskörűen felhasználhatók legyenek. Az érzékenységvizsgálatok megtervezésénél az alábbi szempontokat mérlegeltük:

- ❖ *A kísérlet hossza:* az integrálás legyen elég hosszú ahhoz, hogy megbízható következtetéseket tudjunk levonni belőle a későbbi éghajlati szimulációkra vonatkozóan. Ezért a kísérletek hossza 10 év, mert ezen az időtartamon az egyes évek eltérő jellemzői már kevésbé érvényesülnek a modelleredményekben.
- ❖ *Próbatartományok száma:* figyelembe véve a rendelkezésre álló számítási kapacitás korlátait is, három tartomány vizsgálatával megalapozott következtetésekre lehet jutni.
- ❖ *A tartomány mérete és elhelyezkedése:* a tartományok minimális méretét meghatározza az, hogy alkalmasnak kell lenniük alapvető hatásvizsgálatok elvégzésére. Ebből a szempontból a hidrológiai vizsgálatoknak kitüntetett szerepe van, mivel a tartománynak tartalmaznia kell a kiválasztott folyók vízgyűjtő területeit. Ezen túlmenően a tartomány peremeinek távol kell húzódnia a magasabb domborzati elemektől, hogy elkerüljük az ebből fakadó zajokat.
- ❖ *Számítási kapacitás:* a vizsgálat és a kiválasztott új terület feletti szimulációk legyenek reális időn belül elvégezhetőek.

A fenti szempontok alapján három tartományt választottunk ki úgy, hogy méretük és elhelyezkedésük meghatározásánál korábbi projektjeinkben és érzékenységvizsgálatainkban alkalmazott tartományokra támaszkodtunk (**3. ábra**). A legnagyobb tartomány (OLDDOM) ennek megfelelően azonos a CLAVIER projektben korábban alkalmazott REMO5.0 régi tartományával, míg a legkisebb (DOM-1) és közepes (DOM-2) tartományok az ALADIN érzékenységvizsgálat során alkalmazottakhoz hasonlóak. Mindhárom terület lefedi Közép- és Kelet-Európát és ezen belül a Duna és a Tisza folyók vízgyűjtőit. Az OLDDOM tartomány magában foglalja a DOM-2-t, a DOM-2 pedig a DOM-1 területet. Az OLDDOM az DOM-2-től főként a déli irányba, míg a DOM-1-től főként keletre és délre nyúlik távolabb. A tartományok horizontális felbontása $0,09^\circ$, azaz hozzávetőlegesen 10 km. Tesztidőszakul az 1971–1980 évtizedet választottuk, melyet még kiegészítettünk egy év felpörgési idővel (azaz a kísérleteket az 1970–1980 időszakra hajtottuk végre, a kiértékelés során pedig az 1971–1980 időszak eredményeit vizsgáltuk).



3. ábra: A három választott modelltartomány kiterjedése és domborzata (tengerszint feletti magasság, m)

A modellszimulációk során felhasznált határfeltételek a hamburgi Climate Service Center által elvégzett 50 km-es felbontású REMO modellszimulációból (a továbbiakban REMO_0,44) származnak, amit az MPI-M-ESM globális modellel hajtottak meg egy Európát és Észak-Afrikát lefedő tartományon. A jövőre vonatkozó éghajlatváltozási kísérletek elvégzésekor ugyanezekkel a határfeltételekkel fogjuk meghajtani a REMO-t, tehát az érzékenységvizsgálatból levont következtetések megalapozott információval szolgálnak a hosszútávú kísérletek beállításaira vonatkozóan. Az érzékenységvizsgálat során a különböző tartományokon futtatott REMO integrálási ideje 4-6 nap körül mozgott (**2. táblázat**).

2. táblázat: Az érzékenységvizsgálat során kijelölt tartományok legfőbb paraméterei és beállításai.

Kísérlet	DOM-1	DOM-2	OLDDOM
Rácspontok száma	203 x 123	243 x 163	253 x 203
Horizontális felbontás	0,09°	0,09°	0,09°
Modelltartomány bal alsó sarokpontjai (x,y) az elforgatott koordináta-rendszerben	-9,55°, -8,595°	-10,8445°, 12,005°	-11,05°, -14,004°
Határfeltétel	MPI-M-ESM által meghajtott 50 km-es felbontású REMO az EUR44 tartományon		
Integrálási idő	~ 4 nap	~ 5,5 nap	~ 6,5 nap

4. A kiértékelés bemutatása

A kiértékelés során három változó (csapadékösszeg, 2-m hőmérséklet és a tengerszinti nyomás) éves, évszakos és havi átlagait vizsgáltuk. Ezen átlagokat a szimulációk határfeltételét adó 50 km-es felbontású REMO eredményeire is kiszámítottuk, hogy megvizsgáljuk, a leskalázás mennyiben módosítja a gyengébb felbontású klímamodell eredményeit. A csapadék igen változékony paraméter, modellekkel való leírása összetettebb feladat. Ezért az éves, évszakos és havi átlagos hibák mellett csapadékindexek származtatásával megvizsgáltuk, hogy a különböző napi csapadékmennyiségek előfordulása hogyan tér el a három modellkísérletben a megfigyelésekhez képest. A következő csapadékindexeket vizsgáltuk:

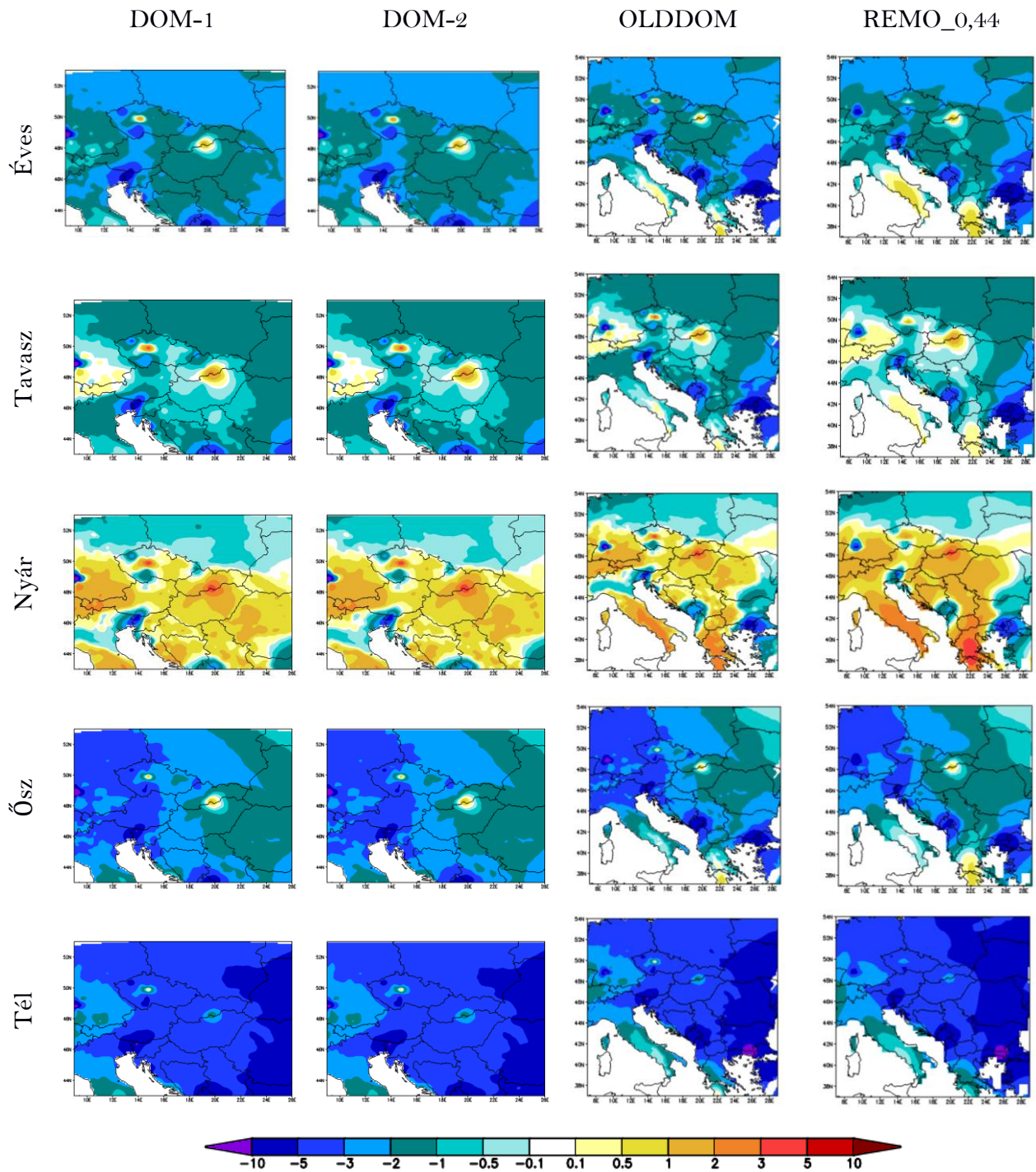
- ❖ 0,1 mm feletti csapadékú napok száma (RR1)
- ❖ 10 mm feletti csapadékú napok száma (RR10)
- ❖ 20 mm feletti csapadékú napok száma (RR20)
- ❖ leghosszabb száraz időszakok hossza: azon leghosszabb időszakok legnagyobb hossza adott hónapban, évszakban és évben, amikor a csapadék nem érte el a 0,1 mm-t (CDD).

A vizsgálatokhoz kétféle referencia adatbázist használtunk: az E-OBS 19.0 verzióját (*Cornes et al., 2018; 2019. márciusában publikálták*), illetve a CarpatClim-HU (*Bihari et al., 2017*) adatbázisokat. Az E-OBS adatbázis napi felszíni megfigyelési adatokat tartalmaz Európa területére 10 km-es rácsfelbontáson. Többnyire publikusan elérhető állomási adatsorok interpolációjával készül több meteorológiai változóra. Európai lefedettsége miatt leggyakrabban a modelleredmények nagytérségű vizsgálatára használjuk, Magyarországra vonatkozó értékei (különösen a csapadékadatok) azonban gyakran szignifikáns eltéréseket mutatnak a hazai adatbázistól, ami a kevesebb felhasznált állomási adatsorral, a homogenizáció hiányával és az eltérő interpolációs módszerrel magyarázható. A CarpatClim-HU napi felszíni megfigyelési adatokat tartalmazó adatbázis, melyet speciálisan meteorológiai célokra kifejlesztett homogenizációs és interpolációs módszerek (*Szentimrey, 2008; Szentimrey és Bihari, 2007*) alkalmazásával állítottak elő egy 10 km-es felbontású, a Kárpát-medencét és Magyarországot lefedő rácson. A Magyarországra vonatkozó validációs vizsgálatok során kiemelt szerepe van, hiszen a lehető legtöbb állomási adatsor felhasználásával készült, ezáltal a legpontosabb információval szolgál.

Az elemzésben a modelleredmények és a megfigyelések eltérését a teljes tartományra, valamint Magyarországra vonatkozóan hibatérképeken jelenítjük meg. Ezenkívül Magyarország területére országos éves, évszakos és havi átlagokat számítottunk, melyeket táblázatos elrendezésben és grafikonon mutatunk be. A három különböző tartományon végzett kísérletek eredményeit közvetlenül is összehasonlítottuk egymással, hogy az eltéréseket egymáshoz képest is részletesebben feltárjuk.

5. Eredmények

5.1. Nyomás



4. ábra: Az éves és az évszakos tengerszinti légnyomás különbsége (hPa) a különböző tartományokon végzett modellkísérletek (DOM-1, DOM-2, OLDDOM), és a határfeltételt szolgáltató 50 km-es REMO eredményei, valamint az E-OBS adatok között. Időszak: 1971–1980.

A tengerszinti légnyomás vizsgálatával képet kaphatunk arról, hogy a modell hogyan képes leírni a térségünket uraló nagyskálájú légköri képződményeket.

A hibatérképeket tekintve (**4. ábra**) az éves átlag mindhárom modellkísérletben jellemzően 1-3 hPa-lal alacsonyabb az E-OBS értékeihez képest. A legkisebb hibák [(-1)–(-2) hPa] a Kárpát-medence és a tartományok nyugati területei felett figyelhetők meg, míg általában a tartomány széleihez közeledve az alábecslés növekszik. Az évszakos ábrákat tekintve láthatjuk, hogy egyedül nyáron jelentkezik a tartományok nagy részén felülbecslés, a többi évszakban, leginkább télen az eltérés negatív előjelű. Tavasszal, ősszel és télen a hiba területi eloszlásában egy enyhe nyugat-kelet irányú változás figyelhető meg, nevezetesen, hogy kelet felé tavasszal és ősszel az alulbecslés mértéke csökken, míg télen nő. Az egyes tartományok és az 50 km-es felbontású modellek között jelentős eltérés nem tapasztalható, tehát a leskálázott szimulációkban „átöröklődnek” a határfeltétel hibái, ami különösen a nagytérségű jellemzők esetén nem meglepő.

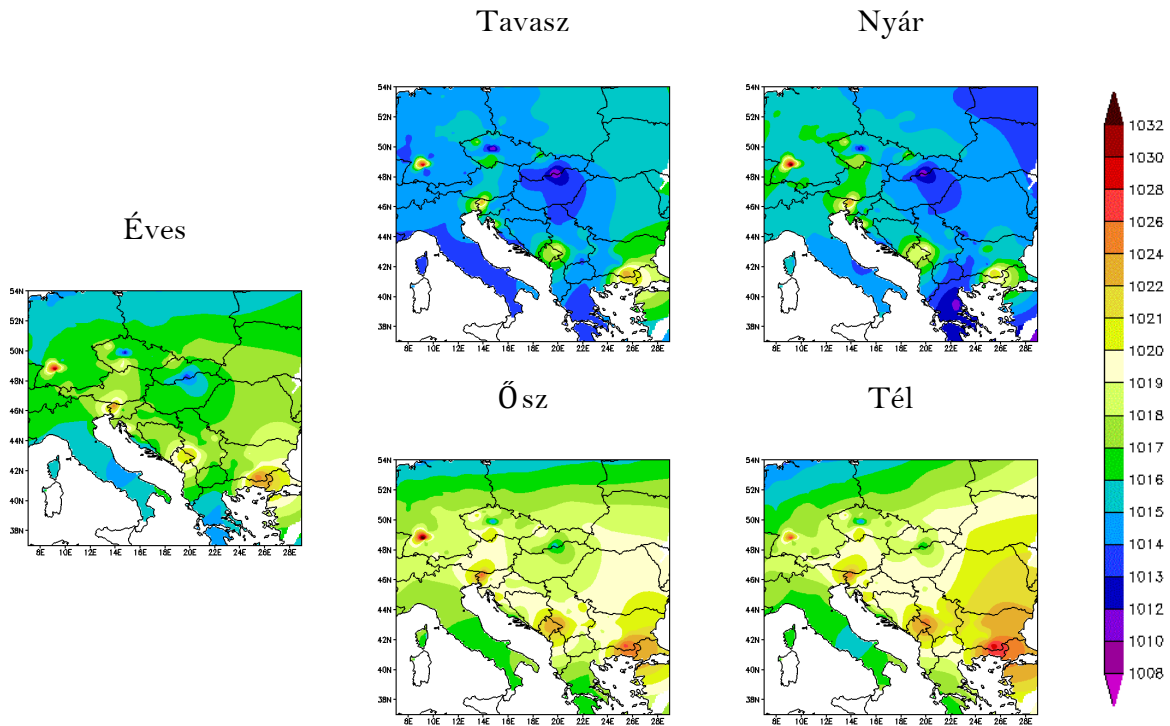
A térképeket tüzetesebben megvizsgálva, Európa különböző területein, valamint az északkeleti határvidéken egy-egy kisebb folt látható, ahol az eltérés környezetéhez képest ellentétes előjelű vagy nagyobb mértékű. Az E-OBS átlagtérképeit megvizsgálva láthatjuk, hogy ezek a „gyanús foltok” a megfigyelésből adódnak (**5. ábra**). Mivel a foltok az évszakos átlagtérképeken mindig azonos helyen tűnnek fel, arra következtethetünk, hogy ezeken a területeken az E-OBS hibás (a tengerszinti légnyomás feltehetően hibásan került átszámításra a műszerszinti légnyomás értékekből). Magyarország, Bulgária és Görögország felett a ritka állomásszám miatt a hibás adatból történő térbeli interpoláció nagy területre kifejti hatását (a pontokból kiindulva koncentrikus körök láthatók), ami megkérdőjelezi a modellhibák érvényességét.

Az országos átlagos hibák vizsgálata alapján elmondhatjuk, hogy összességében mind az 50 km-es, mind a 10 km-es felbontású modellszimulációk tavasszal modellezték legjobban az átlagos nyomást, míg a téli időszakot a legnagyobb (negatív) hibával írták le (**3. táblázat**). Ez utóbbi magyarázható a télen gyakran megjelenő mediterrán ciklonok elmaradásával a megfigyelési adatbázisban, avagy szerepük modellbeli túlzott figyelembevételével. A téli túl alacsony nyomás a csapadék felülbecslését vonhatja maga után (50-90%-os havi csapadéktöbblet jelentkezik a modellben a megfigyeléshez képest, lásd. 5.3 alfejezet).

Minden vizsgált modellkísérlet országos havi átlagai közül a májusi, augusztusi és szeptemberi modelleredmények álltak a legközelebb a mérésekhez, míg a téli hónapok a legmesszebb (**6. ábra**). Ezen felül általánosságban elmondható, hogy a REMO modell jól reprezentálja a nyomás éves menetét Magyarországon, hiszen a legmagasabb nyomási értékek jól láthatóan télen és ősszel, míg a legalacsonyabbak tavasszal adódnak mind a modell, mind a megfigyelési adatbázis alapján. Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy a REMO-ban a szeptemberi-októberi hónapokban jelenik meg a legmagasabb nyomás, míg az E-OBS szerint ez decemberben-januárban jelentkezik. A legalacsonyabb nyomás egy hónappal tolódik korábbra (április helyett márciusra) a modellben a megfigyeléshez képest.

Az egyes tartományokon kapott eredmények közül leginkább az OLDDOM kísérlet hibái térnek el a másik két kísérlet eredményeitől (nagyobb mértékben, mint ahogy a DOM-1 és

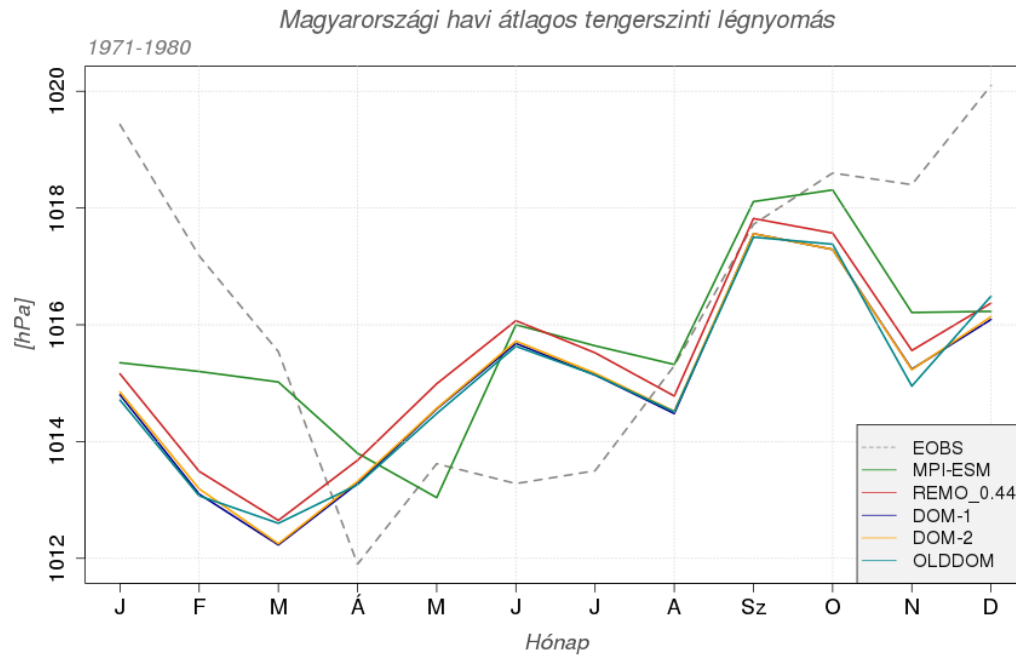
DOM-2 kísérlet eredményei egymástól különböznek), különösen január, december, november és március hónapokban. Azonban ezek a különbségek nem haladják meg a 0,8 hPa-t.



5. ábra: Éves és évszakos tengerszinti légnyomás (hPa) az E-OBS megfigyelési adatbázisban. Időszak: 1971–1980.

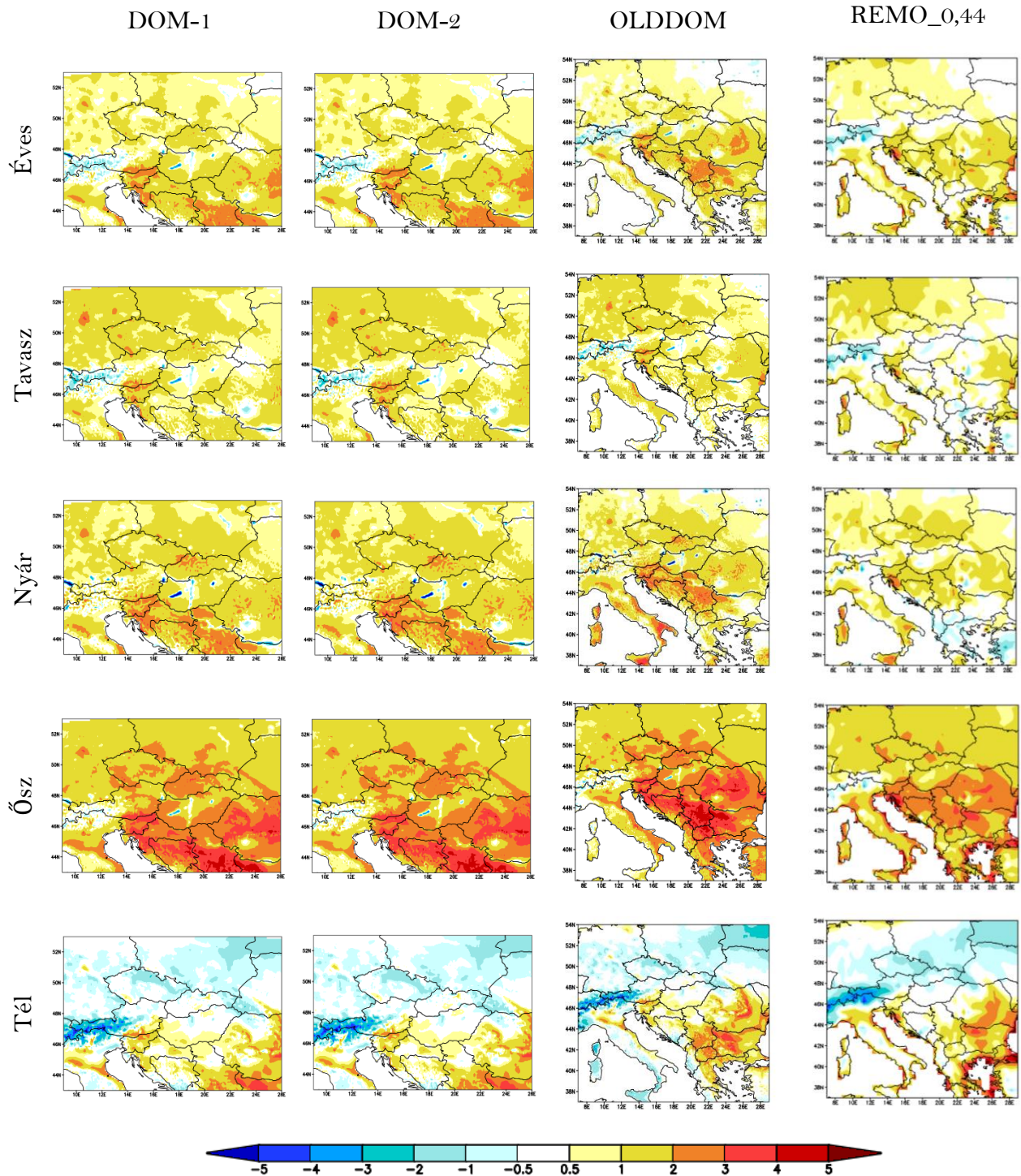
3. táblázat: A magyarországi éves és évszakos átlagos tengerszinti légnyomás eltérése (hPa) a különböző tartományon végzett modellkísérletek (DOM-1, DOM-2, OLDDOM), a határfeltételt szolgáltató 50 km-es REMO eredményei, valamint az E-OBS megfigyelési adatbázis között. Időszak: 1971–1980.

	DOM-1	DOM-2	OLDDOM	REMO_0,44
Éves	-1,3	-1,3	-1,4	-1,0
Tavasz	-0,4	-0,4	-0,3	0,0
Nyár	1,0	1,0	1,0	1,4
Ősz	-1,7	-1,7	-1,8	-1,3
Tél	-3,8	-3,8	-3,8	-4,0



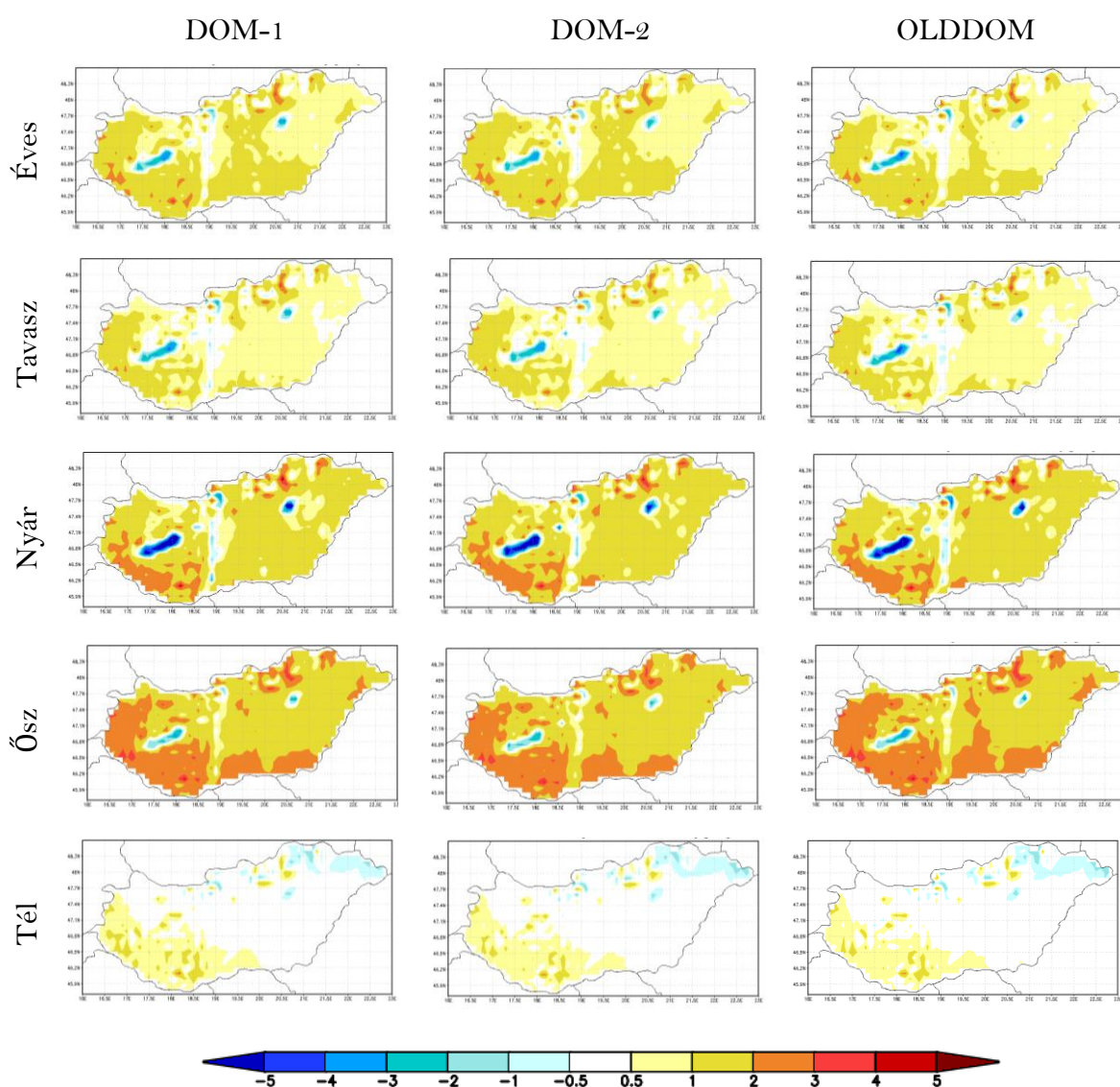
6. ábra: A havi átlagos tengerszinti légnyomás (hPa) éves menete Magyarországon az E-OBS, a különböző tartományokon végrehajtott 10 és 50 km-es felbontású REMO, valamint a külső határfeltételt adó MPI-ESM globális klímamodell eredményei alapján. Időszak: 1971–1980.

5.2. Hőmérséklet



7. ábra: Az éves és az évszakos átlaghőmérséklet különbsége (°C) a három 10 km-es felbontású és az 50 km-es felbontású REMO modellszimulációk eredményei, valamint az E-OBS adatok között. Időszak: 1971–1980.

A területi különbségek tekintetében láthatjuk, hogy a telet leszámítva minden évszakban mindkét referencia-adatbázishoz viszonyítva az ország és a tartományok nagy részén jellemzően 1-2 fokkal felülbecsülik a modellszimulációk a hőmérsékletet (**7. és 8. ábra**). Ősszel a hiba azonban jóval nagyobb, Magyarországtól délre eléri a 3-5 °C-ot is. Télen hazánktól északra 1-2 fokkal, míg az Alpok felett 4-5 fokkal is hidegebb a modellezett átlaghőmérséklet az E-OBS-hoz képest. Ezenkívül tavasszal és ősszel szintén az Alpok vonulatai felett, illetve tavasztól őszig a vízfelszínnek felett a REMO túl hideg.



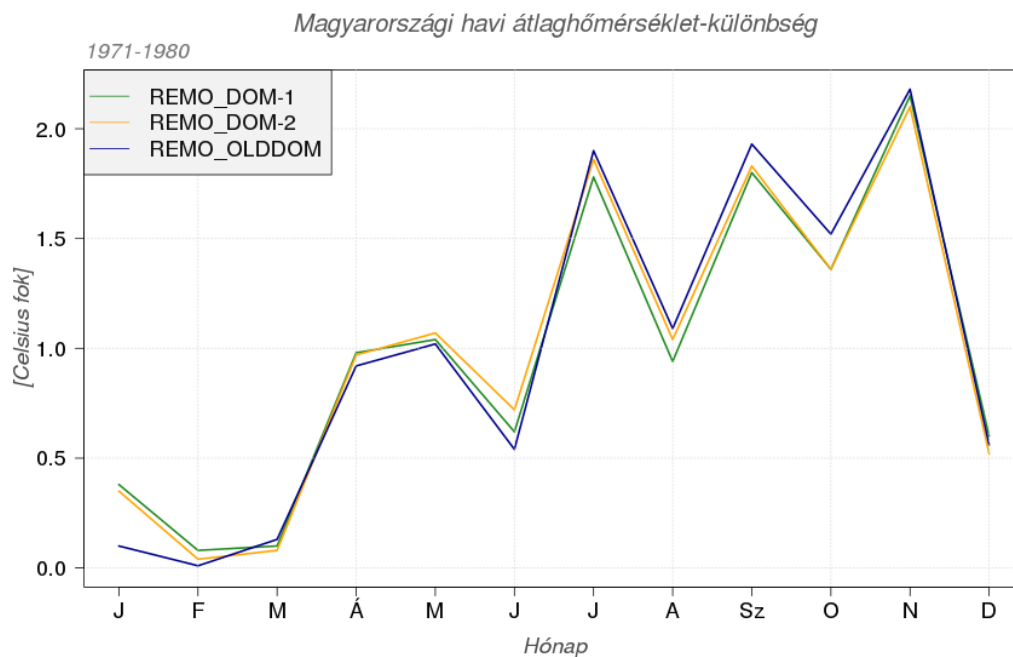
8. ábra: Az éves és az évszakai átlaghőmérséklet különbsége (°C) a három 10 km-es felbontású REMO modellszimuláció eredményei és a CarpatClim-HU adatok között. Időszak: 1971–1980.

Megjegyezzük, hogy a felhasznált megfigyelési adatbázisok a folyók és tavak felett nem tartalmaznak valós adatot, hanem ezeken a területeken csak a parti állomásokból interpolált adatok állnak rendelkezésre. A REMO azonban a vízfelszíni hőmérsékletet is modellezi, tehát

a megfigyelésnél hidegebb értékek arra utalnak, hogy a modell képes leírni a folyók és tavak hűtő hatását, ugyanakkor, hogy ezt mennyire pontosan teszi, azt nem tudjuk megállapítani jelen referencia-adatbázisokhoz viszonyítva.

A magyarországi eredményeket tekintve a legkisebb hiba tavasszal, illetve télen fordult elő a modellkísérletekben (a CARPATCLIM-hez viszonyítva rendre 0,7 és 0,2 °C a felülbecslés mértéke), míg a legnagyobb eltérést (1,8–1,9 °C) ősszel figyelhetjük meg. Havi bontásban a legjobb becslést januárban, februárban és márciusban adta a modell, míg a legrosszabbat novemberben, szeptemberben és júliusban (**9. ábra**).

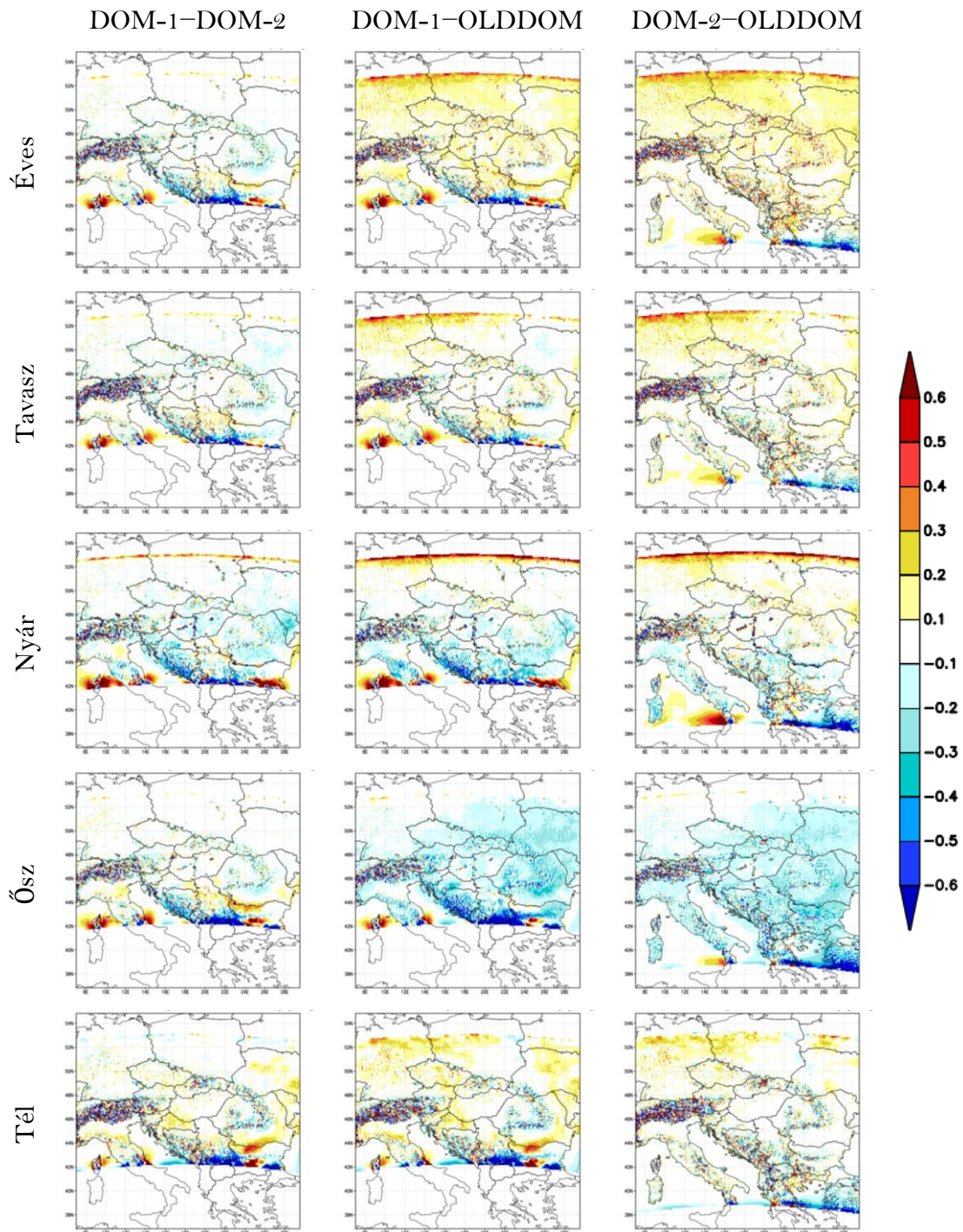
A leskálázott eredményeket összevetve a határfeltételeket adó 50 km-es felbontású REMO eredményeivel megállapíthatjuk, hogy hazánk felett tavasszal és nyáron az 50 km-es REMO jobban teljesített (a hiba 0,5 °C-on belüli) a finomabb felbontású kísérleteknél (**4. táblázat**).



9. ábra: Havi átlaghőmérséklet-különbség (°C) Magyarországon a három 10 km-es felbontású REMO eredményei alapján. Referencia: CarpatClim-HU. Időszak: 1971–1980.

Az egyes tartományok eredményei között jelentős eltérés nem figyelhető meg (**10. ábra**), az országos évszakos hibák legfeljebb 0,1 °C-kal térnek el egymástól. Azonban a nyári és őszi értéket leszámítva, az OLDDOM tartomány eredményei állnak közelebb a mérésekhez és az éves átlag is itt mutatja a legjobb eredményt (**4. táblázat**).

Az E-OBS és CarpatClim-HU referencia adatbázisokkal számolt eredmények között éves átlagban kb. 0,1 °C-os differenciát figyelhetünk meg. Az E-OBS a CarpatClim-HU-nál kismértékben melegebb, ennél fogva az európai adatbázishoz viszonyítva a legtöbb évszakban kisebb hibákat kapunk.



10. ábra: Átlaghőmérséklet-különbség (°C) az egyes tartományok között.

4. táblázat: Az éves és az évszakos átlaghőmérséklet hibája (°C) Magyarországon a három 10 km-es és az 50 km-es felbontású REMO eredményeiben. Referencia: E-OBS és CarpatClim-HU. Időszak: 1971–1980.

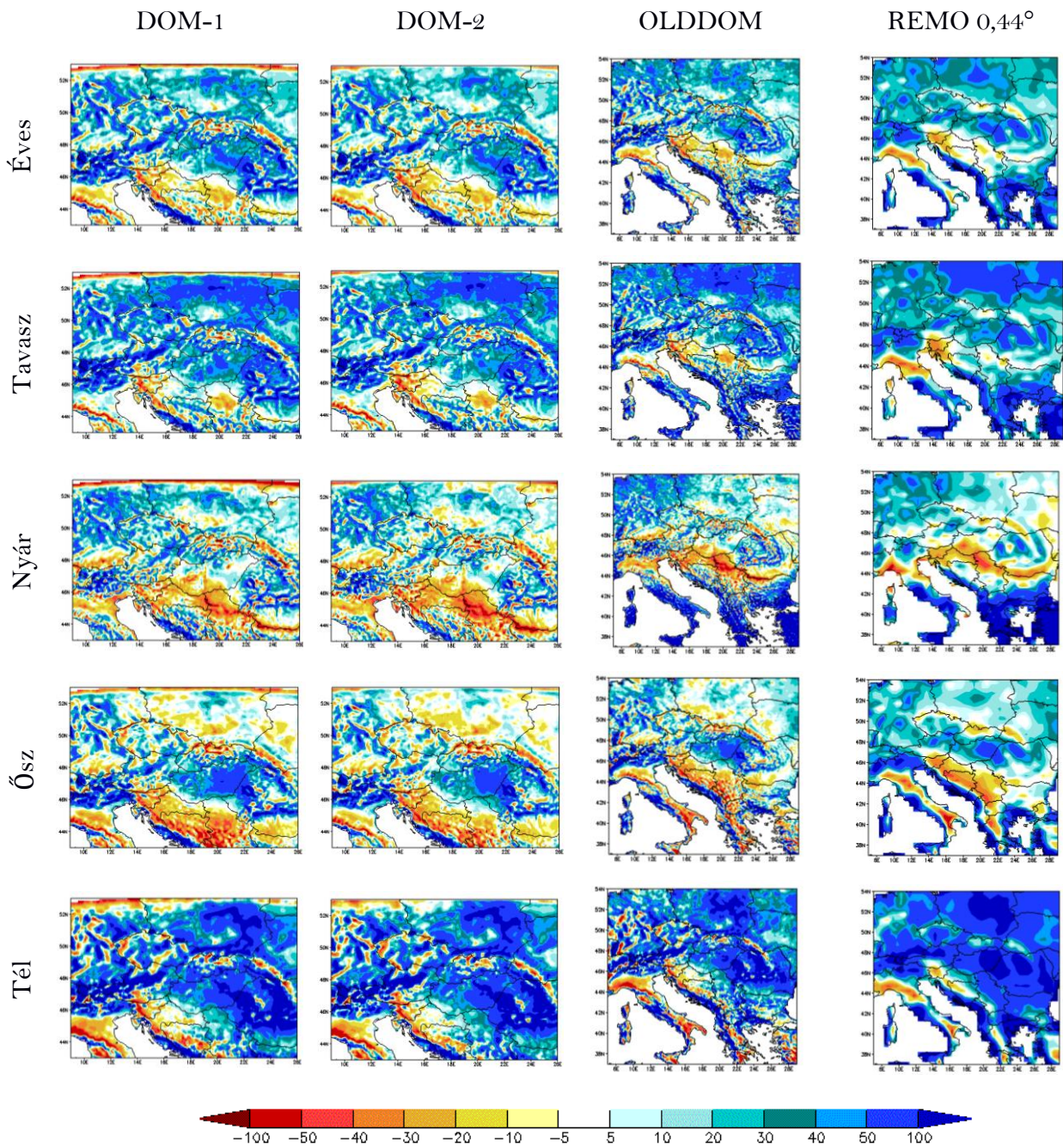
	REMO 0,09° - E-OBS			REMO 0,44° - E-OBS	REMO 0,09° - CARPATCLIM		
	DOM-1	DOM-2	OLDDOM		DOM-1	DOM-2	OLDDOM
Éves	0,9	0,9	0,8	0,6	1,0	1,0	0,9
Tavaszi	0,6	0,6	0,6	0,1	0,7	0,7	0,7
Nyári	1,0	1,1	1,0	0,7	1,1	1,2	1,2
Őszi	1,9	1,9	2,0	1,6	1,8	1,8	1,9
Téli	0,3	0,2	0,2	-0,1	0,2	0,2	0,2

5.3. Csapadék

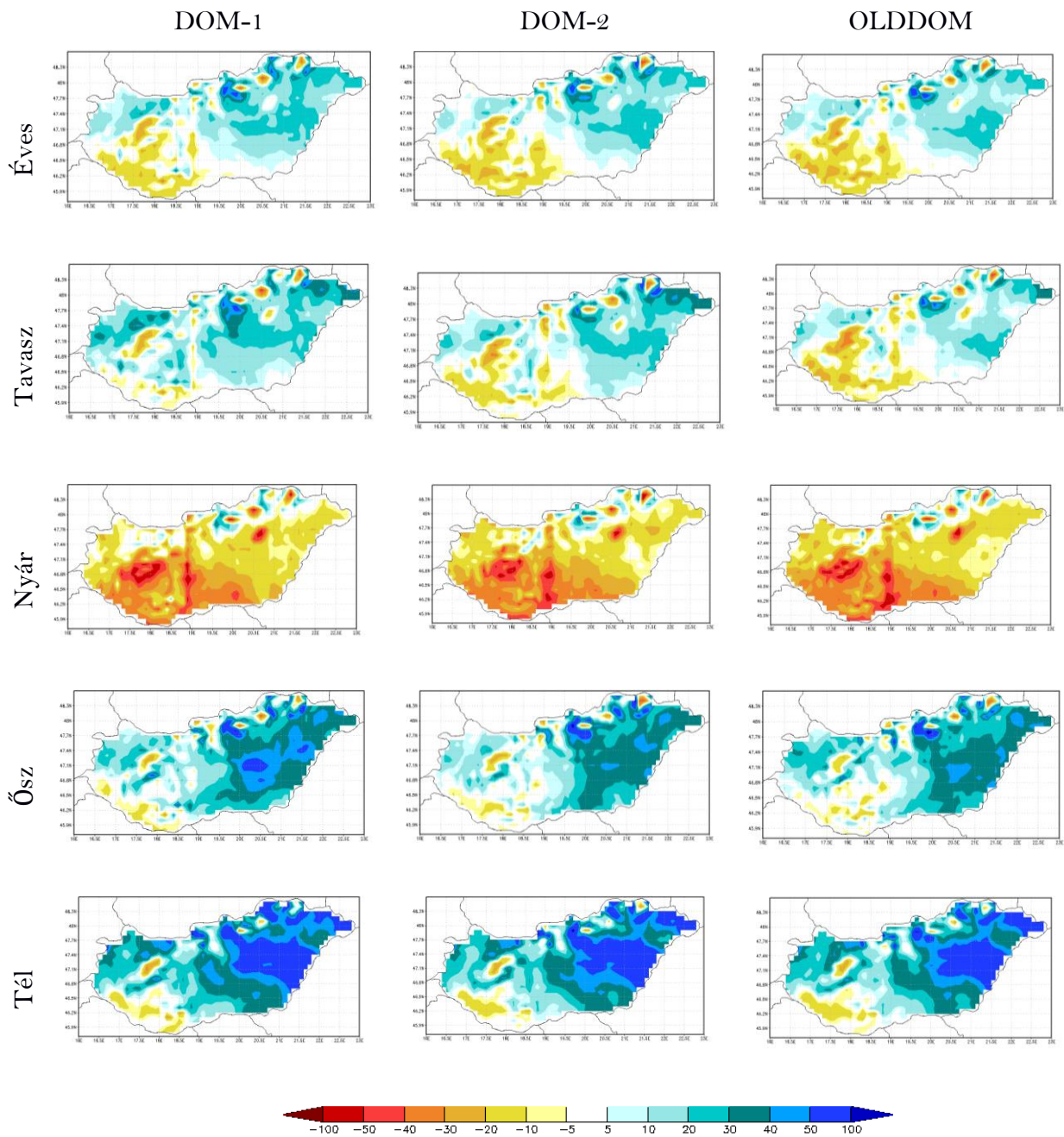
Összehasonlítva az egyes modellezett meteorológiai változókat a megfigyelésekkel látható, hogy a csapadékeredmények mutatják a legnagyobb hibát. A REMO alapvetően minden évszakban felülbecsüli a csapadékot az E-OBS-hoz képest, legnagyobb mértékben tavasszal és télen (**11. ábra**). A Kárpátok, az Appenninek és a Dinári-hegység felett, valamint nyáron és ősszel a dél-európai síkságok területén azonban a modellezett csapadékösszeg túl kevés. A finomabb felbontású szimulációk hibái a csapadék esetében is tükrözik a határfeltételek hibáit, ősszel és télen azonban mérsékeltebbek annál.

Magyarországra fókuszálva a felülbecslés tavasszal, valamint ősszel és télen az ország egész területén megfigyelhető, kivéve egy vékony sávot a délnyugati határszáron, ahol az eltérés 5%-on belüli. Nyáron a csapadéktöbblet inkább az ország keleti felében jelentkezik, délnyugaton, valamint a nagyobb folyók és tavak felett a modell 20-40%-kal szárazabb az E-OBS-nál. Ha a REMO eredményeit a CarpatClim-HU-hoz viszonyítjuk, akkor az előbbi megállapításainkon némileg módosítanunk kell, ugyanis a pontosabb referenciával a korábban megállapított csapadéktöbblet mértéke mérsékeltebb, míg a szárazabb nyári évszak hibája nagyobb (**12. és 13. ábra**). A CarpatClim-HU átlagosan 5-10 mm-rel csapadékosabb az E-OBS-nál az egyes hónapokban. Az országos átlagos hiba télen több, mint 25%-kal, tavasszal és ősszel 15-20%-kal alacsonyabb (**5. és 6. táblázat**), sőt tavasszal az ország délnyugati területein a hiba előjele ellentétesre vált (azaz 10-20%-kal szárazabbak a modelleredmények). Míg az E-OBS-ot tekintve a nyár bizonyult a legkisebb hibával modellezett évszakkal, a CarpatClim-HU-hoz viszonyítva rendkívül száraz az évszak, helyenként (pl. a Balaton és a Duna felett) az 50%-ot is meghaladja az alulbecslés. A tavaszi évszakban mindhárom tartományon a legjobban teljesített a REMO, különösen az ország középső területein.

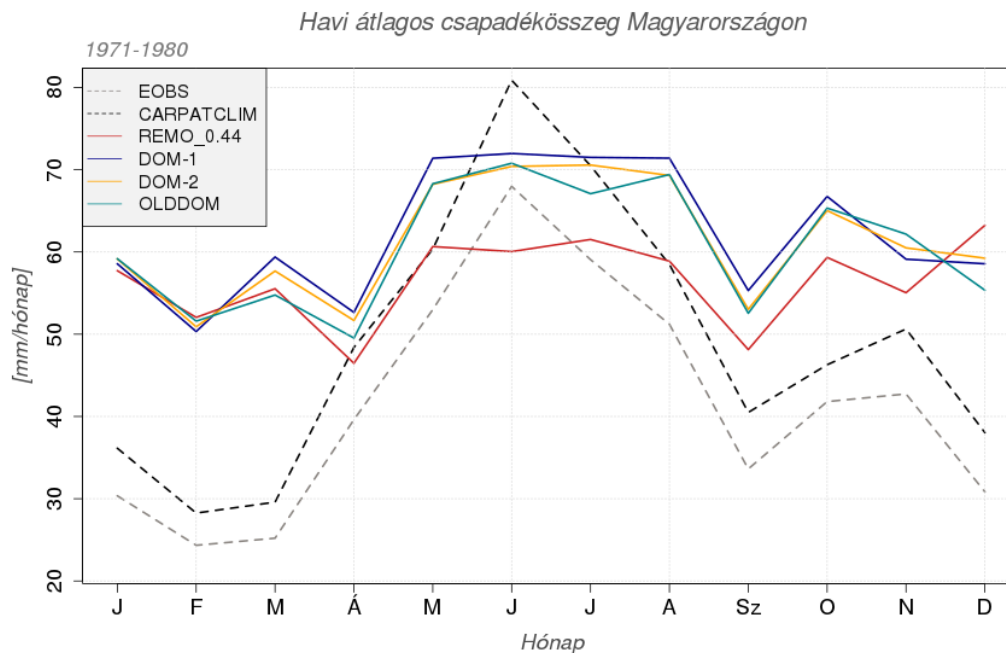
A havi átlagos csapadékösszeget vizsgálva elmondható, hogy a modellszimulációk a magyarországi csapadék évszakos változékonyságát alábecsülik, főként a jelentős téli csapadéktöbblet miatt (**13. ábra**). Májustól augusztusig a havi összegek közel azonosak, a június nem emelkedik ki a legcsapadékosabb hónapként. A két referencia-adatbázis közötti különbségek miatt az E-OBS-hoz viszonyítva a júliusi modellezett összeg túl sok, míg a CarpatClim-HU-hoz viszonyítva túl kevés.



11. ábra: Az éves és évszakos csapadékösszeg relatív eltérése (%) a különböző REMO modellszimulációk eredményei és az E-OBS adatok között. Időszak: 1971–1980.



12. ábra: Az éves és évszakos csapadékösszeg relatív eltérése (%) a különböző REMO modellszimulációk eredményei és a CarpatClim-HU adatok között. Időszak: 1971–1980.



13. ábra: A magyarországi havi átlagos csapadékösszegek az 1971–1980 időszakban a különböző REMO modellszimulációk eredményei, valamint a CarpatClim-HU és az E-OBS referencia-adatbázisok adatai alapján.

Az egyes tartományokon készült eredmények között csak kisebb eltéréseket figyelhetünk meg (**14. ábra**). Főként tavasszal és nyáron a kisebb integrálási tartományon 10-20%-kal (helyenként 20-30%-kal) több csapadékot eredményezett a REMO, ellenben télen a hegyvidékeket leszámítva a három szimuláció között csak kis eltérések mutatkoztak. A legnagyobb különbség (országos átlagban -4-9% közötti) a DOM-1 és OLDDOM tartományok között figyelhető meg, míg a legkisebb (-2-5%) a DOM-2 és az OLDDOM között jelentkezik (**6. táblázat**). Összességében elmondhatjuk, hogy nyár kivételével az OLDDOM tartományon készített kísérlet teljesített a legjobban, nyáron viszont a kisebb tartományon eredményezett több csapadék miatt a DOM-1 választásával kaptuk a legkisebb hibákat.

A napi csapadékösszegek vizsgálata is alátámasztja a REMO modellben megjelenő csapadék felülbecslését, nevezetesen, hogy a modellezett csapadékos események (1, 10 és 20 mm-t meghaladó csapadékú napok száma) nyár kivételével minden évszakban gyakoribbak, míg nyáron ritkábbak a CarpatClim-HU adatokhoz képest (**15. ábra és 7. táblázat**).

A leghosszabb száraz időszakok (CDD) átlagos éves hossza a modelleredményekben az ország középső részén legfeljebb 10%-kal hosszabb, míg a keleti és nyugati területeken 10-30%-kal rövidebb a referenciához képest (**16. ábra**). Az egyes évszakok közül kiemelkedik a nyár, amikor az ország nagyobb tavai, hegységei, a Duna, illetve a délnyugati országrész felett (ahol a modell egyébként az évszakos csapadékösszeget is alábecsüli) akár 60%-kal is meghaladja a modellezett CDD érték a CarpatClim-HU értékeket. Míg az évszakos csapadékösszegek modellezésében a REMO tavasszal teljesített a legjobban, a száraz időszakok hosszát ebben az évszakban írta le a legnagyobb hibával (országos átlagban -17-(-23) % eltérés).

5. táblázat: Éves és évszakos relatív csapadékkülönbségek (%) a különböző méretű tartományokon az EOBS adataival összevetve.

	REMO 0.44°	DOM-1	DOM-2	OLDDOM
Éves	31	29	27	25
Tavasz	33	34	28	24
Nyár	-4	-1	-2	-3
Ősz	33	42	39	40
Tél	90	57	56	54

A 10 mm-t meghaladó csapadékösszegű napok éves számának (RR10) vizsgálata során láthatjuk, hogy az ország keleti részén a modellezett értékek 10-30%-kal felülmúlták a megfigyelt átlagokat, míg az ország nyugati felén körülbelül ugyanilyen mértékben alábecsülték azokat. Ez a minta tavasszal, ősszel és télen is megfigyelhető az eredményekben, télen azonban az alábecsülés csak egy nagyon kis délkeleti területre korlátozódik és az Alföld felett a felülbecslés mértéke meghaladja a 100%-ot. Nyáron az Északi-középhegység kivételével hazánk nagy területén több, mint 30%-kal kevesebb 10 mm feletti csapadékú napokat szimulál a REMO.

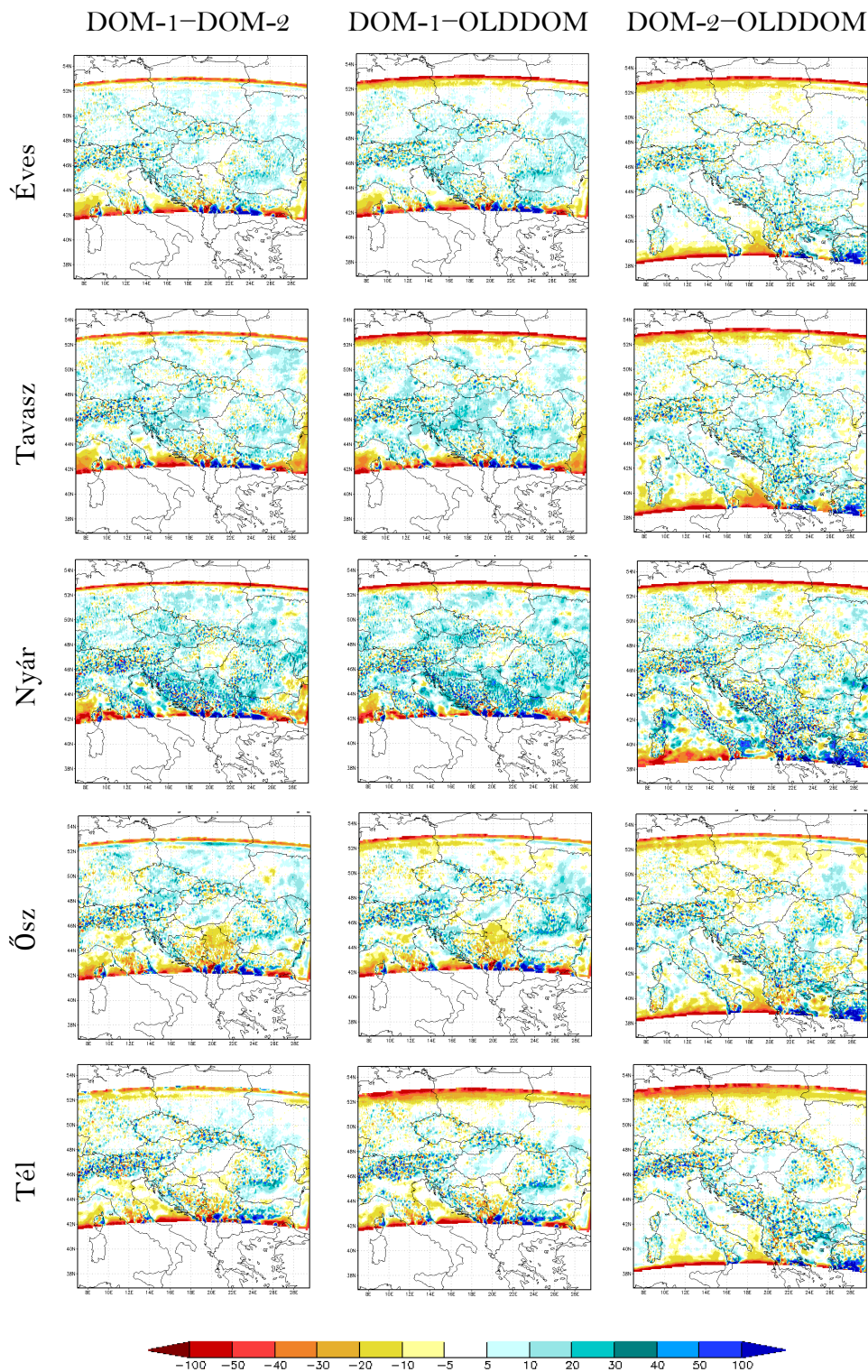
A nagyobb csapadékok (20 mm feletti) előfordulását a modell nagyobb relatív hibával írja le: ősszel és télen a felülbecslés mértéke 74-114%, azonban meg kell jegyezni, hogy a nagy relatív eltérés az ilyen események ritka előfordulása miatt jelentkezik (a CarpatClim-HU-ban az őszi és téli országos átlag 1 nap alatti) és a napokban kifejezett hiba legfeljebb fél nap.

6. táblázat: A különböző REMO modellszimulációk éves és évszakos országos átlagos csapadékösszegeinek relatív hibái (%) a CarpatClim-HU adatokhoz viszonyítva az 1971–1980 időszakon.

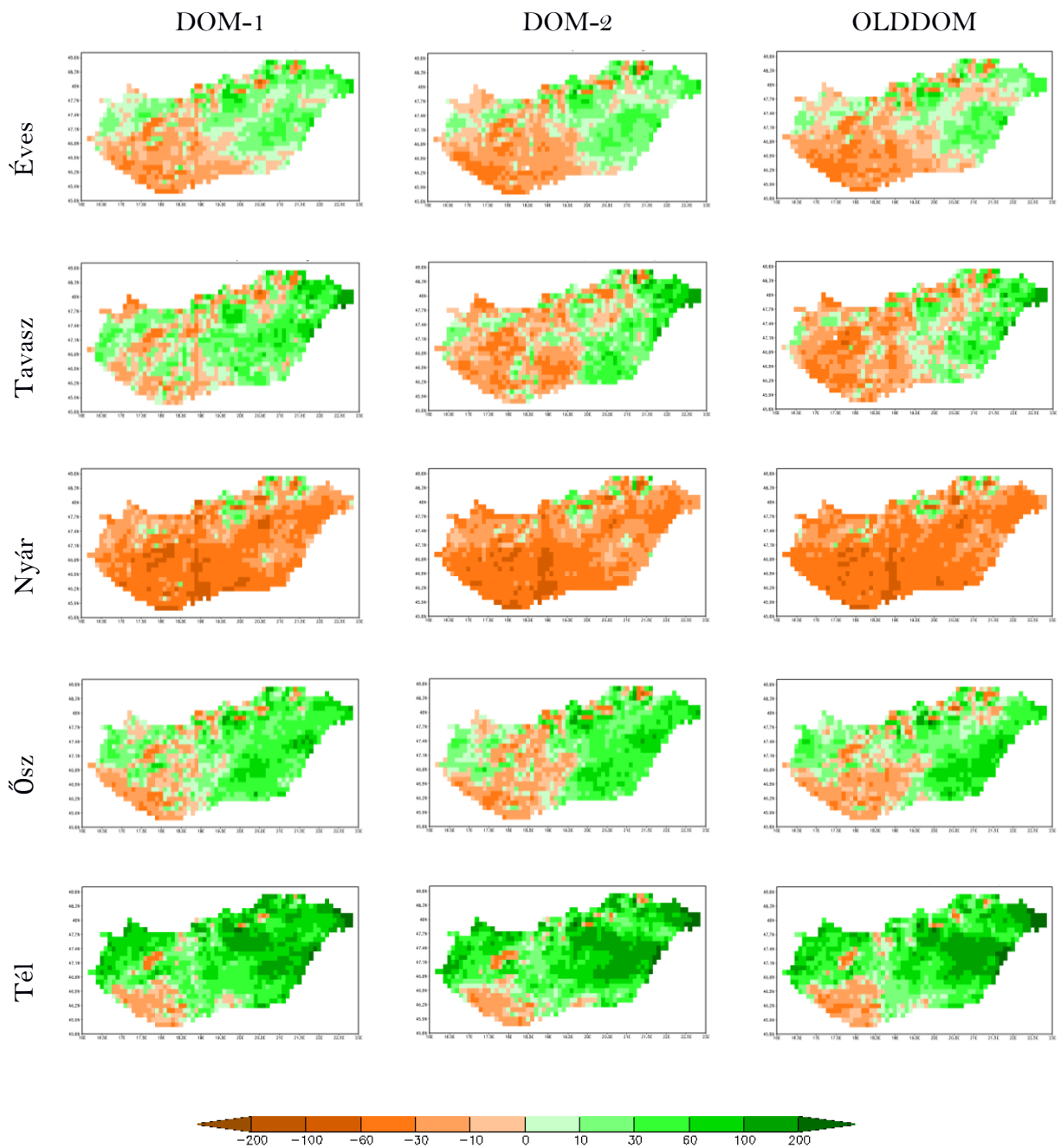
	DOM-1	DOM-2	OLDDOM
Éves	8	6	4
Tavasz	13	8	4
Nyár	-18	-19	-20
Ősz	21	18	19
Tél	31	30	27

A különböző tartományokon elvégzett kísérletek a napi csapadékösszegek leírásában nagyobb eltéréseket mutatnak (esetenként meghaladják a 10%-ot is), ugyanakkor a különböző indexeket tekintve a különböző évszakokban más és más kísérlet bizonyul a legjobbnak. Az országos átlagos hibák vizsgálata alapján megállapíthatjuk, hogy leggyakrabban a legnagyobb (OLDDOM) tartományon elvégzett szimuláció eredményezte a legkisebb hibákat.

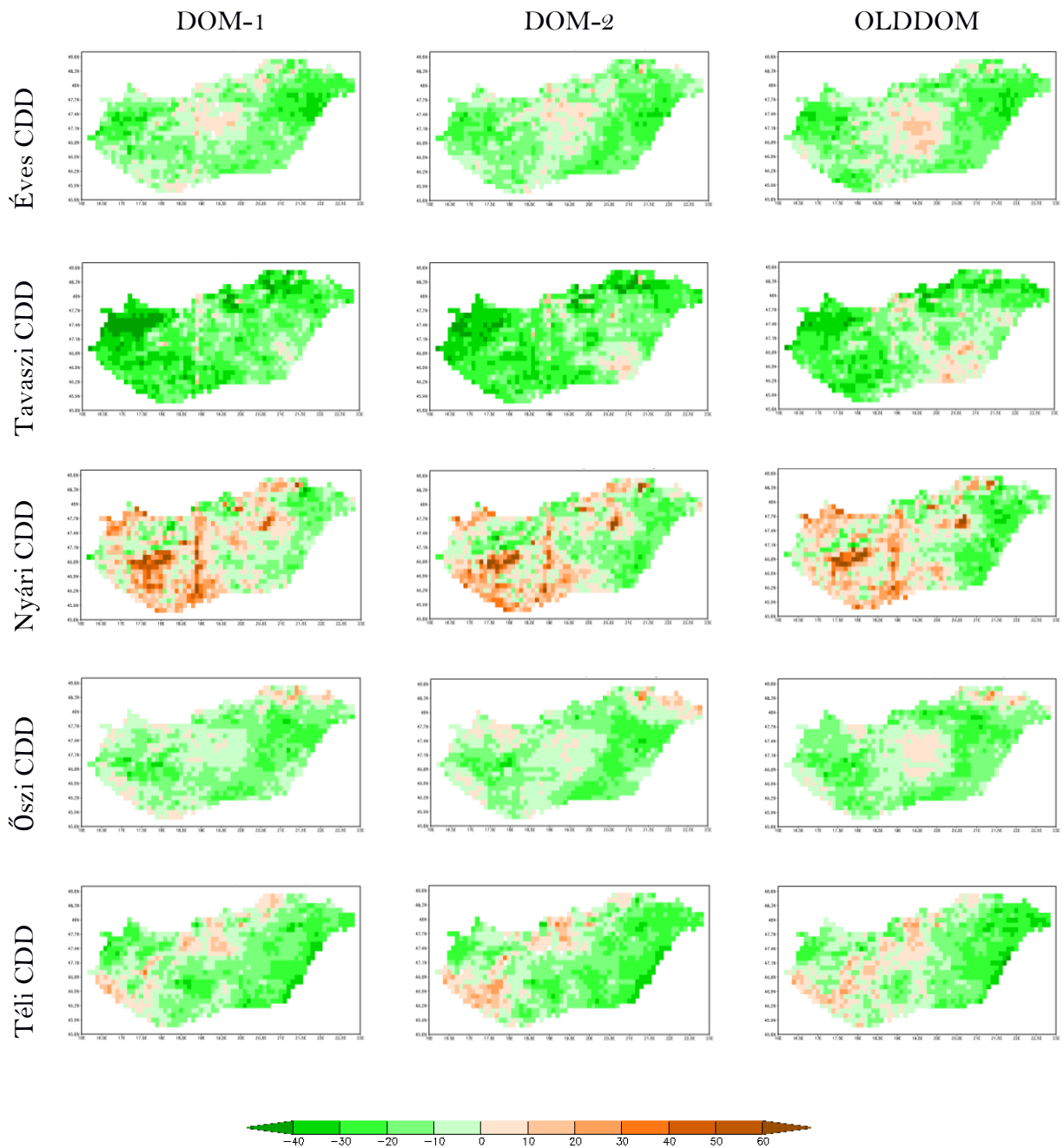
Ez a következtetés nagymértékben megalapozta azt a döntésünket, hogy a további hosszútávú kísérleteket az OLDDOM tartományon végezzük el.



14. ábra: Az éves és évszakos csapadékösszeg relatív különbsége (%) a különböző tartományokon készített kísérletek eredményei között. Időszak: 1971–1980.



15. ábra: A 10 mm-t meghaladó csapadékú napok (RR10) éves és évszakos összegeinek relatív különbsége (%) a REMO modellszimulációk eredményei és a CarpatClim-HU adatok között 1971–1980-ban.



16. ábra: A száraz időszakok maximális éves év évszakos hosszának (CDD) relatív különbsége (%) a REMO modellszimulációk eredményei és a CarpatClim-HU adatok között 1971–1980-ban.

7. táblázat: Az adott napi csapadékmennyiséggel járó események országos éves és évszakos átlagainak relatív eltérése (%) a REMO modellszimulációinak eredményei, valamint a CarpatClim-HU adatok között az 1971–1980 időszakban. Az adott indexeket adott évszakban legkisebb hibával leíró modellkísérletet színeztük (sárga: DOM-1, kék: DOM-2, zöld: OLDDOM) és a táblázat végén összegeztük, hogy adott index esetén hány darab évszakban bizonyult győztesnek az adott tartomány. Ezenfelül ha az eltérés legalább az egyik tartománytól relatív értelemben meghaladta a 10%-ot, azt vastagon szedettel jelöltük.

Országos átlagos relatív hibák		Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél	Legjobb	db
CDD	DOM-1	-13	-23	3	-11	-12	DOM-1	1
	DOM-2	-13	-21	0	-11	-11	DOM-2	2
	OLDDOM	-13	-17	0	-12	-10	OLDDOM	3
RR1	DOM-1	8	11	-5	9	19	DOM-1	2
	DOM-2	7	10	-7	11	17	DOM-2	1
	OLDDOM	7	8	-6	12	17	OLDDOM	2
RR10	DOM-1	5	17	-32	22	58	DOM-1	1
	DOM-2	1	6	-32	20	59	DOM-2	1
	OLDDOM	-2	1	-36	19	55	OLDDOM	3
RR20	DOM-1	14	49	-32	114	103	DOM-1	0
	DOM-2	7	40	-31	82	97	DOM-2	1
	OLDDOM	0	14	-35	80	74	OLDDOM	3

6. Összefoglalás

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál a KlimAdat projekt keretében a REMO regionális klímamodell 2015-ös verziójával végeztünk érzékenységvizsgálatot. A kísérlet célja a későbbi hosszútávú modellkísérletekhez az optimális modelltartomány megtalálása volt, amely méretét tekintve megfelel a projekt célkitűzéseinek, és amelyen a modellhibák a legkisebbek. Ennek megfelelően három egymásba eső tartományt választottunk ki, amelyek területei lefedik Közép- és Kelet-Európát, illetve magában foglalják a Duna és a Tisza folyók vízgyűjtőit. A modellt 10 km-es felbontáson futtattuk, és az elemzésekhez 3 változót választottunk ki: teljes csapadékösszeg, 2 m-es hőmérséklet és tengerszinti légnyomás. A napi csapadékmennyiségek vizsgálatára a következő csapadékindexeket tekintettük: 1, 10 és 20 mm-t meghaladó csapadékú napok száma, valamint a száraz időszakok hossza. Az eredményeket két referencia-adatbázishoz hasonlítottuk: E-OBS 19.0 és CarpatClim-HU; illetve összevetettük a határfeltétel (50 km-es felbontású REMO) eredményeivel is.

A tengerszinti légnyomás évszakos eredményeit tekintve, főleg tavasszal, az OLDDOM tartományon figyelhettük meg a legkisebb hibát, ugyanakkor az egyes tartományok országos átlagai közötti különbség nem haladta meg a 0,8 hPa-t. Azonban, az E-OBS átlagtérképeken megfigyelhető folszerű nyomás-eltérések miatt – melyek a műszerszinti mérések helytelen átszámításából fakadhatnak –, erősen megkérdőjelezhető a modellhibák érvényessége.

A hőmérsékletnél általában elmondható, hogy a REMO tél kivételével minden évszakban túl meleg, az országos évszakos átlagok legfeljebb 2 °C-kal térnek el a CarpatClim-Hu-tól. Az E-OBS a CarpatClim-Hu eredményeinél kismértékben (éves átlagban 0,1 °C-kal) melegebb, így ehhez viszonyítva a legtöbb évszakban kisebb hibákat kaptunk. A hazai nagyobb folyók és tavak felett erős alábecslés mutatkozott, mely részben e vízfelszín feletti mérések hiányából fakadhat. Tavasszal és télen, valamint éves átlagban az OLDDOM tartomány eredményei álltak legközelebb a mérésekhez, azonban ez a javulás 0,1 °C-nál nem nagyobb.

A vizsgált meteorológiai változókat összevetve, a csapadékeredmények mutatták a legnagyobb hibát. Hazánk felett a REMO nyár kivételével jellemzően felülbecsüli a csapadékot, legnagyobb mértékben télen. A CarpatClim-HU átlagosan 5-10 mm-rel csapadékosabb az E-OBS-nál, ami következtetéseinkre is kihatott: például, ha az E-OBS-ot tekintjük referenciának, akkor nyáron figyelhető meg a legkisebb hiba, míg a CarpatClim-HU esetében ez egy rendkívül száraz, akár 50%-ban felülbecsült évszak. Az egyes tartományok eredményei között csak kisebb eltérések fordultak elő, azonban összességében elmondható, hogy a nyár kivételével a csapadéokra is az OLDDOM tartományon teljesített legjobban a modell.

A napi csapadékokat jellemző indexek esetében már nagyobb (akár 10%-ot meghaladó) eltérések mutatkoztak a különböző kísérletek között. Az egyes évszakokban és indexekre más-más tartományokon figyelhettük meg a legkisebb különbséget, azonban az országos átlagokat tekintve a leggyakrabban a legnagyobb (OLDDOM) tartományon végzett számítás eredményezte a legkisebb hibákat. Mindezek alapján a további kísérleteinket az OLDDOM tartományon fogjuk elvégezni.

Irodalomjegyzék

- Buntemeyer, L., Koldunov, N., Sieck, K., Teichmann, C., Kotlarski, S., Remedino, A.: REMO 2015 MPI User Guide. Draft Version.
- Bihari Z., Lakatos M., Szentimrey T., 2017: Felszíni megfigyelésekből készített rácsponti adatbázisok az Országos Meteorológiai Szolgálatnál. *Léggör*, 62 (4) 148-151.
- Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M., Amanatidis, G., 2007: Evaluating the performance and utility of climate models: the PRUDENCE project. *Clim. Chan.*, 81, 1–6.
- Cornes, R., G. van der Schrier, E.J.M. van den Besselaar, P.D. Jones., 2018: An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123 (17) 9391–9409
- Davies, H.C., 1976: A lateral boundary formulation of large scale effects of cumulus convection. *Mon. Wea. Rev.* 113, 2108–2121.
- Fouquart, Y., Bonnel, B., 1980: Computation of solar heating of the Earth's atmosphere: A new parameterization. *Beitr. Phys. Atmos.*, 53, 35–62.
- Jacob, D., and Podzun, R., 1997: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 63, 119–129.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014: EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14 (2), 563–578.
- Jones, R.G., Murphy, J.M., Noguer, M., 1995: Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Quat. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 121, 1413–1449.
- Larsen, M.A.D., Thejll, P., Christensen, J.H., Refsgaards, J.C., Jensen, K., 2013: On the role of domain size and resolution in the simulations with the HIRHAM regional climate model. *Clim. Dyn.*, 40, 2903–2918.
- 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, United Kingdom, 160 pp.
- Majewski, D., 1991: The Europa Modell of the Deutscher Wetterdienst. ECMWF Seminar of Numerical Methods in Atmospheric Models II, ECMWF, 147–191.
- Manabe, S., 1969: Climate and the ocean circulation 1: I. The atmospheric circulation and the hydrology of earth's surface. *Mon. Weather Rev.*, 97, 739–774.
- Monin, A.S., Obukhov, A.M., 1954: Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. *Doklady Akademii Nauk SSSR Trudy Instituta Geofiziki*, 151, 163–187.
- Morcrette, J.-J., 1989: Description of the radiation scheme in the ECMWF model. In: ECMWF Technical Memorandum, 165, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Reading, UK.
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U., and Schulzweida, U., 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. Report No. 18, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany.

- Seth, A., Giorgi, F., 1998: The effects of domain choice on summer precipitation simulation and sensitivity in a regional climate model. *J. Clim.*, 11, 2698–2712.
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007: Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis). *Proceedings of the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology* (eds.: S. Szalai, Z. Bihari, T. Szentimrey, M. Lakatos) 2007, COST Office, Luxemburg, ISBN 92-898-0033-X, 17–28.
- Szentimrey, T., 2008: Development of MASH homogenization procedure for daily data. *Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases*, Budapest, Hungary, 2006, WCDMP-No. 71, WMO/TD-NO. 1493, 123–130.
- Szépszó, G., Horányi, A., 2008: Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary. *Időjárás* 112, 3–4, 203–231.
- Szépszó G., 2014: A REMO regionális éghajlati modellen alapuló klímadinamikai vizsgálatok a Kárpát-medence éghajlatának jellemzésére. *Doktori értekezés*, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, 162 pp.
- Szépszó G., Krüzselyi I., Illy T., Sábitz J., 2015: Az ALADIN-Climate regionális klímamodell integrálási tartományának megválasztására vonatkozó érzékenységvizsgálat. RCMTÉR EEA-C13-10 projekt beszámoló, 19p.
- Szépszó G., Illy T., Sábitz J., 2016: Éghajlati projekció az ALADIN modellel. RCMTÉR EEA-C13-10 projekt beszámoló, 4p.
- Tiedtke, M., 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large scale model. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1779–1800.