

# NYILATKOZAT

Név: SZABÓ ENIKŐ

ELTE Természettudományi Kar, szak: FÖLDTUDOMÁNYI

NEPTUN azonosító: JR7J0X

Szakedolgozat címe: A HAZAI REGIONÁLIS KLIMAMODELLEZÉS  
TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉSE

A **szakedolgozat** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló szellemi alkotásom, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2021. május. 13

Szabó Enikő

a hallgató aláírása

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Meteorológiai Tanszék

# **A hazai regionális klímamodellezés történeti áttekintése**

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

**Szabó Enikő**

Földtudományi alapszak,  
Meteorológia specializáció

Témavezető:

**dr. Torma Csaba Zsolt**

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2021

# Tartalom

1. Bevezetés.....	3
2. Az éghajlati rendszer modellezése.....	4
2.1 Globális modellezés.....	4
2.2 Regionális klímamodellezés.....	7
2.3 Nemzetközi és hazai regionális klímamodell projektek.....	8
3. A hazai alkalmazású regionális klímamodellek rövid bemutatása.....	10
3.1 Az ALADIN regionális klímamodell.....	10
3.2 A RegCM regionális klímamodell.....	11
3.3 A PRECIS regionális klímamodell.....	13
3.4 A REMO regionális klímamodell.....	15
3.5 WRF regionális klímamodell.....	16
4. Eredmények (validáció, projekció).....	17
4.1 ALADIN.....	17
4.1.1 Validáció.....	17
4.1.2 Projekciók.....	18
4.2 RegCM.....	21
4.2.1 Validáció.....	21
4.2.2 Projekciók.....	22
4.3 PRECIS.....	26
4.3.1 Validáció.....	26
4.3.2 Projekció.....	26
4.4 REMO.....	28
4.4.1 Validáció.....	28
4.4.2 Projekciók.....	29
4.5 Összegzés.....	33
5. Összefoglalás.....	38
Köszönetnyilvánítás.....	39
Irodalomjegyzék.....	40

## 1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben számos üvegházhatású gáz globális légköri koncentrációja emelkedett, ebből fakadóan pedig a felszíni hőmérséklet Magyarország területén is emelkedést mutat [1 – met.hu]. Az éghajlatváltozás számos következménnyel jár, az emelkedő hőmérséklet és a változó csapadékviszonyok, a természetes ökoszisztémáktól és az emberi épített környezettől is alkalmazkodást kívánnak.

Az éghajlatváltozás megismeréséhez elengedhetetlen annak modellezése, ez alapvetően globális modellek segítségével zajlik. A klímamodellezés az első atmoszférikus modellek óta jelentős fejlődésen ment keresztül, a jelenlegi globális modellek eredményeivel az egész Földre készíthetünk éghajlati becsléseket, ezek azonban a durva rácsfelbontás következtében nem alkalmasak a regionális változások vizsgálatához. Egy kisebb térség éghajlati elemzéséhez a globális modelleredmények leskálázására van szükség. A dinamikai leskálázáson alapuló úgynevezett beágyazott regionális modellel lehetőség nyílik, egy adott térség néhány kilométeres horizontális felbontáson való modellezésére, ami által realiztikusabban jelennek meg a regionális éghajlatalakító tényezők.

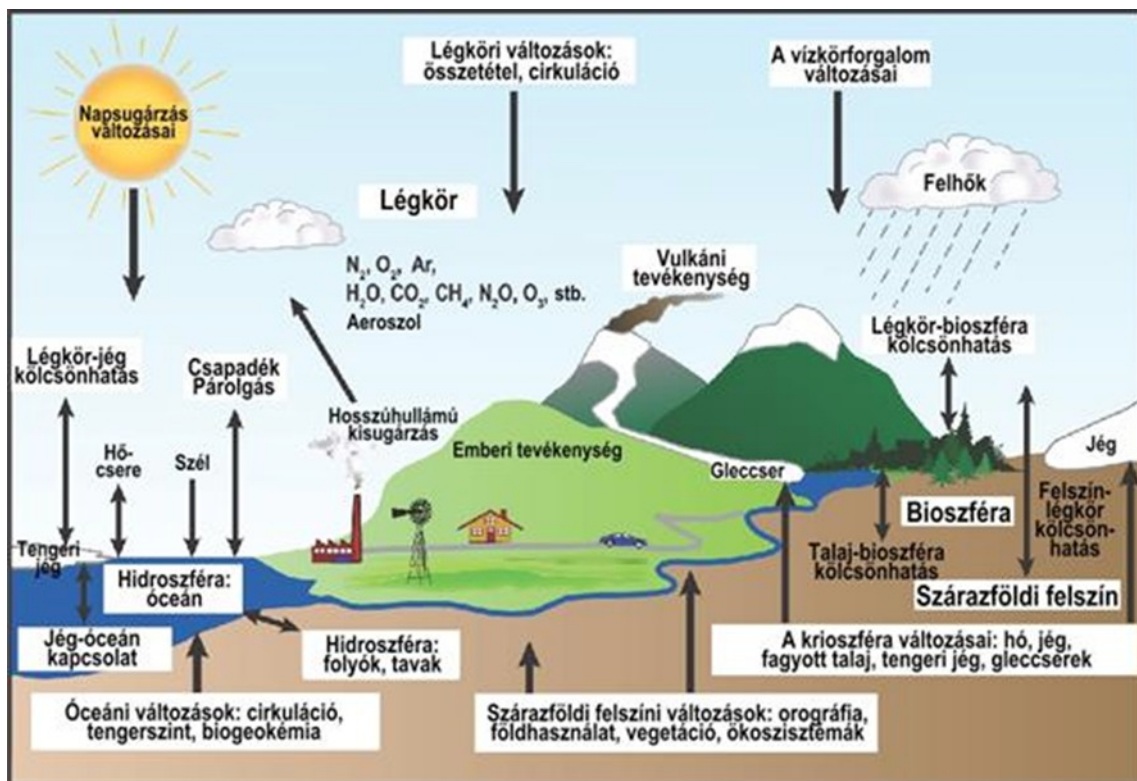
Az éghajlatmodellezésben számos bizonytalanság rejlik. Az egyik a természetes változékonyság, hiszen az éghajlati rendszer külső tényezők nélkül is változásban van, előfordulhatnak az átlagostól jelentősen eltérő, csapadékosabb vagy szárazabb évek. A modellek eltérő módszerekkel írják le az éghajlatalakító fizikai folyamatokat, ez további bizonytalanságokhoz vezet. A jövőbeni antropogén tevékenységet ténylegesen nem ismerhetjük, ezért annak hatását az éghajlatmodellezésben különböző kibocsátási forgatókönyvek segítségével vesszük figyelembe. Egy modell eredményei alapján nem tehetünk egyértelmű kijelentéseket az éghajlatváltozásra vonatkozóan, több modell, eltérő forgatókönyvekkel készült eredményeinek összevetéséből azonban kirajzolódnak a regionális modellezésben rejlő bizonytalanságok, lehetséges jövőképek.

Magyarországon négy regionális éghajlati modell futtatásával készültek hosszútávú éghajlati projekciók, amelyek alapján lehetőségünk van becslést adni Magyarország területén a XXI. században várható éghajlatváltozásra és a projekciókban rejlő bizonytalanság mértékére.

A 2. fejezetben ismertetem az éghajlati rendszer modellezésének rövid történetét. Majd a 3. fejezetben rátérek a hazai alkalmazású regionális éghajlati modellek rövid ismertetésére. A 4. fejezetben összefoglalom a velük végzett kísérletek, validációs és projekciós eredményeit. Végül a dolgozatot az 5. fejezetben foglalom össze.

## 2. Az éghajlati rendszer modellezése

Az éghajlat legáltalánosabb értelmezése szerint a légkör és vele kölcsönhatásban álló geoszféra (hidroszféra, krioszféra, kontinentális felszín, bioszféra) hosszú távon megfigyelt statisztikai értékeit értjük. Míg az időjárás jellemzésekor a légkör pillanatnyi vagy egy rövid időszakban megfigyelt állapotátörőiről beszélünk, addig az éghajlatot a teljes éghajlati rendszer hosszú távú állapotával jellemezzük. A WMO (Meteorológiai Világszervezet) ajánlása alapján általában 30 éves időszakokra képzett átlagok alapján vizsgáljuk az éghajlatot és annak változását. Ahogy az első ábrán látható, az éghajlati rendszer elemei bonyolult visszacsatolási folyamatokkal kapcsolódnak egymáshoz (1. ábra). Az éghajlat változásának modellezéséhez tehát egyenletrendszerbe kell foglalnunk az éghajlati rendszer komponenseit és legfontosabb kölcsönhatásait. (Götz, 2004)



1. ábra Az összetett éghajlati rendszer elemei (Forrás: IPCC, 2007a)

### 2.1 Globális modellezés

Az éghajlat modellezése a hidro-termodinamikai egyenleteken alapszik, ezek segítségével lehet a valósághoz hűen leírni az éghajlatot alakító fizikai folyamatokat. Ezeknek az egyenleteknek azonban nem létezik analitikus megoldása ezért a gyakorlatban numerikus módszereket használnak a közelítő megoldások eléréséhez, az éghajlat modellezésére. A

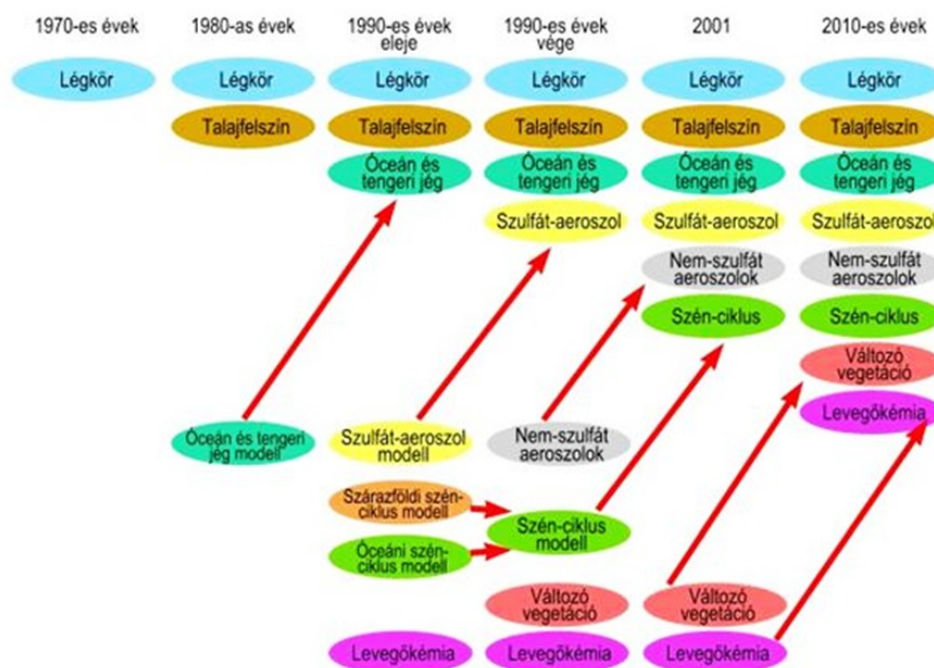
numerikus modellezés lehetőségét elsőként Lewis Fry Richardson dolgozta ki 1922-ben (*Richardson, 1922*). Az időjárás számítógépes előrejelzése az 1950-es években valósult meg, Neumann János ötlete alapján, Norman A. Phillips vezette kutatócsoport által (*Phillips, 1956*). Ez a módszer rengeteg számítási kapacitást igényel, így a számítástechnika fejlődésével az ágazat hatékonysága rohamos fejlődésen ment keresztül.

Az éghajlati modellek alapvetően két osztályba sorolhatók, attól függően, hogy az éghajlati rendszert milyen közelítéssel, eljárással kísérik meg leírni. Míg a termodinamikai modellek az éghajlati rendszer termikus jellemzőit modellezik, ilyenek az energiaegyensúlyi és sugárzási-konvektív modellek, addig a dinamikai modellekhez tartozó általános cirkulációs modellek komplex vertikális áramlásokat is figyelembe vesznek, az áramlási rendszereket háromdimenziós térben részletesen leírják. A dinamikai modellek tehát mind a termikus, mind pedig az áramlási folyamatok leírására alkalmasnak tekinthetők.

Kezdetben az éghajlati vonatkozású kutatásokhoz csak a légkör változásait vizsgálták, melynek során az atmoszférikus modellek kihasználták, hogy az éghajlati időskálán a légkör változásait jól lehet közelíteni termodinamikai modellekkel. Az elsők között ilyen vonatkozású számításokról *Sellers (1969)* számolt be. A modellel a Föld termikus energiaegyenlegét írta fel, azzal a közelítéssel, hogy a felszíni hőmérséklet csak a bejövő napsugárzás, a planetáris albedó, a légköri hosszuhullámú sugárzás áteresztő képessége, a látens hő és a felszín és az óceán hőtároló képességének a függvénye. Ezzel az egyszerű közelítéssel többek között arra az eredményre jutott, hogy a légkörben növekvő szén-dioxid koncentráció lassan növekvő átlaghőmérsékletet eredményezhet. Ezek nulladimenziós (nincs térbeli felbontás), stacionárius, energiaegyensúlyi modellek voltak, amelyek a rövidhullámú sugárzásbevitel és a felszín-légkör hosszuhullámú kisugárzását vizsgálták. Ezeknél fejlettebbnek tekinthetők az úgynevezett egydimenziós modellek, amelyekben földrajzi szélességek szerinti övezetességet vezettek be. 1979-ben Thompson és Schneider egy övezetes, kétrétegű modellt fejlesztettek ki, amiben már a szezonális változásokat is szimulálták. (*Thompson és Schneider, 1979*).

Ha a modell nem csak a légkört veszi figyelembe, hanem beépítettek más éghajlati alrendszert is, amit a légkörrel folytatott kapcsolati rendszer jellemez, akkor kapcsolt éghajlati modellnek nevezzük. Az első kapcsolt energiaegyensúlyi éghajlati modell 1980-ban készült el, ebben a légkör és az óceán autonóm termodinamikai rendszerként szerepelt (*Hoffer et al., 1980*). A termodinamikai modellek másik változata a sugárzási-konvektív éghajlatmodellek, amelyekben az éghajlati paramétereket vertikális felbontásban írják le. Ezzel a módszerrel pontosabb képet kaphatunk az éghajlatváltozással bekövetkező, hőmérsékletváltozás

magasság szerinti alakulására. A dinamikai modellek hasonló fejlődésen mentek keresztül. Az első általános cirkulációs modellnek az 1965-ban elkészült S. Manabe és J. Smagorinsky által fejlesztett modell tekinthető, aminek nagy előnye volt, hogy a fő energiaszállítási mechanizmusokat jól szimulálta (Manabe et al., 1965). A modell első változata 9 vertikális szintet tartalmazott, valamint ez volt az első modell, amibe beépítették a légköri vízgőzforgalom mechanizmusát. Az általános cirkulációs modellek pontosságának növelésében nagy előrelépést jelentett a spektrális módszer fejlődése. A véges különbséges módszerekkel ellentétben ez lehetőséget ad a meteorológiai változók könnyebb kezelésére. A kapcsolt általános cirkulációs modellek fejlesztése során az alapot a már 1968-ban K. Bryan által létrehozott 5 vertikális szintes és kb. 5 fokos horizontális felbontású óceán modell szolgáltatta. A későbbiekben 9 majd 20 szintűre és horizontálisan fél fokosra finomított modell összekapcsolva a légköri általános cirkulációs modellel, az éghajlati rendszer olyan leírásához vezetett, ahol az óceán cirkulációja, nagysebességű lokalizált áramlások és a mezoskálájú örvények is valósághűen jelentek meg (Semtner és Chervin, 1988). A folyamatosan fejlődő és egyre komplexebbé váló kapcsolt általános cirkulációs modellekben a kontinentális felszín után, (Kasahara és Washington, 1971) a krioszféra, (Parkinson és Washington, 1979) és a bioszféra komplex bekapcsolása (Dickinson, et al., 1986) is megvalósult (Faragó et al., 1991). A regionális modellek fejlődését jól szemlélteti a nemzetközi Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) harmadik helyzetértékelő jelentésében megjelenő folyamatábra (2. ábra).



2. ábra: A globális modellek fejlődése (Forrás: IPCC, 2001)

Napjainkra a nagy klímakutató intézetek által futtatott modellek fejlettsége elérte azt a szintet, hogy az éghajlati rendszer elemeit és a közöttük lévő kölcsönhatásokat megbízható pontossággal tudják szimulálni, a szuperszámítógépeknek köszönhetően pedig a felbontásuk elérte az 1°-os finomságot (Roberts., et al., 2019), vagy akár a regionális klímamodellekre jellemző rácstávolságot is (Demory et al., 2020).

## 2.2 Regionális klímamodellezés

A globális klímamodellek jellemző hátránya, a növekvő térbeli felbontásuk ellenére, a regionális skálájú változások nem megfelelően jeleníthetők meg, aminek eredményeként a rácspontokon belül jelentős eltérések lehetnek a modelleredmények és a megfigyelések között. Ha a globális modellek eredményeitől részletesebb területi eloszlásra vagyunk kíváncsiak, akkor különböző leskálázási módszereket alkalmazhatunk. Alapvetően kétféle skálázási módszer áll a rendelkezésünkre, az úgynevezett dinamikus és a statisztikus leskálázás. A dinamikus leskálázás esetében egy, a globális modelltől sokkal finomabb felbontású (jellemzően egy nagyságrenddel finomabb felbontású), legtöbbször légköri klímamodelt alkalmaznak, egy kisebb területre vetítve, ahol a szükséges peremfeltételeket egy kapcsolt légkör-óceán cirkulációs modell szolgáltatja. Ez a módszer sok számítási igénnyel bír, de lehetővé teszi a kisebb skálájú folyamatok nyomon követését. Azokat a folyamatokat, melyeknek egzakt leírása túl bonyolult vagy a rácstávolság méretétől kisebb skálán zajlanak, parametrizációs eljárások révén építik be a modellekbe, akár csak az időjárásjelző modellek esetében. A parametrizálás segítségével a kisebb skálájú folyamatok hatással vannak a nagyskálájú folyamatok egészére, pontosabban leírva ezzel a légkör működését. A statisztikus leskálázás során, múltbéli adatok alapján a globális és regionális klíma között felállított statisztikai kapcsolatot alkalmazzák, a globális modell előrejelzéseiből kapott adatokra. A módszer nagy hátránya, hogy sok és pontos mérési adat szükséges a múltból, valamint azzal a feltételezéssel él, hogy a statisztikai kapcsolatok állandóak, azaz érvényben maradnak a klíma változásával is. Ez a módszer több évtizedes múltat tekint vissza, már az 1980-as években születtek tanulmányok, amelyek a globális és regionális klíma kapcsolatát vizsgálták statisztikus módszerekkel (Webb és Wigley, 1985). A statisztikus leskálázás igen elterjedt volt a dinamikus leskálázáson alapuló eljárás elterjedése előtt. Az egyszerű instrumentális változók módszerétől, ahol egy rövid globálisan melegedő időszakban, egy mérőpont és a félgömbi átlaghőmérséklet között keressük a regressziós kapcsolatot, a cirkulációs mezőkből kiinduló leskálázás módszeréig, számos statisztikus



eljárást dolgoztak ki. A legnagyobb előnyük a dinamikus leskálázással szemben a kisebb számítási igény, ami azonban a számítástechnika fejlődésével egyre inkább háttérbe szorul. A dinamikai alapú leskálázás módszerei közül alapvetően két eljárást különítünk el, a változó rácsfelbontású és a beágyazott regionális éghajlati modelleket. A változó rácsfelbontású modellek az egész Földet lefedik, de a rácshálózat finomítása csak a kutatott területre történik, a távolabbi területeken fokozatosan növekszik a rácstávolság. Ilyen modell a Meteo France által használt ARPEGE-IFS (Déqué et al., 1994), amelynek a Franciaország fölé eső rácstávolsága 7,5 km, a legtávolabbi területeken pedig már 37 km. A regionális klímamodellek csak egy adott területre korlátozódnak finom, akár 10 km-es horizontális felbontásnál is részletesebb rácshálózattal. A korlátos tartományú modelleket kezdetben az időjárás előrejelzésekhez használták, majd a 1991-ben elkészült az első, hosszabbtávú, klímamodellezési célú regionális modell (*Giorgi*, 1991). Ez még csak havi futtatásra volt alkalmas, de pár éven belül az éves (*Giorgi et al.*, 1993) és évtizedes időszakokat felölelő regionális éghajlati szimulációk is napvilágot láttak (*McGregor et al.*, 1995). A korlátosságukból adódik a peremfeltételek szükségessége, mely adatokat re-analízis mezőkből vagy globális, illetve akár regionális modellek korábbi futtatásából építenek be. A határfelületeken az értékek torzulhatnak a különböző rácsfelbontás miatt, ezért a regionális modell felbontása nem lehet egy nagyságrenddel nagyobb, mivel az hibákat okozhat a méretskálák közti folyamatok leírásában. A modellek között gyakran egyirányú beágyazást alkalmaznak, azaz csak a globális modell durvább térbeli felbontású) hat a regionálisra (finomabb térbeli felbontásúra), ezt nevezzük one-way nesting-nek. Habár pontosabb képet adhatna, ha a modellezés során a regionális folyamatok hatásai megjelennének a globális modellben, számítási kapacitás szempontjából jóval igényesebb módszer (two-way nesting, vagy interaktív; *Harris és Durran*, 2010), ezért ritkábban alkalmazzák. A regionális modellekben (a globális modellekhez hasonlóan) továbbra is szükség van parametrizációra, a kisebb skálájú folyamatok leírásához, amik a lokális éghajlatot befolyásolják, mint például a planetáris határréteg dinamikai folyamatai. A nagyobb számítási kapacitás lehetővé teszi az egyre hosszabb időtávra futtatott és finomabb térbeli felbontású regionális modellek alkalmazását, amelyek a globális szimulációktól részletesebb képet adnak a helyi hatásoktól befolyásolt regionális klímáról.

### 2.3 Nemzetközi és hazai regionális klímamodell projektek

A regionális klímakutatás célszerű módja, ha különböző regionális modellszimulációk eredményeit vetjük össze (Horányi *et al.*, 2011). Magyarország térségére az első ilyen elemzés a PRUDENCE projekt keretében valósult meg, 2001 és 2004 között, a 2071-2100-ig tartó időszakra futtatva. Ekkor 21 intézet közreműködésével, 50 km-es felbontású regionális modelleket alkalmaztak és a várható antropogén kibocsátás szempontjából két szélsőséges A2, B2 scenáriókat. A projekt célja volt több regionális modelleredmény alapján, az évszázad végén várható éghajlati viszonyok változásának megismerése, különös tekintettel a szélsőséges időjárási események változására (Christensen és Christensen, 2007). A következő jelentős együttműködés az ENSEMBLES projekt volt, ami 2004-2009 között zajlott, és az 1951-2100-ig tartó célidőszakra vonatkozott. A program keretében regionális modellszimulációkat 25 km-es felbontáson, Európa térségére futtatták. Az éghajlati szimuláció során a SRES A1B kibocsátási scenáriót alkalmazták. A program során 25 különböző modelleredmény alapján vizsgálták az éghajlati rendszer modellezésében rejlő bizonytalanságokat (van der Linden *et al.*, 2009). A 2009-ben életre hívott CORDEX program (Coordinated Regional climate Downscaling Experiment; Giorgi *et al.*, 2009), az egész Földre vonatkozó regionális leskálázási projekt, Európára vonatkozó ágán belül 50 és 12 km-es felbontású regionális klímamodellekkel hajtottak végre szimulációkat, az RCP kibocsátási forgatókönyvek alapján (Representative Concentration Pathways, Moss *et al.*, 2010). Ezek a forgatókönyvek kijelölik az évszázad során lehetséges üvegházhatású gázok koncentrációjának változását és az ezzel járó sugárzási kényszer növekedést. A négy scenáriót aszerint nevezték el, hogy mekkora sugárzási kényszer növekedést írnak le 2100-ra az iparosodás előtti időszakhoz képest, így a legpesszimistább RCP8.5 scenárió 8,5 W/m<sup>2</sup> sugárzási kényszer növekedést feltételez. A magyar kutatók a rendelkezésre álló ensembles rendszer eredményeit mérték fel és osztályozták (Illy *et al.*, 2017), valamint RegCM modelleredményekkel járultak hozzá a programhoz (Pongrácz *et al.*, 2016) Az adaptálás után a hazai kutatók is bekapcsolódtak nemzetközi együttműködésekbe, mint a 2006-2009 közötti időszakban futó CECILIA (Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment, Halenka, 2007). A program célja a klímaváltozás hatásainak vizsgálata volt a Kelet-Közép-Európai térségben, regionális modell szimulációk révén. Az ALADIN-Climate4.3 eredményeit az ORIENTGATE uniós projekt keretein belül is felhasználták, amiben hőhullámok előfordulásával kapcsolatos vizsgálatokat végeztek (ICI interaktív Zrt, 2013 - klímastratégiai dokumentum). A RegCM3 regionális klímamodell

adaptálása után, a modellt szintén felhasználták a CECILIA Európai Unió projekt keretein belül. Hasonló nemzetközi együttműködés volt a CLAVIER (Climate Change and Variability: Impact on Central and Eastern Europe) program, amihez többek között az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által futtatott REMO eredményeket használták fel (*Jacob et al.*, 2008). 2013-ban létrejött a NATÉR (Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer), melynek célja egy olyan adatbázis létrehozása, amely a klímaváltozás hatására, Magyarországon bekövetkező változásokat tartalmazza, ezzel segítve az alkalmazkodást. A programon belül az ALADIN és RegCM modell eredményeinek felhasználásával számos hatásvizsgálat zajlott, például a klímaváltozás természetes élőhelyekre vagy az ivóvízbázisokra gyakorolt hatásáról (*Somodi et al.*, 2016, *Rotárné et al.*, 2015). Az RCMTÉR programon belül a rendszerbe a már az újabb RegCM4 és ALADIN5 generációval és RCP scenáriók alapján készült futtatásokból származó modell adatokat is beépítettek (*Szépszó et al.*, 2016). A jelenleg is futó KlimAdat projekt (2016-2021) célja egy komplex éghajlati adatbázis létrehozása, melyhez az ALADIN és REMO modellek 10 km-es felbontáson, különböző kibocsátási scenáriók esetére vonatkozó eredményei szolgáltatnak adatot (*Zsebeházi*, 2018).

### **3. A hazai alkalmazású regionális klímamodellek rövid bemutatása**

Magyarországon a regionális klímamodellezés a dinamikus leskálázási módszerrel a 2000-es évek elején vette kezdetét. Az első átfogó projekt egy Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program keretében zajló pályázat során valósult meg, az OMSZ, az ELTE Meteorológiai Tanszéke, a Pécsi Tudományegyetem és az Env-in-Cent Kft összefogásával. A program 2005. január 1. és 2007. december 31. között zajlott, ezalatt négy regionális klímamodell adaptáció készült el, az ALADIN-Climate és a REMO az OMSZ fejlesztésében, a RegCM és PRECIS modellek pedig az ELTE Meteorológiai Tanszékén.

#### **3.1 Az ALADIN regionális klímamodell**

Az ALADIN-Climate modell, dinamikai alapja egy nemzetközi együttműködésben kifejlesztett ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International) előrejelző modelltől származik (*Déqué et al.*, 1994). Ez egy korlátos tartományú modell, így szükség van a tartományon kívül eső folyamatok leírására, ehhez a francia ARPEGE-Climate

globális légköri általános cirkulációs modell szolgáltatja a kiindulási adatokat. Az OMSZ-nál a modell 4.5. verzióját adaptálták, majd 2015 óta az 5.2. verziót használják.

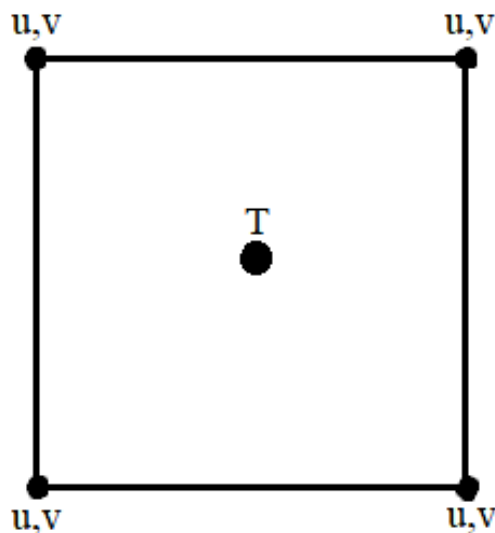
Horizontálisan a modell egyenletes térközökre bontott, a vertikális koordináarendszere pedig 31 szintes felszínkövető nyomási hibrid, azaz az alacsonyabb szinteken követi a felszín változásait, a magasabb rácsszinteken pedig az izobárvonalakat. A modell dinamikája nem lineáris hidrosztatikus egyenleteken alapszik, mivel 10 és 25 km-es térskálán is a vertikális sebességek elhanyagolhatók a horizontális sebességkomponensekhez képest. Az időintegráció szemi-implicit séma alapján történik a gyorsan terjedő hullámok esetében és szemi-Lagrange séma alapján az advektációs rendszerek esetén, ennek köszönhetően nagyobb időlépcsők is alkalmazhatók. A korlátos tartományú modellek a nagy skálájú meteorológiai folyamatokat határfeltételek alapján veszik figyelembe, ezért fontos a határfeltételek megfelelő megválasztása. A kevés határfeltétel megadásakor a feladat nem lesz egyértelműen megoldható, a túlhatározottság esetében viszont a hullámok visszaverődhetnek a tartomány peremén, zajokat okozva. Ezt kiküszöbölve az ALADIN modellben Davies-sémát (*Davies, 1976*) alkalmaznak, azaz egy relaxációs zónát határoznak meg az előrejelzési tartomány körül, ahol összesítik a globális modelltől származó határfeltételeket a regionális modell adataival. A fizikai parametrizációk az ARPEGE globális modell, regionális adaptációjából származnak. A sugárzást a Fouquart és Morcrette (*Morcrette, 1989*) séma alapján számítja, a talajviszonyokhoz az ISBA-t (Interaction of Soil Biosphere Atmosphere, *Noilhan és Planton, 1989*) alkalmazza, ami négy talajhőmérsékleti, két talajnedvességi réteget tartalmaz. A konvekciót Bougeault (*Bougeault, 1985*) módszerével írja le, a felhözethez Ricard és Roger (*Ricard és Roger, 1993*), a nagy skálájú csapadékhoz pedig a Smith (1990) sémát alkalmazza. (*Csima és Horányi, 2008*)

### **3.2 A RegCM regionális klímamodell**

A RegCM (Regional Climate Model) regionális klímamodell első generációját az amerikai Nemzeti Légkörkutató Központban (National Center of Atmospheric Research, NCAR) fejlesztették ki. A modell első verziója 1989-ben készült el (*Dickinson et al., 1989*), azóta négy nagy fejlesztési szakaszon esett át, a legújabb verzió (RegCM4.7) a következő internetes helyen keresztül érhető el: <https://github.com/ictp-esp/RegCM>. Jelenleg a trieszti Nemzetközi Elméleti Fizikai Központ (The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics) biztosítja a modell hozzáférhetőségét a világ bármely pontjáról. A legfrissebb verzió könnyen használható és adaptálható a Föld bármelyik pontjára. Magyarországon elsőként a

RegCM3 verziót, az ELTE Meteorológiai Tanszékén adaptálták (Torma, et al., 2008), majd a későbbiekben a RegCM4 generációval is végeztek kutatásokat (Kalmár et al., 2018, Pieczka et al., 2019, Kalmár et al., 2020).

A RegCM dinamikai magját a Pennsylvániai Állami Egyetem által fejlesztett, összenyomható, hidrosztatikus rácsponti mezoskálájú modell 4. verziója (MM4) adta. A modell vertikális koordinátarendszere az ALADIN-hoz hasonlóan felszínkövető, az alacsonyabb nyomási felületeket leíró rácsszintek az izobár felületekkel párhuzamosan futóknak tekinthetők, horizontálisan pedig a magyarországi felhasználásra, a közepes szélességeken használatos Lambert-féle kúpvetületet alkalmazták, Arakawa-Lamb B elosztású rácshálózattal. Ahogy a 3. ábrán látszik ezen a rácshálózaton a skalármennyiségek, mint a hőmérséklet és a nyomás a rácsközéppontokban, míg a vektormennyiségek például a szélkomponensek a rácssarokpontokra vannak definiálva.



3. ábra: Az Arakawa-B rácshálózati felülnézetből.

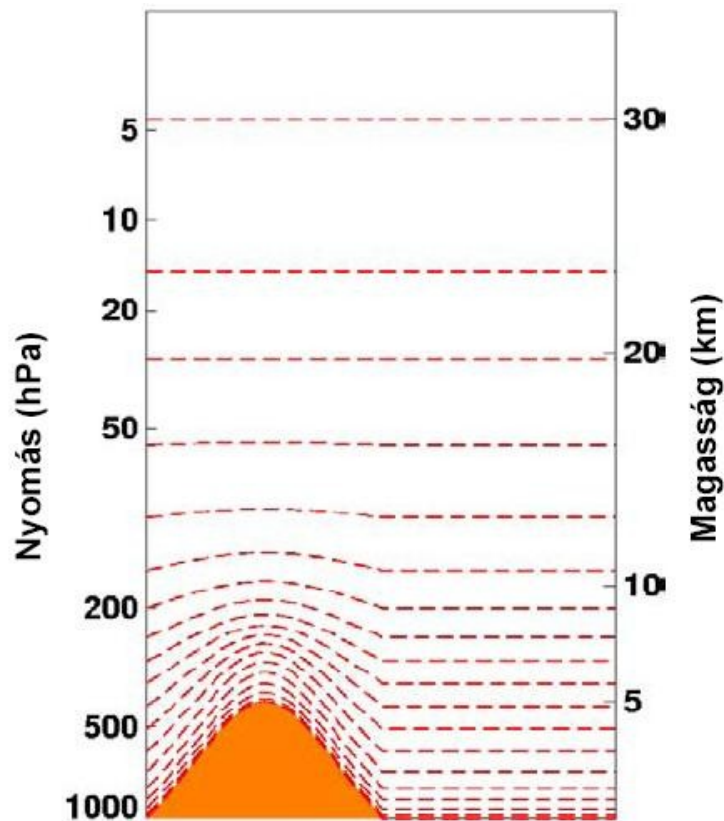
Az első adaptáció során 18 vertikális szintet alkalmaztak és 10 km-es rácshálózati felbontást, ami még a hidrosztatikai egyenletek használhatóságát biztosította (az alkalmazott RegCM verzió hidrosztatikus regionális éghajlati modell). Az időintegráció a split-explicit séma alapján történik, aminek köszönhetően külön kezelhetők az egyenletrendszer lineáris és nemlineáris tagjai. A RegCM adaptációja során a Davies és Turner (1977) által kidolgozott eljárást alkalmazták az úgynevezett buffer zóna leírására, ez esetben 12 rácspont szélességben a céltartomány körül. Az elmúlt három évtized alatt a fizikai parametrizációk folyamatos fejlődésen mentek keresztül a RegCM keretein belül. A RegCM3 modell sugárzási energia-átviteli sémájához a CCM3 (Climate Community Model 3. verzió) klímamodell szolgált

alapul (*Kiehl et al.*, 1996), a földfelszíni folyamatokat pedig a BATS1E (Biosphere Atmosphere Transfer Scheme, *Dickinson et al.*, 1993) séma alapján számolta. Ez a módszer különféle szárazföldi rétegeket alkalmaz a vegetációs rétegtől a mély talajrétegeig. A planetáris határréteghez a Holtslag sémát (*Holtslag et al.*, 1990), a konvekciós folyamatok parametrizációjához pedig három különböző séma is rendelkezésre állt (*Anthes*, 1977, *Grell*, 1993, *Emanuel*, 1991). A nagy skálájú csapadékhoz a SUBEX-t (Subgrid Explicit Moisture Scheme) használta fel. A modellbe beépítettek aeroszol és por parametrizálási lépéseket is (*Torma et al.*, 2008). A RegCM4.5 verzióba egy új parametrizációs eljárást is beépítettek, a NogTom felhő-mikrofizikai sémát (*Nogherotto et al.*, 2016). Ez a nagy skálájú csapadék, vegyes halmazállapotú felhőzet, pontosabb leírását eredményezte (*Kalmár et al.*, 2018).

### **3.3 A PRECIS regionális klímamodell**

A PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies) regionális klímamodellt a Brit Meteorológiai Szolgálat Hadley központja által kifejlesztett, HadCM3 globális modell légköri komponenséből fejlesztettek ki (*Gordon et al.*, 2000). Ez egy korlátos tartományú beágyazott modell, ami a Föld bármely térségére alkalmazható. A modell hazai adaptálása 2004-ben zajlott az ELTE Meteorológiai Tanszékén (*Bartholy et al.*, 2006).

A HadCM3 globális meghajtómodell szélességi és hosszúsági felbontása  $2,5^{\circ} \times 3,75^{\circ}$ , ami a közepes szélességeken közel 300 km-es felbontást eredményez. A modell 19 légköri és 20 óceáni szintet tartalmaz. A PRECIS regionális klímamodell ebbe a modellbe ágyazva futtatható, a peremfeltételek megadása során itt is Davies-sémát alkalmaznak. A regionális modell rácsfelbontását két méret, közel 50 km és 25 km közül választhatjuk ki, Magyarországra a kis mérete miatt a nagyobb felbontás volt célszerű. Horizontális felbontása egyenletes térközüket alkot, vertikális koordinátái pedig a korábbi modellekhez hasonlóan felszínkövető nyomási hibrid. Ebben az esetben az alsó 4 szint tisztán felszínkövető, a legfelső 3 pedig nyomási szintekkel párhuzamos (4. ábra).



4. ábra A PRECIS modell vertikális felszínkövető nyomási hibrid koordináta-rendszere

(Forrás: *Barcza et al.*, 2013)

A PRECIS hidrosztatikus rácsponti modell, az egyenleteket elforgatott szférikus koordinátarendszerben számolja. Ez azt jelenti, hogy a koordinátarendszert úgy adják meg, hogy az integrálási tartomány közepe az Egyenlítőre essen, így csökkenthetők a rácshálózat torzításából eredő hibák. Az időintegráció split-explicit séma alapján történik, az advekción tagokat pedig a Heun-séma alapján kezeli, ennek megfelelően az időlépcső 25 km-es felbontás mellett 5 perc (*Mesinger*, 1981). A sugárzás parametrizációs leírásába beépül a felhőzet, a vízgőz, a szén-dioxid, az ózon és más nyomgázok hatásai is. A talaj dinamikai viszonyainak leírására a MOSES (Met Office Surface Exchange Scheme, *Cox et al.*, 1999) talajmodellt alkalmazza. A nagyskálájú csapadék leírásához Smith-sémát alkalmaz (*Smith*, 1990), a konvekció parametrizálása az áthatoló konvekciós sémával történik (*Gregory és Rowntree*, 1990). A planetáris határreteg a modell alsó 5 szintjén van értelmezve egy elsőrendű turbulens keveredési séma (*Smith*, 1990) alapján (*Pieczka*, 2012).

### 3.4 A REMO regionális klímamodell

A hamburgi Max Planck Intézet által fejlesztett REMO (Regional Model) regionális klímamodell dinamikai magját a Német Meteorológiai Szolgálat időjárás előrejelző modellje, az Europa Modell, a parametrizációs részeit pedig az ECHAM4 globális cirkulációs modelltől származtatták (*Jacob és Podzun, 1997*). Magyarország területére vonatkozóan első ízben az Országos Meteorológiai Szolgálat 2004-ben adaptálta a REMO5.0 verzióját (*Szépszó és Horányi, 2008*).

A REMO regionális klímamodell korlátos tartományú, hidrosztatikus modell, az egyenleteket elforgatott szférikus koordináta-rendszerben oldja meg. A vertikális koordináta-rendszere felszínkövető nyomási hibrid 20 szinttel, a modellel jelenleg elérhető legfinomabb horizontális felbontás 10 km körüli, Magyarország területére azonban a modell 25 km-es rácsfelbontással szolgáltatja a legmegbízhatóbb adatokat (*Szépszó, 2014*). A REMO modellben a horizontális diszkretizációból eredő fázishibák csökkentésére C típusú Arakawa rácshálózatot alkalmaznak. Ezen a rácshálózaton a szélesség komponensek már nem a rácssarokpontokon, hanem fél rácstávolsággal eltolva kerülnek kiszámításra. Az időbeli diszkretizációra a modell az explicit leapfrog sémát, a lineáris tagok kezelésére pedig szemi-implicit sémát alkalmaz. Mivel az advekciónál euléri szemléletmódban kezeli, az időlépcső mértékének a térbeli felbontás és a hullámmegoldások advekciónál sebessége szabhatárt. Ez a módszer kisebb időlépcsőt enged, a 25 km-es rácsfelbontáson mindössze 2 percet, ez jelentősen megnöveli a hosszabb távú klímaszimulációk futtatási idejét. A szélső peremfeltételek megadásakor a Davies-sémát alkalmazza, 8 rácspont széles relaxációs területtel. A REMO5.0 modell parametrizációs sémáinak többsége, sugárzás, a konvekció és a talajviszonyok leírása az ECHAM4 globális modell mintáját követi. A rövidhullámú sugárzási egyenleget a Fouqart és Bonnel által kidolgozott eljárás alapján adaptálták (*Fouqart és Bonnel, 1980*), míg a hosszuhullámú sugárzási egyenleget a Morcrett (*Morcrett et al., 1986*) féle séma alapján számolja a modell, több üvegházgáz elnyelési és szórás tulajdonságával bővítve. A konvektív csapadékot Tiedke-féle tömegfluxus séma alapján számolja (*Tiedke, 1989*), míg a nagyskálájú csapadékot Sundqvist módszere alapján (*Sundqvist, 1978*). A talaj termodinamikai folyamatait öt rétegben számolja ki, hidrológiai folyamatok esetén három fő egyenletet old meg (*Warrilow et al., 1986*).



### 3.5 WRF regionális klímamodell

A WRF (Weather Research and Forecasting) modellt az Egyesült Államokban fejlesztették ki, számos kutatóintézet közreműködésével (*Skamarock et al.*, 2008). A modell numerikus előrejelzési és éghajlati kutatásokban való alkalmazásra egyaránt alkalmas. A beállítások helyes megválasztásával alkalmazható direkt örvény szimulációk, vagy akár globális szimulációk elvégzésére. A modell hazai adaptálásában az ELTE Meteorológiai Tanszéke döntő szerepet vállal (*Varga*, 2017).

A WRF-ben két dinamikai alegység érhető el: az NCEP (National Centers for Environmental Prediction) által fejlesztett NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) és az NCAR (National Center for Atmospheric Administration) által tervezett ARW (Advanced Research WRF). A hazai regionális éghajlati kutatások során a WRF-ARW alegység került felhasználásra. Ezt a korlátos tartományú változatot főként kutatási célokra alkalmazzák. A WRF-ARW-ben a légkör közelítése alapvetően nem hidrosztatikus módon zajlik, azonban megfelelő méretskála alkalmazásával hidrosztatikus modellként is alkalmazható. A vertikális koordináta-rendszere felszínkövető nyomási hibrid, a horizontális diszkrétizációt pedig Arakawa C típusú rácshálózaton végzi. Az időintegrációt másod vagy harmadrendű Runge-Kutta séma alapján végzi (*Wicker and Skamarock*, 2002) kisebb időlépcsővel, hang és gravitációs hullámok esetében. Az egyenletek megoldása négyféle térképvetületen érhető el, így a vizsgált terület elhelyezkedésétől függően, kisebb torzulást eredményező vetületek alkalmazhatók. A modellrendszerben több különböző parametrizációs séma választható a különböző fizikai folyamatok leírására, ennek köszönhetően széleskörű tesztelésnek vethető alá. A hazai kutatásokban a WRF-ARW 3.8-as verzióval végeztek különböző érzékenységvizsgálatokat. A WRF regionális modellként való alkalmazása során, 50 km-es és 10 km-es felbontáson is készültek rövidtávú szimulációk Európa területére (*Varga*, 2017, *Varga*, 2019). A hazai csapadékmennyiség jövőbeni alakulása a klímamodellezés egyik legbizonytalanabb eleme, ezért a modell érzékenységi vizsgálatai során az integrálási tartomány és az alkalmazott felbontás mellett, a számos különböző csapadék parametrizációs séma modelleredményekre gyakorolt hatását is vizsgálták (*Varga és Breuer*, 2018; 2020). A modellterületek egymásba ágyazásával, akár 1 km-es felbontáson is futtatható a modell, így városklimatológiai kutatásokhoz is alkalmazható. Magyarországon számos tanulmány készült a témában, a WRF városklimatológiai beállításait használva (*Göndöcs et al.*, 2017, *Göndöcs et al.*, 2017, *Molnár et al.*, 2017).

## 4. Eredmények (validáció, projekció)

A fent röviden bemutatott regionális éghajlati modellekkel számos éghajlati vizsgálatot végeztek. Az alábbiakban ezeknek a validációs és projekciós eredményeit ismertetem.

### 4.1 ALADIN

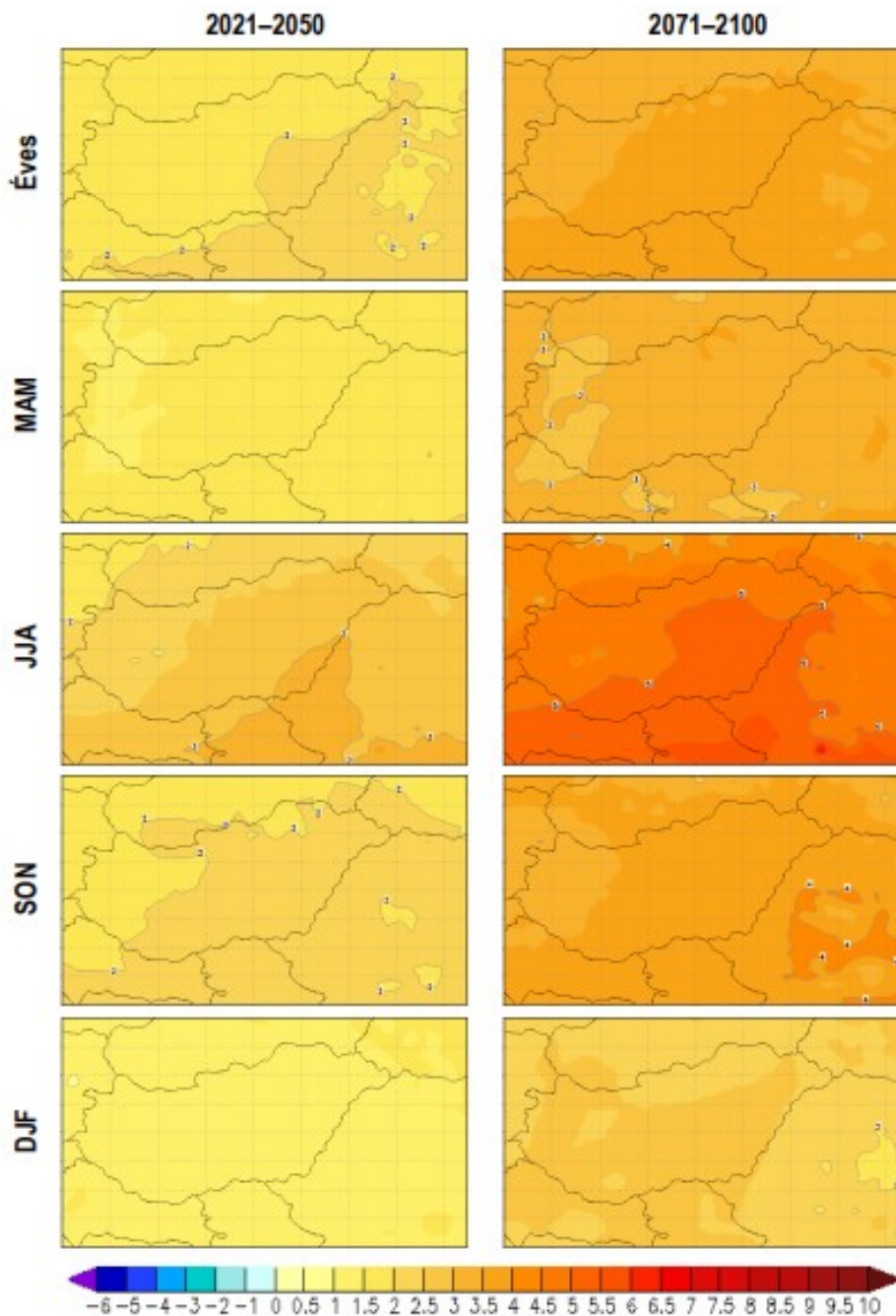
#### 4.1.1 Validáció

Ahhoz hogy megbízhatónak mondható eredményeket kapjunk a jövőbeli éghajlatra vonatkozóan, az éghajlati modellnek megfelelő pontossággal kell leírnia a közelmúlt klimatikus viszonyait. Ennek a kiértékelésére a leggyakoribb módszer a modell futtatása a közelmúlt egy kellően hosszú időszakára (jellemzően 30 év a WMO ajánlása alapján), ez az ALADIN4.5 esetében 1961-2000 közötti időszakra esett. A modell validálásához az Európai Középtávú Előrejelző Központ (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) által fejlesztett, ERA-40 re-analízis adatbázisa biztosította a szükséges határfeltételeket. A kísérleteket két különböző tartományra futtatták eltérő felbontással, a Közép- és Kelet-Európát lefedő 25 km, míg a kisebb csak a Kárpát medencére korlátozódó futtatást 10 km-es térbeli felbontással végezték, mindkét esetben 31 vertikális szinttel. A kísérleteket 1958-tól 2000-ig futtatták, az első három évet használva a modell felpörgési idejének, így egy negyven éves periódusról kaptak felhasználható információt. A re-analízisek mért adatokból és rövidtávú modell-előrejelzések felhasználásával készülnek, így nem használhatók a projekciók készítésére. A hosszútávú modellfutásokat is a múltira vonatkozóan kezdik el, ezáltal a validációs időszakra globális modellből származó határfeltételekkel készülő információk is a rendelkezésre állnak, amelyek segítségével a regionális és globális modell együttes bizonytalanságait láthatjuk. A harmadik futtatás a kisebb tartományra vonatkozott, 1960-1990 között, a szükséges határfeltételeket az ARPEGE-Climate modell szolgáltatta. A kiértékelés során a kapott eredményeket az angol CRU (Climatic Research Unit, *Mitchell et al.*, 2004) és a magyar fejlesztésű HUGRID (Hungarian gridded dataset, *Szentimrey et al.*, 2005) adatbázissal vetették össze. Az eredmények alapján a modell az ERA-40 meghajtással 1-3 °C-al, míg az ARPEGE határfeltételeivel 1 °C-al becsli alul az átlaghőmérsékletet. Az éves csapadékot összességében felülbecsli, de ősszel alulbecslés figyelhető meg (*Csima és Horányi*, 2008). Az ALADIN5.2 verzióval végzett kutatások során a validációt 20 éves időszakra végezték el (1981-2000), 10 km-es rácsfelbontással, az eddigiektől nagyobb integrálási tartományra. Az integrálási terület érzékenysége vonatkozó kutatás, ugyanis azt mutatta, hogy a napi csapadék kisebb eltéréseket mutat a nagyobb

tartományon, köszönhetően a határfeltételekből eredő zajok csökkenésének (Szépszó *et al.*, 2015). A re-analízissel meghajtott futtatás során ezúttal az ERA-Interim adatbázist használták (Dee *et al.*, 2011), a második kísérletet pedig egy 50 km-es felbontású ALADIN-Climate szimuláció eredményeiből származó határfeltételekkel végezték. Az eredményeket a teljes tartományra az E-OBS v10.0 (van den Besselaar *et al.*, 2011) adatsoraival, valamint a Magyarországra részletesebb adatokat tartalmazó CARPATCLIM (Szalai *et al.*, 2013) adatbázissal vetették össze. Az eredmények alapján az ALADIN5.2 a nyár kivételével még mindig alacsonyabb hőmérsékleteket jelzett, de már csak 1-2 °C-al tér el a megfigyelésektől. A csapadékösszeget éves szinten szignifikánsan felülbecsli, de a nyári értékek a csapadéktekintetében is javultak a korábbi verzióhoz képest (Illy, T. *et al.*, 2015).

#### **4.1.2 Projekciók**

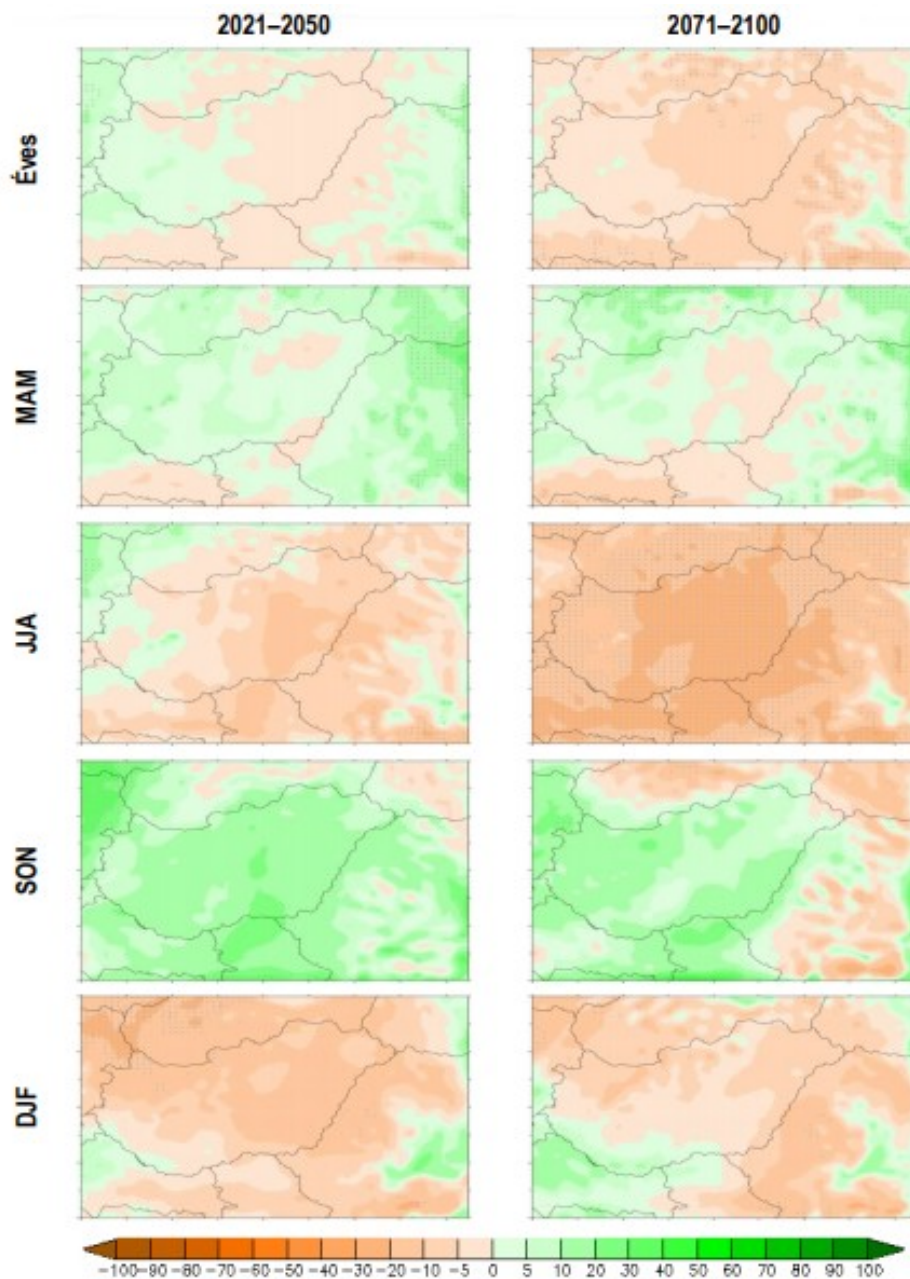
A jövőre vonatkozó futtatások fontos eleme az emberi tevékenység hatásának várható változásának becslése. Az ALADIN4.5 verzióval folytatott szimulációk során az A1B SRES (Special Report on Emissions Scenarios, Nakicenovic *et al.*, 2000) kibocsátási scenáriót alkalmazták. Ez egy közepesen optimista kibocsátási forgatókönyv, amely a 21. századra a globális CO<sub>2</sub> szint lassuló ütemű növekedését feltételezi. Az éghajlati projekciókat a közeljövőre (2021-2050) és a század végére (2071-2100) értékelték ki. Az ALADIN4.5 10 km-es felbontáson készült előrejelzései alapján Magyarország területén az átlaghőmérséklet fokozatos növekedésére számíthatunk, éves és évszagos szinten is. Míg 2021-2050-re az éves átlaghőmérséklet 1-2 °C-al emelkedhet, ez az érték a század végére akár 5 °C is lehet. Ahogy az az 5. ábrán is látható, a modell a legnagyobb mértékű növekedést a referencia-időszakhoz képest, a nyári időszakra prognosztizálja. A hőmérsékletnövekedés területi eloszlását tekintve a déli, délkeleti országrészen jelzi a legnagyobb mértékű növekedési tendenciát (Szépszó és Csorvási., 2016).



5. ábra: Az éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN4.5 regionális klímamodell eredményei alapján. (Forrás: Szépszó és Csorvási., 2016)

A csapadékösszeg változásának előrejelzése a modellezhetőség nehézsége miatt (a csapadék a hőmérséklethez képest nagyobb tér- és időbeli változékonysággal jellemezhető) sokkal nagyobb bizonytalanságot rejt magában. Az ALADIN4.5 az éves csapadékösszegben enyhe csökkenést (<10%) mutat, viszont ez sem területileg sem évszakosan nem egyenletes az ország területén. Főként a század végére a nyári csapadékösszeg csökkenését, míg ősze az

évszakos csapadékösszeg növekedését jelzi a modell, éves szinten a keleti területekre csökkenést, a nyugati országrészre növekedést mutat. (6. ábra).



6. ábra: Az átlagos éves és évszakos csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN4.5 regionális klímamodell eredményei alapján. (Forrás: Szépszó és Csorvási, 2016)

A modell újabb verziójával zajló kutatások során a korábbi társadalmi változásokon alapuló kibocsátási forgatókönyveket, felváltották az RCP scenáriók. Az RCMTÉR projekt keretében, az ALADIN5.2-vel alkalmazott RCP8.5 scenárió  $8.5 \text{ W/m}^2$  sugárzási kényszer növekedést feltételez. Az ALADIN újabb változatával már az RCP4.5 scenárióval

meghajtott szimulációkat is végrehajtottak. A futtatások kiértékeléséhez a referencia időszakot 1971-2000 közötti időszakban határozták meg, a kiértékelt időszakok ezekben az esetekben is a közeljövő és a századvége volt. Az új modellfuttatási eredmények alapján az éves átlaghőmérséklet növekedése már a közeljövőben észlelhető lesz, de a század végére, a legnagyobb sugárzási kényszer növekedést feltételezve, akár 4 °C-al is több lehet, mint a referencia időszakban (1.táblázat). Az évszakos hőmérsékletváltozásra a modell télre jelzi a legnagyobb mértékű növekedést. Az ALADIN5.2 az éves csapadékösszeg növekedését jelzi, mind a közeli (17%), mind a távolabbi (23%) időszakra. Évszakos szinten közel egyenletes növekedést feltételez, tehát nem mutatkozik a csapadékeloszlás éven belüli változása (Csorvási *et al.*, 2016).

**1. táblázat:** Az éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) és az átlagos éves és évszakos csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re és 2069-2098-ra az 1971-1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN5.2 regionális klímamodell RCP8.5 scenáriót alkalmazó eredményei alapján Magyarország területére vonatkozóan. (Forrás: Csorvási *et al.*, 2016)

Időszak	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
<b>Átlagos hőmérsékletváltozás (°C)</b>					
<b>2021-2050</b>	1,7	1,3	1,7	1,5	2,1
<b>2069-2098</b>	4,0	3,4	4,4	3,4	4,7
<b>Csapadékösszeg átlagos változása (%)</b>					
<b>2021-2050</b>	17	13	15	23	19
<b>2069-2098</b>	23	16	23	33	24

## 4.2 RegCM

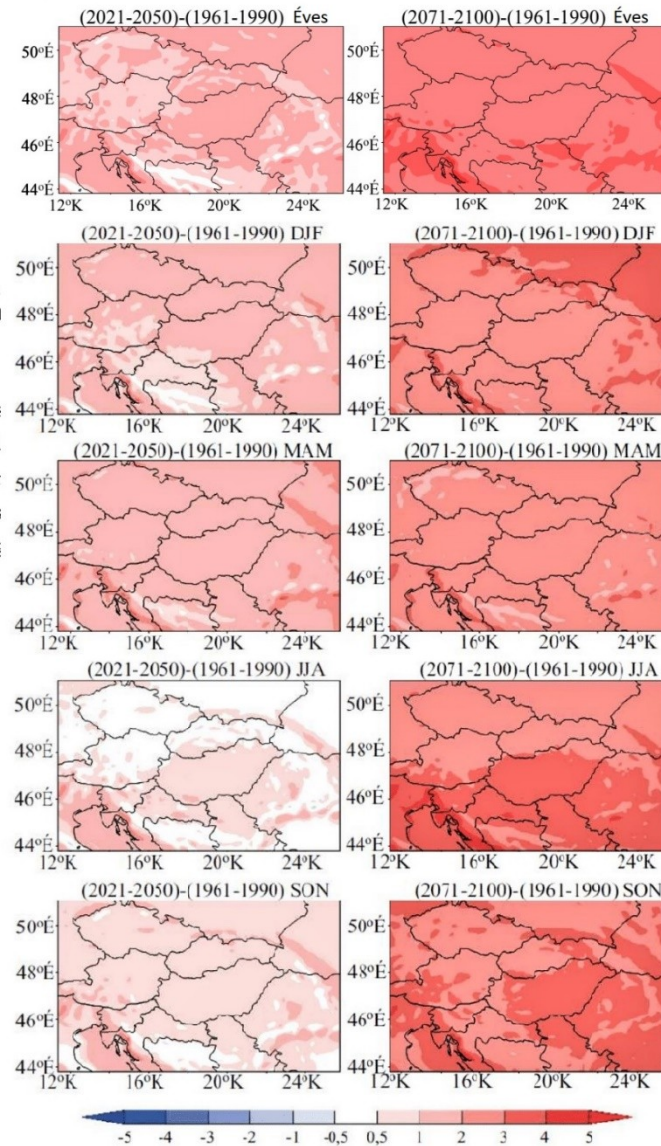
### 4.2.1 Validáció

A RegCM3 Kárpát-medencére történő adaptálása során, annak pontosságának meghatározásakor az 1961-1970-ig tartó időszakot vizsgálták, egy éves felpörgési idővel (Torma *et al.*, 2008). Az elemzéshez az ERA-40 és a GISST adatbázisokat használták, mint határfeltételeket. A modell nyílt forráskódú, tehát a kutatók a modellben parametrizációs folyamatokat szabadon átalakíthatják a megfigyelt hibákhoz viszonyítva, azaz a modell finomhangolását elvégezve ezáltal (tuning). Így amikor a modell tesztelése során a nyári csapadék jelentős túlbecslése volt megfigyelhető, változtattak a csapadék parametrizációján, a felhő-csapadék autokonverziós együttható értékét a felére csökkentették, az esőcsepp

párolgási együtthatóját megnövelték, az akkréciós rátát pedig lecsökkentették. Ezekkel a változtatásokkal a nyári csapadék csökkenését sikerült elérni (*Torma et al., 2008*). A validációs vizsgálathoz a referencia időszakot 30 évben (1961-1990) határozták meg. Az integrálási tartomány a Kárpát-medencét foglalta magába, 10 km-es rácsfelbontással 120 x 100 rácspont segítségével. Az eredményeket a CRU adatbázissal, az ERA-40 reanalízis adatbázissal, az ENSEMBLES projekt E-OBS első verziójú adatbázisával és két magyarországi állomás adataival vetették össze. Az eredmények alapján a hőmérsékletet télen enyhén felül, míg egyébként alul becsülte. A csapadék mennyiségét Magyarország túlnyomó részén kis mértékben felülbecsülte (*Torma et al., 2011; Torma, 2011*). A RegCM4.3 verzió telepítése után érzékenységvizsgálatot hajtottak végre az optimális csapadékséma meghatározására, melynek eredményeként a további vizsgálatokhoz a kevert MIT-Emanuel/Grell konvektív csapadék parametrizációs sémát alkalmazták (*Pongrácz et al., 2015*). A modell első validációs vizsgálatához az ERA-Interim re-analízis, majd a másodikhoz a HadGEM2 modell adta a szükséges kezdeti peremfeltételeket. Referencia időszakként az 1981-től 2000-ig tartó időszakot választották, a szimulációkat 10 km-es rácsfelbontáson futtatták. Az eredményeket az E-OBS v10.0, a magyarországi területekre pedig a CARPATCLIM adatbázissal vetették össze. A RegCM4.3-ra az átlagos hőmérsékleti értékek felülbecslése jellemző, ez a legnagyobb nyáron, az ország déli részein 3 °C. A csapadékösszeget kismértékben felülbecsli, kivéve ősszel a délnyugati területeken és nyáron, ahol 20%-os alulbecslés figyelhető meg az ország területén (*Csorvási et al., 2016*). A RegCM4.5 verzió tesztelése jelenleg is zajlik, az új felszín modell és csapadéksémákra vonatkozóan, a modell optimális beállításainak megtalálásához egy újabb hosszútávú éghajlatszimuláció érdekében (*Kalmár et al, 2020*).

## 4.2.2 Projekciók

A RegCM3-al végzett futtatások során szintén a már említett SRES A1B kibocsátási scenáriót alkalmazták az ember éghajlatbefolyásoló tevékenységének jövőbeni modellezésére. A modelleredmények azt mutatják, hogy habár az egyes években előfordulnak alacsonyabb éves átlaghőmérsékletek, az egymást követő 30 éves periódusok átlaghőmérsékletei melegebbek lesznek, mint az előzőek voltak. Éves szinten a modell az ország területére egyenletes melegedést jelez, közel 1 °C-ot (2021-2050-re) és 3 °C-ot (2071-2100-ra). Az évszakos eredményeket vizsgálva, a RegCM3 a közeljövőben nyárra várja a legkisebb mértékű hőmérsékletemelkedést, tavaszra pedig a legnagyobbat (7. ábra).



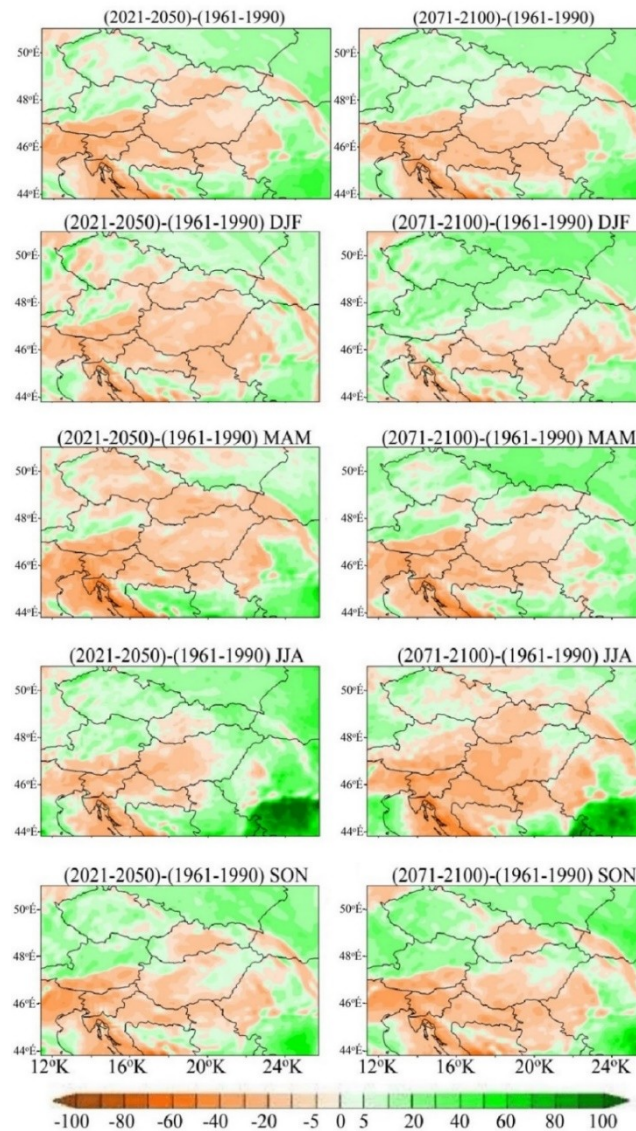
7. ábra: Az éves és évszaksos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2071-2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest a RegCM3 regionális klímamodell eredményei alapján. (Forrás: *Torma, 2011*)

Ez a tendencia a század végére azonban megfordul, ekkorra a modell a nyarat jelzi a leginkább melegedőnek. A melegedés térbeli eloszlására jellemző a hegységek századközepe nyelre melegedése, a századvégére azonban a Kárpátok és az Alpok területén valószínű a legnagyobb mértékű hőmérsékletemelkedés a referencia időszakhoz képest (*Torma, 2011*).

A RegCM3 eredmények alapján Magyarország az éves csapadékösszeg jövőbeni alakulásának szempontjából átmeneti zónában helyezkedik el: a tőlünk északabbra lévő



területeken csapadékösszeg növekedést, míg délebbre csökkenést jelez a modell, az ország területén azonban nem mutat jelentős változást (8. ábra).



8. ábra: Az átlagos éves és évszakas csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re és 2071-2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest a RegCM3 regionális klímamodell eredményei alapján. (Forrás: *Torma*, 2011)

A modell évszakas szinten az ország területén a közeljövőben gyenge csapadékösszeg csökkenést jelez, aminek a területi eloszlása azonban nem egyenletes (8. ábra). Nyáron és ősszel a keleti területek csapadékosabbá válhatnak (10-20%), míg a nyugati területeken szárazabbá (20-30%). A 2071-2100 közötti időszakban a modell a csapadék éven belüli eloszlásának megváltozását jelzi, nyáron nagyobb csökkenést, télen pedig növekedést mutatva (*Torma*, 2011).

A modell újabb verziójával több futtatást is elvégeztek hazánk térségére (Pongrácz *et al.*, 2016), melyek között megmutatkozó markáns eltérések a felhasznált RCP scenáriókból következnek. Vizsgálatokat végeztek az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvvel. Minden szimuláció egyértelmű hőmérsékletnövekedést jelez, nyáron kiugróan magas értékekkel. A közeljövőben a két szimuláció eredményei még közel egyforma értékeket jeleznek, ahogyan az a scenáriókban lévő sugárzási kényszer növekvő mértékéből feltételezhető. A század végére azonban egyértelmű a futtatások közötti különbség, az RCP8.5-el készült szimuláció a nyári időszakra majdnem kétszer akkora melegedést mutat mint az RCP4.5 a magyarországi rácspontra vonatkozóan (2.táblázat).

**2. táblázat:** Az éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) és az átlagos éves és évszakos csapadékösszeg változása (%) 2021–2040-re és 2080-2099-ra az 1981-2000 referencia-időszakhoz képest a RegCM4.3 regionális klímamodell eredményei alapján, két RCP scenárió alapján. (Forrás: Pongrácz *et al.*, 2016)

Szenárió	Időszak	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
<b>Átlagos hőmérsékletváltozás (°C)</b>						
<b>RCP4.5</b>	2021-2040	1,5	1,4	1,9	1,3	1,3
	2080-2099	2,5	1,8	3,5	2,7	1,9
<b>RCP8.5</b>	2021-2040	1,7	1,0	2,2	2,3	1,3
	2080-2099	5,1	3,9	6,9	5,3	4,3
<b>Csapadékösszeg átlagos változása (%)</b>						
<b>RCP4.5</b>	2021-2040	8	27	-11	-10	32
	2080-2099	8	24	-27	11	23
<b>RCP8.5</b>	2021-2040	1	20	-22	-9	24
	2080-2099	5	26	-30	-9	46

Éves szinten mindkét scenárió esetében a keleti országrészen valószínűsíthető a legnagyobb mértékű növekedés. A csapadékösszeg mindkét scenárióval végzett szimuláció alapján csökken nyáron és ősszel, és növekedést mutat télen és tavasszal, tehát a RegCM4.3 a csapadék éven belüli eloszlásának változását prognosztizálja. A szimulációk csapadék tekintetében is eltérnek a század végére, az RCP4.5 az őszi időszakra kis mértékű növekedést, míg az RCP8.5 csökkenést jelez. Télen mindkét futás eredménye a csapadékösszeg növekedését jelzi, az RCP8.5 azonban közel kétszer akkora mennyiségben (Pongrácz *et al.*, 2016).

## 4.3 PRECIS

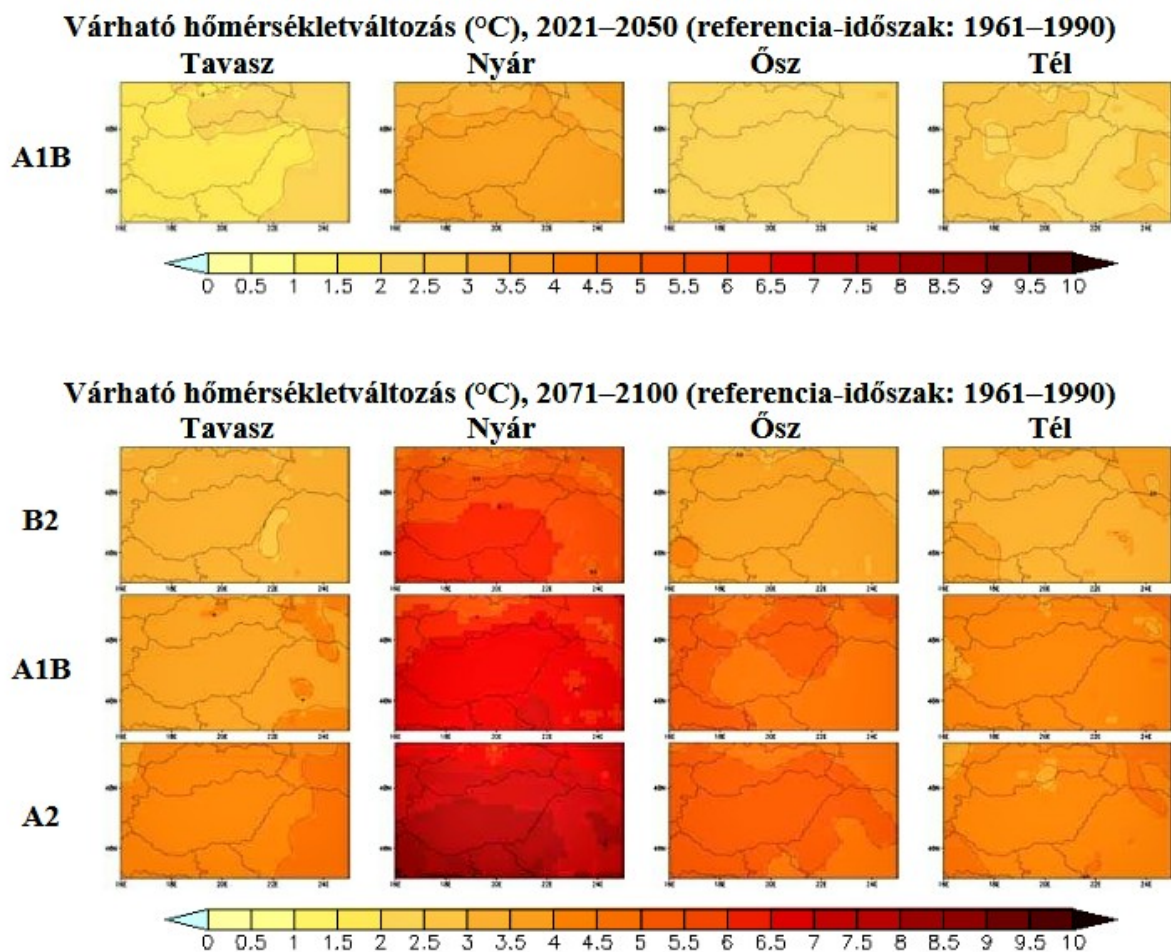
### 4.3.1 Validáció

A modell validációs vizsgálatához az 1961-1990-ig tartó referencia időszakra végeztek szimulációkat, különböző peremfeltételekkel. Az ERA-40 re-analízist használva, szinte tökéletes peremeltételt kap a modell, így az eredmények éghajlati adatsoroktól való eltérése, a regionális modell hibáit mutathatja meg. Két további szimuláció során a HadCM3 globális éghajlati modell két verziója (HadAM3P, HadCM3Q0) szolgáltatta a határfeltételeket. Ezekből a kísérletekből a globális és regionális modell együttes hibáiról kapunk információt. A modellfutások integrálási területe Közép- és Dél-Európát fedte le, 25 km-es rácsávolsággal, az eredményeket az adott térségre rácsponti adatokat biztosító E-OBS adatbázis értékeivel vetették össze. A re-analízissel meghajtott szimuláció során az átlaghőmérséklet értékek többnyire kis eltéréseket mutattak, jelentősebb felülbecslés nyáron, Magyarország déli területein figyelhető meg (2-3 °C). A felülbecslés a déli területeken a globális modellek segítségével készült szimulációk esetén erőteljesebb (3-4 °C). Csapadék tekintetében a három szimuláció, hasonló eredményeket mutat, tavasszal több csapadékot jeleznek, valamint a magashegységi területeken egész évben felülbecslés figyelhető meg. Ennek a szisztematikus felülbecslésnek azonban az E-OBS adatbázis ezekre a területekre vonatkozó, alacsony csapadékkértéke lehet az oka (Piecza, 2012).

### 4.3.2 Projekció

A PRECIS regionális klímamoddellel három különböző kibocsátási scenárióval végeztek éghajlati szimulációkat. A SRES A1B forgatókönyv alapján 1951-2100-ig tartó szimulációt végeztek, így az adatokat a közeljövőre és a század végére is kielemezhetik. A különböző forgatókönyvekben szereplő szén-dioxid kibocsátás, és az ebből eredő éghajlat alakító szerep, a század végére tér el jelentős mértékben. Az A2 és B2 scenáriókkal a 2071-2100-as időszakra készítettek éghajlati becslést, amikor a légköri szén-dioxid szintet az optimistább B2 621 ppm-ben, a pesszimistább A2 forgatókönyv 856 ppm-ben határozza meg. A PRECIS eredményei folyamatos hőmérsékletemelkedést jeleznek a 21. századra. Éves szinten az átlaghőmérséklet emelkedése a közeljövőben 2-3 °C, a század végére a különböző forgatókönyvek esetén nagy eltérések mutatkoznak (9. ábra). A legnagyobb eltérések a nyári értékekben jelentkeznek, kibocsátástól függően 6-8 °C-os melegedést jelezve az ország területére. A többi évszakban kisebb eltérések tapasztalhatók (1-1,3 °C). A század végére a legkisebb melegedés tavasszal és télen látható, minden scenárió esetében. Az ország

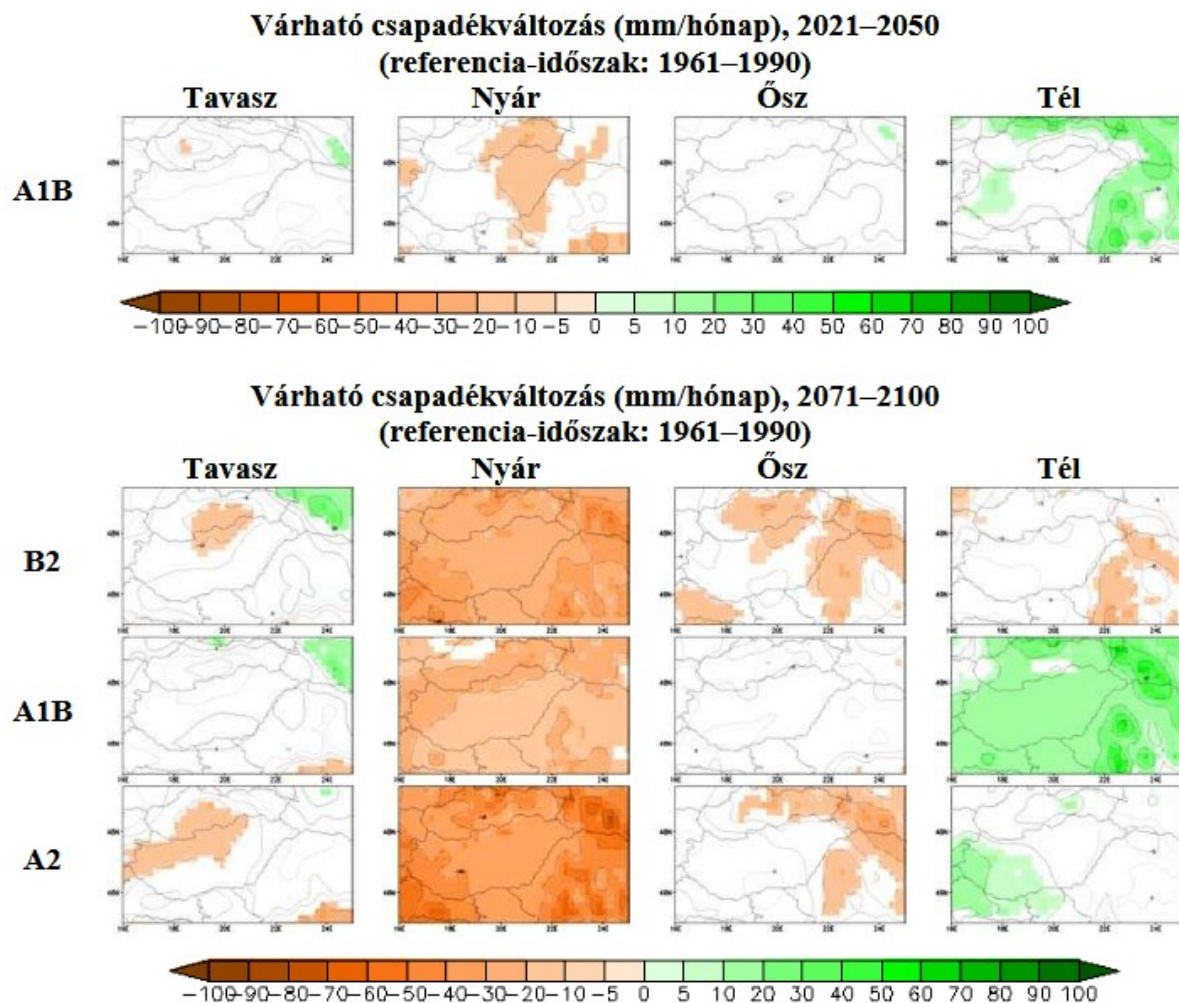
területén a melegedés térbeli eloszlása kis mértékben jelentkezik, a déli részek erősebb melegedésével (Piecza, 2012).



9. ábra: Az évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2071-2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest, különböző forgatókönyvek esetén, a PRECIS regionális klímamodell eredményei alapján. (Forrás: Piecza, 2012)

A csapadékösszeg változásában a különböző scenáriók közötti különbségek még látványosabbak. Az A2 és B2 scenáriók ~ 20%-os éves csapadékösszeg csökkenést mutatnak a század végére, az A1B forgatókönyv esetében azonban ez nem jelentkezik. Az eltérések ellenére mindegyik esetben a nyári hónapokban jelentkezik egyértelmű csapadék csökkenés, a közeljövőben a Tiszántúl területén, a század végére azonban az ország teljes területén (10. ábra). A legnagyobb bizonytalanság a téli csapadékösszegben látható, 2071-2100-ra az A1B forgatókönyv alapján az ország területén a csapadékösszeg növekedése figyelhető meg, ugyanakkor az A2 esetén ez csak a Dunántúlra jellemző, a B2 esetén pedig meg sem jelenik. Az átmeneti évszakokban nem mutatkozik nagymértékű változás. A PRECIS A1B

scenárióval kapott eredményei alapján az éven belüli csapadékeloszlás megváltozhat, az évszázad végére a nyár szárazabb, míg a tél pedig a csapadékosabb évszak lehet (Piecza, 2012).



10. ábra: Az átlagos évszakos csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re és 2071-2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest, különböző forgatókönyvek esetén, a PRECIS regionális klímamodell eredményei alapján. (Forrás: Piecza, 2012)

## 4.4 REMO

### 4.4.1 Validáció

A REMO5.0 modellel a validációs vizsgálathoz szükséges szimulációt 1957-2000-ig hajtották végre, az első négy évet felpörgési időszakként felhasználva. A szimuláció eredményeit a CLAVIER (Climate Change and Variability: Impact on Central and Eastern Europe; *Jacob et al.*, 2008) programban kívánták felhasználni, amelynek célja a klímaváltozás Közép- és Kelet-Európai térségre gyakorolt hatásának vizsgálata volt. A hidrológiai viszonyok

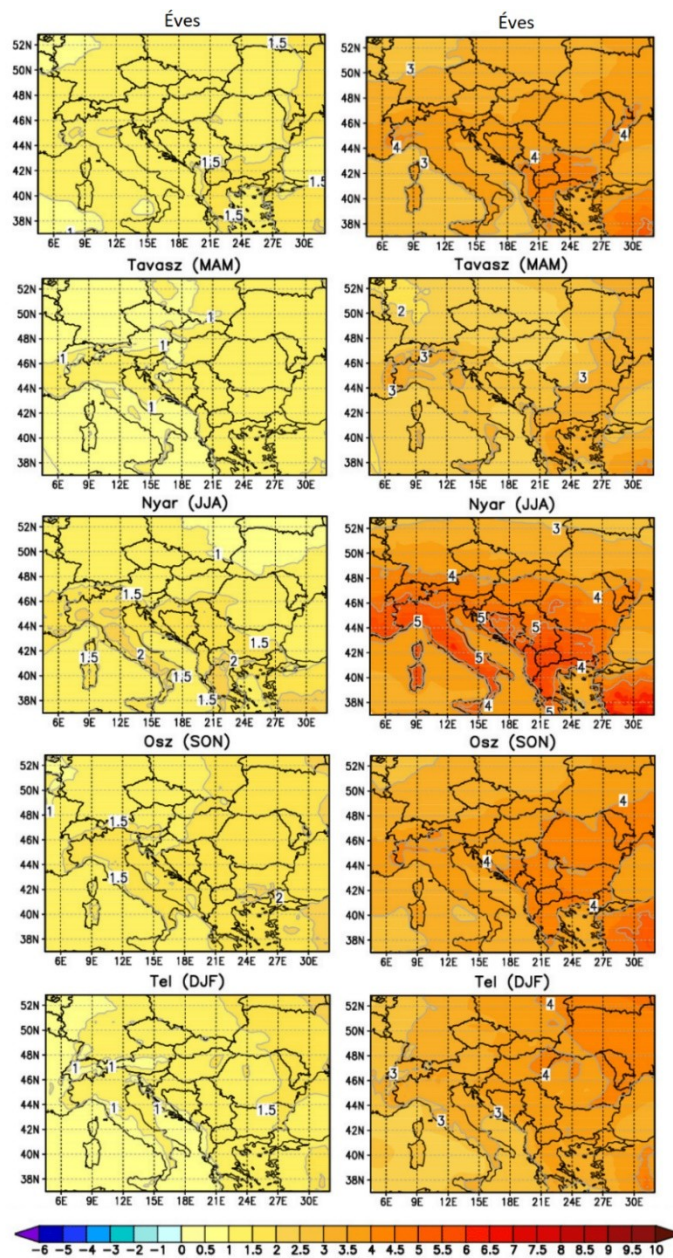
feltérképezése érdekében az integrálási terület a Duna és a Tisza vízgyűjtő területeit is lefedi, így a végleges tartomány a legnagyobb területet fedi le a hazai futtatású regionális klímamodellek közül. A horizontális felbontást 25 km-es ráctávolságban határozták meg, valamint 20 vertikális szintet alkalmaztak. Határfeltételként a 125 km-es felbontású, ERA-40 re-analízist alkalmazták az első validációs kísérlethez. A teljes 1951-2100-ig tartó időszakra az ECHAM5/MPI-OM kapcsolt légkör-óceán globális modell eredményeivel meghajtott szimulációt futtattak. Az eredmények kiértékeléséhez a tartományt lefedő E-OBS adatbázist használták (1961-1990), a magyarországi eredményeket pedig a CARPTCLIM adataival is összevetették (1971-2000). A re-analízissel meghajtott szimuláció eredményei az E-OBS és a CARPATCLIM adataihoz képest a hőmérsékletben felülbecslést mutatott a tél kivételével minden évszakban. A tartomány déli részein a felülbecslés nyáron 5 °C, tavasszal és ősszel 1-3 °C eltérés mutatkozott. A globális modelltől származó határfeltételekkel végzett validációs vizsgálat során az eredmények 1 °C eltérést mutattak az adatbázisokhoz képest. A csapadékösszeget mindkét vizsgálatban felülbecslte a terület jelentős részén, a csapadék éves menetét azonban jól visszaadta a modell (Szépszó, 2014).

#### 4.4.2 Projekciók

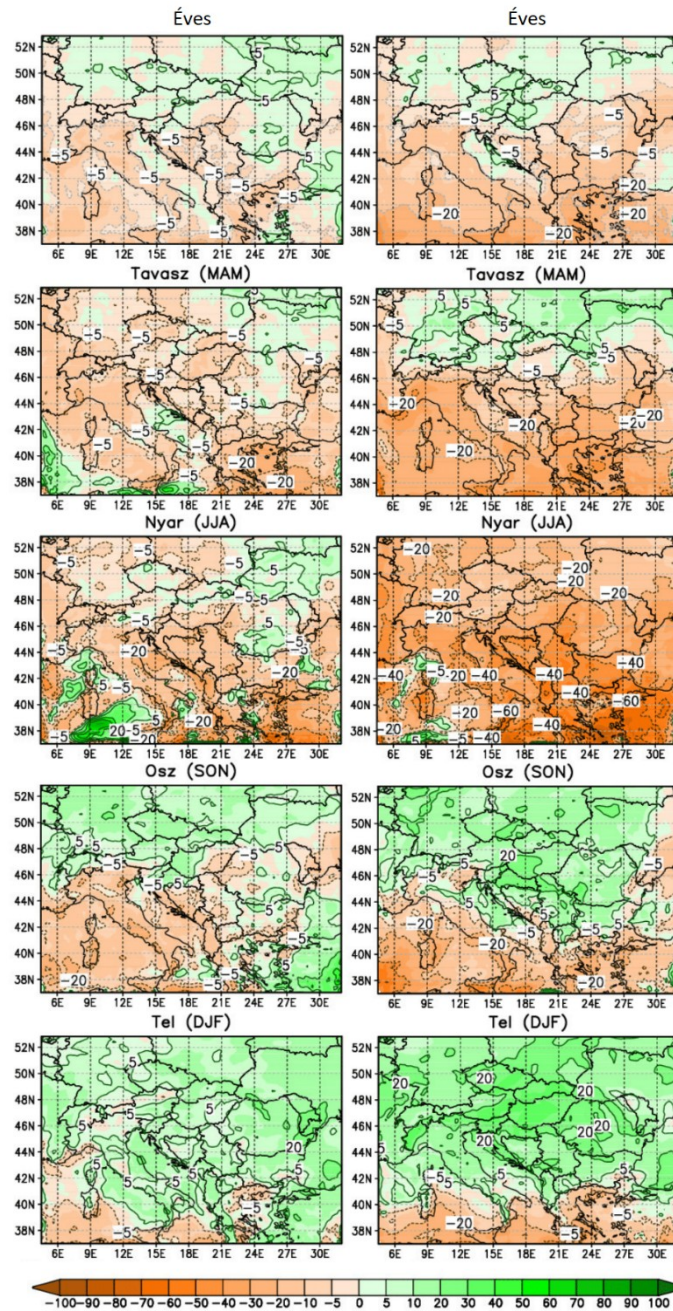
Szépszó Gabriella doktori disszertációjának keretein belül ismerteti a REMO5.0 hőmérsékletre és csapadékra irányuló eredményeit (Szépszó, 2014). Az éghajlati szimuláció során az antropogén hatást a SRES A1B kibocsátási forgatókönyv alapján vette figyelembe a modell. A kiértékelésnél a referencia időszakot 1961-1990-ig tartó periódusban határozták meg. Az éves átlaghőmérséklet változására a modell a teljes tartományra növekedést mutat, 1 °C-t 2021-2050-re és 3 °C-t a 2071-2100 közötti század végi időszakra (11. ábra). A hőmérséklet növekedése egyenletes mértékű az egyes évszakokban a közeljövőben, a század végén azonban nyáron a tartomány déli részein a melegedés mértéke 5 °C, míg tavasszal csupán 3 °C. Magyarország területére szintén nyáron és az ország déli, délkeleti részein mutatkozik a legnagyobb mértékű melegedés, a közeljövőre vonatkozóan 1-1,5 °C, míg 2071-2100-ra 4 °C (Szépszó, 2014). A jelenleg futó KlimAdat projekt részeként, az Országos Meteorológiai Szolgálatnál 10 km felbontású REMO modellszimulációkat futtatnak, két eltérő (RCP4.5 és RCP8.5) kibocsátási scenáriót alkalmazva.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> A projekciós eredmények jelenleg még nem elérhetőek.



11. ábra: Az éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re (balra) és 2071-2100-ra (jobbra) az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest a REMO regionális klímamodell eredményei alapján. (Forrás: Szépszó, 2014)



12. ábra: Az átlagos éves és évszakos csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re (balra) és 2071-2100-ra (jobbra) az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest a REMO regionális klímamodell eredményei alapján. (Forrás: Szépszó, 2014)

A közeljövőre a modell nem jelez az éves csapadékösszegben nagy mértékű változásokat, a teljes tartományon a Kárpát-medencétől délre csökkenést (<10%), északra pedig növekedést (<10%) mutat (12. ábra). Hasonlóan hazánk területére, ahol a délkeleti részekén csökkenhet az évi csapadékösszeg. A csapadékösszeg évszakos változásában azonban eltérések figyelhetők meg. Tavasszal és nyáron a tartomány jelentős részére csökkenés mutatkozik, 5-



20%, télen azonban növekedést jelez a modell (~20%). Ez a trend figyelhető meg a századvégi időszakban is, a különbségek jelentős növekedésével. A csapadékösszeg jövőbeni várható értékeinek területi eloszlása is változó, nyáron a mediterrán térségben akár 60%-os csapadékösszeg csökkenés, míg a Kárpátoktól északra csupán 20%-os csökkenést jelez a modell. Ez a térbeli megosztottság a század végére a többi évszakra is jellemző, a déli területeken a csapadék csökkenése, míg a tartomány északi részére a növekedése várható, legnagyobb mértékben télen (20%) (Szépszó, 2014).

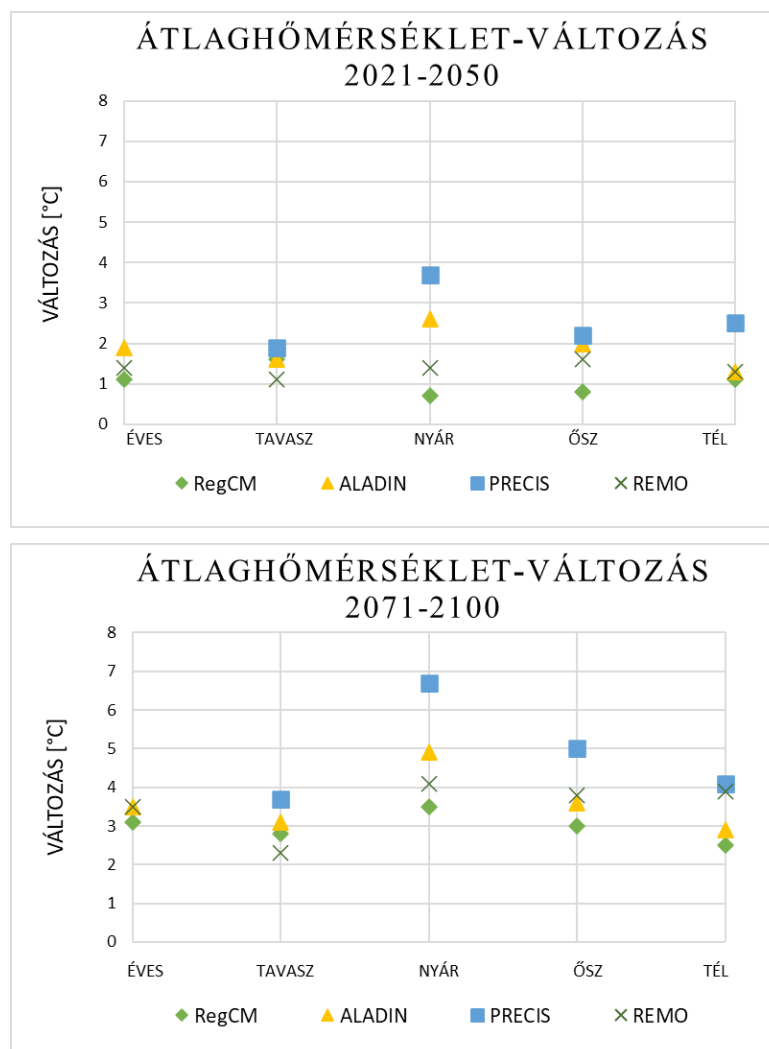
## 4.5 Összegzés

A hazai klímamodellezési tevékenység az első modelladaptálások óta rengeteg produktummal állt elő. A különböző modellszimulációk eredményei között számos eltérés található. Ennek számos oka lehet: a modellek különböznek a dinamikai felépítésükben és a fizikai parametrizációk kezelésében. Más globális modellszimulációból származó kezdeti peremfeltételeket használnak, eltérő nagyságú integrálási területen és esetenként más horizontális rácsávolság alkalmazásával futtatták őket (3. táblázat). Az éghajlati rendszerben rejlő természetes változékonyság és az antropogén hatások mellett, ezek a tényezők is hozzájárulnak a klímamodellezésben rejlő bizonytalanságokhoz. Az validációs eredmények kiértékelése eltérő megfigyelési adatbázisokhoz és a projekciós futások esetén eltérő időszakhoz viszonyítva történt, ami tovább nehezíti az eredmények összehasonlítását (ill. összehasonlíthatóságát).

**3. táblázat:** A négy regionális klímamodellel végrehajtott éghajlati szimulációk hazánk térségére. (Forrás: *Torma*, 2011, *Szépszó és Csorvási*, 2016, *Pieczka*, 2012, *Szépszó*, 2014, *Pongrácz et al.*, 2016, *Bán*, 2020)

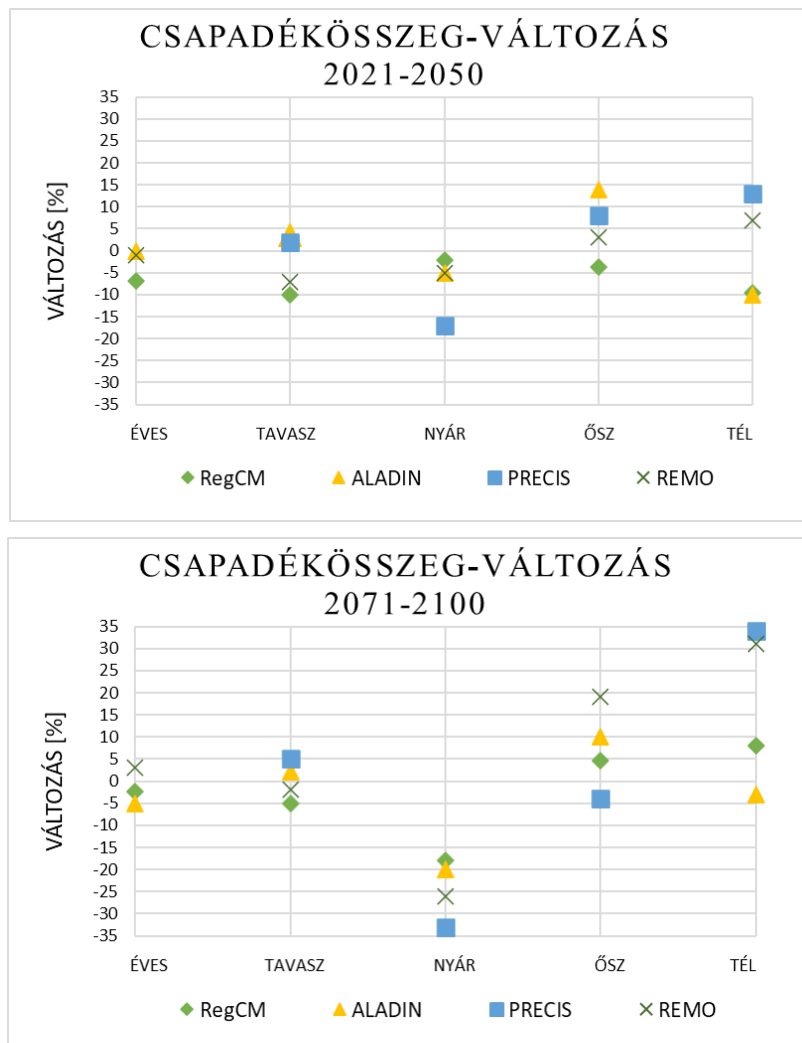
Modell	Verzió	Horizontális felbontás	Szcenárió	Referencia időszak	Jövőbeli időszak
<b>ALADIN</b>	4.5	10 km	A1B	1961-1990	2021-2050
		25 km			2071-2100
	5.2	10 km	RCP4.5	1971-2000	2021-2050
		50 km	RCP8.5		2071-2100
<b>RegCM</b>	3.1	10 km	A1B	1961-1990	2021-2050
					2071-2100
	4.3	10 km	RCP4.5	1981-2000	2021-2040
			RCP8.5		2041-2060
<b>PRECIS</b>	1.9.2	25 km	A1B	1961-1990	2061-2080
			A2, B2		2080-2099
<b>REMO</b>	5.0	25 km	A1B	1961-1990	2021-2050
					2071-2100

A 13. ábra a Magyarországon alkalmazott regionális klímamodell eredmények alapján készült, Magyarország területére várható, átlaghőmérsékletre vonatkozó projekciós eredményeket szemlélteti (Torma, 2011, Szépszó és Csorvási, 2016, Pieczka, 2012, Szépszó, 2014). A szimulációk során a SRES A1B antropogén kibocsátásra vonatkozó forgatókönyvet alkalmazták. Látható, hogy az azonos mértékű antropogén hatás mellett, a modelleredmények éves szinten jól közelítik egymást. A legnagyobb bizonytalanságot a nyári időszak mutatja, ahol a legkisebb és legnagyobb változást mutató modelleredmény között, közel 3 °C-os eltérés látható mind a közeli mind a távoli jövőre vonatkozóan. A legnagyobb fokú érzékenység a PRECIS modell esetében mutatkozik évszaktól és időszaktól függetlenül. A modelleredmények eltéréseinek ellenére jól látható hőmérsékleti növekedési trend figyelhető meg.



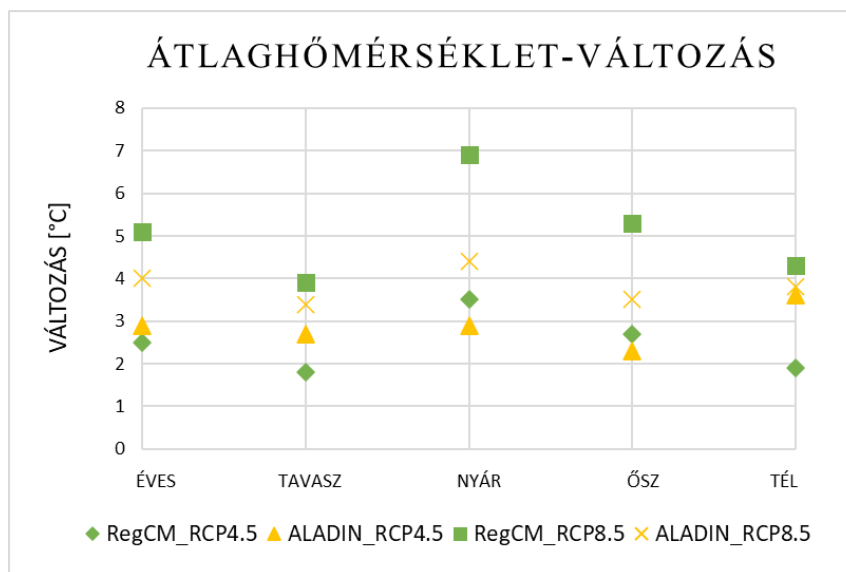
13. ábra: Az éves és évszakas átlaghőmérséklet-változás (°C) a négy modell eredményei alapján az 1961-1990 referencia időszakhoz képest, A1B kibocsátási forgatókönyv esetén.

A 14. ábra a Magyarországon alkalmazott regionális klímamodell eredmények alapján készült és a Magyarország területére várható, csapadékösszegre vonatkozó projekciós eredményeket szemlélteti. A szimulációk során a SRES A1B antropogén kibocsátásra vonatkozó forgatókönyvet alkalmazták. A csapadék modellezése bizonytalanabb tényező, a csapadékösszeg változásra vonatkozó eredmények között eltérő irányú változások is megfigyelhetők a különböző modellek esetében. Az eredmények csak a nyári időszakban mutatnak egyirányú változást, a közeljövőben mérsékeltebb, a század végére viszont nagyfokú csapadékösszeg csökkenést jeleznek. A legnagyobb bizonytalanságot a téli hónapok adják, a század végére két modell markáns (>30%) növekedést jelez, míg van olyan is amelyik kis mértékű csökkenést mutat (ALADIN). Érdekes megfigyelni továbbá, hogy a RegCM modell esetében a század végére a téli időszakra vonatkozó csapadékváltozás előjelet vált a közel jövőre vonatkozó eredményekhez képest.



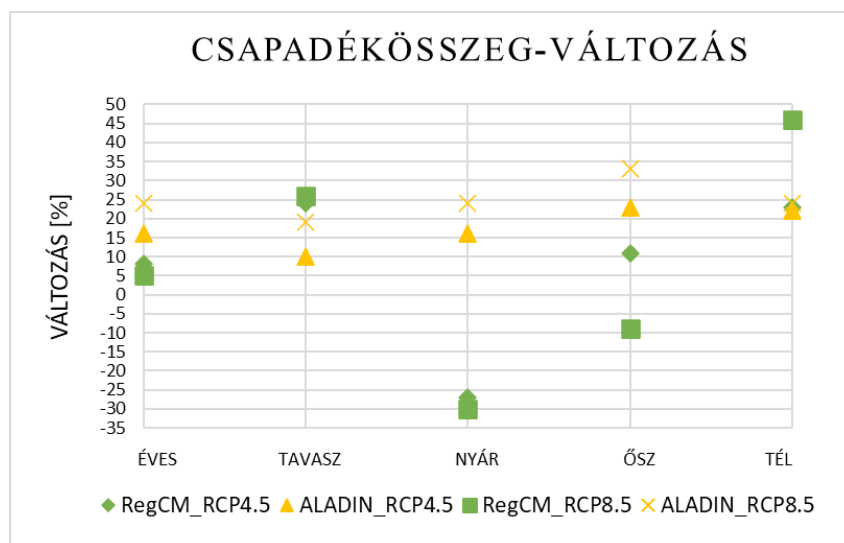
14. ábra: Az éves és évszaks csapadékösszeg-változás (%) a négy modell eredményei alapján az 1961-1990 referencia időszakhoz képest, A1B kibocsátási forgatókönyv esetén.

A 15. ábra a RegCM4.3 és ALADIN5.2 modellverzióval, az RCP4.5 és RCP8.5 scenárió alkalmazásával készült, projekciós eredményeket szemlélteti a századvégi időszakokra, a várható átlaghőmérséklet változásra vonatkozóan. A RegCM eredményeinek felhasználására a CORDEX programban került sor, a referencia időszak csupán 20 év (1981-2000) így a kiértékelési időszak is 2080-2099-re esik (Pongrácz *et al.*, 2016). Az ALADIN esetében a referencia időszak 1971-2000-ig tart, a projekciókat pedig 2071-2100-ig tartó időszakra vizsgálták (Bán, 2020). A különböző kibocsátási forgatókönyvek a század második felében térnek el egymástól jelentős mértékben, így a köztük lévő különbség ekkorra érezteti a hatását az eredményekben. A sugárzási kényszer eltérő növekedése a századvégi időszakokra jelentős bizonytalanságot ad a hőmérséklet-változás mértékére. A RegCM esetén a különböző scenáriók szerint 2,5 °C különbség jelenik meg az éves hőmérsékletváltozásban, de hasonlóan nagy eltérések láthatók ősszel és nyáron is. Az ALADIN esetében a két scenárióval kapott eredmények között kisebb eltérések figyelhetők meg. A két scenárió között legnagyobb eltérést mutató évszakban, az RCP8.5-el készült szimuláció csupán 1,5 °C-kal jelez nagyobb mértékű melegedést, mint az alacsonyabb sugárzási kényszer változást jelentő RCP4.5.



15. ábra: Az éves és évszakos hőmérséklet-változás (°C) a RegCM4.3 eredményei alapján az 1981-2000 referencia időszakhoz képest 2081-2099-re, és az ALADIN5.2 eredményei alapján az 1971-2000 referencia időszakhoz képest, 2071-2100-ra, az RCP4.5 és RCP8.5 kibocsátási forgatókönyv esetén.

A 16. ábra a RegCM4.3 és ALADIN5.2 modellverzióval, az RCP4.5 és RCP8.5 scenárió alkalmazásával készült, projekciós eredményeket szemlélteti a századvégi időszakokra, a várható csapadékösszeg-változásra vonatkozóan. A RegCM eredményeiben a különböző scenáriók esetén a csapadék-változás mértéke tavasszal és nyáron is közel esik egymáshoz. A becsült változások iránya télen is megegyezik, azonban az RCP8.5 esetén a csapadékösszeg növekedés (46%) jelentősen meghaladja az RCP4.5 alapján várható mértéket (23%), az őszi időszakban pedig eltérő irányú változásokat jeleznek. Az ALADIN esetében a különböző scenáriók hasonló mértékű és minden évszakban azonos irányú, növekvő tendenciát jeleznek.



16. ábra: Az éves és évszakos csapadékösszeg-változás (%) a RegCM4.3 eredményei alapján az 1981-2000 referencia időszakhoz képest 2081-2099-re, és az ALADIN5.2 eredményei alapján az 1971-2000 referencia időszakhoz képest, 2071-2100-ra, az RCP4.5 és RCP8.5 kibocsátási forgatókönyv esetén.

## 5. Összefoglalás

Az éghajlatváltozás kiemelten fontos kutatási terület, a Magyarországon várható változások megismerésének elengedhetetlen kutatási eszközei a regionális klímamodellek. Magyarországon eddig négy ilyen modellel végeztek éghajlati szimulációkat. Az ALADIN-Climate, a RegCM, a PRECIS és a REMO modellek az éghajlati rendszer viselkedését szimulálják, fizikai törvények numerikus megoldásai révén. A 3. fejezetben bemutattam az alkalmazott modellváltozatokat, amely alapján látszik, hogy az egyes modellek eltérő módon írják le a fizikai folyamatokat, különböző parametrizációs eljárásokat alkalmaznak.

A 4. fejezetben a hazai alkalmazású modellekkel végzett szimulációk beállításait, a validációs és projekciós eredményeket ismertettem. Az adaptálás során széleskörű tesztelésnek vetették alá a modelleket, a rácstávolság, az integrálási terület nagysága és elhelyezkedése és a különböző parametrizációs beállítások szempontjából. A kiértékelések első lépése a modelleredmények validálása. A validációs vizsgálatok során feltárták, hogy a modelleredmények kisebb-nagyobb hibákkal terheltek. Összességében a modellek megfelelő pontossággal képesek modellezni a közelmúlt éghajlatát, így alkalmasak az éghajlati szimulációk készítésére.

Az azonos SRES A1B kibocsátási forgatókönyv alapján készült modellfutások, hőmérsékletváltozás mértékére vonatkozó eredményei között láthatók eltérések, azonban minden modell egyetért abban, hogy a XXI. században a hőmérséklet emelkedése várható. Az antropogén hatást nagyobb mértékűnek feltételező RCP8.5 futások esetén pedig, ahogy az várható a modellek jelentősebb hőmérsékletemelkedést jeleznek. A csapadék szimulálása nagyobb bizonytalanságokkal terhelt, az egyes modellfutások nem csak a csapadékösszeg változás mértékében, de gyakran az irányában sem egyeznek meg.

A regionális klímamodellezés gyorsan fejlődő, aktív kutatási terület, a közeljövőben újabb éghajlati szimulációk elkészítése várható, az OMSZ és az ELTE Meteorológiai Tanszékének részéről is.

## **Köszönetnyilvánítás**

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, dr. Torma Csaba Zsoltnak a dolgozat elkészítésében nyújtott sok segítségért és hasznos tanácsáért.

Köszönöm a szaktársaim, barátaim és családom támogatását a dolgozat elkészítése során.



## Irodalomjegyzék

- Adcroft, A., Anderson, W., Balaji, V., Blanton, C., Bushuk, M., Dufour, O. C., Dunne, P. J., Griffies, M. S., Hallberg, R., Harrison, J. M., Held, M. I., Jansen, F. M., John, G. J., Krasting, P. J., Langenhorst, R. A., Legg, S., Liang, Z., McHugh, C., Radhakrishnan, A., Reichl, G. B., Rosati, T., Samuels, L. B., Shao, A., Stouffer, R., Winton, M., Wittenberg, T. A., Xiang, B., Zadeh, N., Zhang, R., 2019: The GFDL Global Ocean and Sea Ice Model OM4.0: Model Description and Simulation Features. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Volume 11, Issue 10 pp. 3167-3211
- Anthes, R. A., 1977: A cumulus parametrization scheme utilizing a one-dimensional cloud model, *Monthly Weather Review*, 105: pp. 270-286
- Bán, B., 2020: Új ALADIN-Climate modellszimuláció az RCP4.5 forgatókönyvvel A KEHOP-1.1.0 (KlimAdat) projekt második hatásvizsgálói konzultációs workshopja, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 22p
- Barcza, Z., Bartholy, J., Bihari, Z. Bozó, L., Czira T., Haszpra L., Horányi, A., Horváth E. S., Krüzselyi, I., Lakatos, M., Mészáros, R., Mika, J., Pálvölgyi, T., Pieczka, I., Pongrácz, R., Práger, T., Radics, K., Szentimrey, T., Szabó, P., Szépszó, G., Torma, Cs., 2011: Klímaváltozás, A Magyar Tudományos Akadémia és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke, Budapest, 281p
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Pieczka, I., André, K., Bogárdi, I., 2015: Érzékenységvizsgálatok a RegCM klímamoddellel a Kárpát-medence térségére, Kutatási beszámoló, Eötvös Lóránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék, Budapest, 14p
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Torma, Cs., Hunyady, A., 2006: A regionális éghajlatváltozás modellezése és a PRECIS klímamodell adaptálása. In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok – Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások. (szerk.: Weidinger, T.) OMSZ, Budapest, pp. 99–114.
- Bougeault, P., 1985: A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection. *Mon. Weather Rev.* 113, pp. 2108-2121
- Budyko, M. I., 1969: The effect of solar radiation variation on the climate of the Earth, *Tellus* 21: pp. 611–661.
- Christensen, J. H., Christensen, O. B., 2007: A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*, 81, pp. 7-30
- Coppola, E., Giorgi, F., 2005: Climate change in tropical regions from high-resolution time-slice AGCM experiments. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 131, pp. 3123-3145.
- Cox, P.M., Betts, R.A., Bunton, C.B., Essery, R.L.H., Rowntree, P.R., Smith, J., 1999: The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Clim. Dyn.*, 15, pp. 183–203.
- Csima, G., Horányi, A., 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* 112, 3–4, pp. 155–177.
- Csorvási A., Illy T., Sábitz J., Szabó P., Szépszó G., Zsebeházi G., 2016: A jövőre vonatkozó projekciók eredményeinek együttes kiértékelése, bizonytalanságok számszerűsítése. Projekt beszámoló, 51 p
- Davies, H. C., 1976: A lateral boundary formulation for multi level prediction models. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 102, pp. 405-418
- Davies, H. C., R. E. Turner, 1977: Updating prediction models by dynamical relaxation: An examination of the technique, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 103, pp. 225-245.
- Demory, M.-E., Berthou, S., Fernández, J., Srland, S. L., Brogli, R., Roberts, M. J., Vautard, R. 2020: European daily precipitation according to EURO-CORDEX regional climate models (RCMs) and high-resolution global climate models (GCMs) from the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). *Geoscientific Model Development*, 13(11), pp. 5485–5506.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F., 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137, pp. 553–597.

- Déqué M., Drevet C., Braun A., Cariolle D., 1994: The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics* 10, pp. 249-266
- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P. J., 1993: Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1 as coupled to the NCAR community climate model. NCAR technical note NCAR/TN-387+STR 72p
- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P. J., És Wilson, M. F., 1986: Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. NCAR Techn. Note NCAR/TN-275+STR. Boulder
- Dickinson, R.E., Errico, R.M., Giorgi, F., Bates, G.T., 1989: A regional climate model for the western United States. *Climatic Change*, 15: pp. 383–422.
- Emanuel K, A., 1991: A scheme for representing cumulus convection in large-scale models, *J. Atmos. Sci.* 48(21): pp. 2313-2335
- Faragó, T., Führer, E., Garbai, L., Iványi, Zs., Járó, Z., Jászay, T., 1991: Az éghajlat változékonysága és változása II, Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 204p.
- Fouquart, Y., Bonnel, B., 1980: Computation of solar heating of the Earth's atmosphere: A new parameterization. *Beitr. Phys. Atmos.*, 53, pp. 35–62.
- Gregory, D., Rowntree, P. R., 1990: A mass-flux convection scheme with representation of cloud ensemble characteristics and stability dependent closure. *Mon. Wea. Rev.*, 118, pp. 1483–1506.
- Grell, G., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations, *Mon. Weather rev.*, 121: pp. 764-787
- Giorgi, F., Mearns, L.O. 1991: Approaches to the simulation of regional climate change - A review. *Reviews Geophysics*, 29. pp. 191-216.
- Giorgi, F., Marinucci, M.R., Bates, G.T. 1993a: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 121. pp. 2794-2813.
- Giorgi, F., C. Jones G. Asrar, 2009: Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58:3.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C.A., Banks, H., Gregory, J.M., Johns, T.C., Mitchell, J.F.B., Wood, R.A., 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.*, 16, pp. 147–168
- Göndöcs, J., Breuer, H., Pongrácz, R., Bartholy, J., 2017: Városi hősziget meghatározásának lehetőségei a WRF modell felhasználásával. *Légkör* 62, pp 165-170.
- Göndöcs, J., Breuer, H., Pongrácz, R., Bartholy, J., 2017: Urban heat island mesoscale modelling study for the Budapest agglomeration area using the WRF model. *Urban Climate* 21, pp. 66-86
- Götz, G., 2004: A klímadinamika alapjai. Kézirat, Meteorológia tudományos Bizottság, Budapest, 40p
- Halenka, T., 2007: On the Assessment of Climate Change Impacts in Central and Eastern Europe - EC FP6 Project CECILIA. *Geophysical Research Abstracts*, 9, 10545.
- Harris, L. M., Durran, D. R., 2010: An idealized comparison of one-way and two-way grid nesting. *Monthly Weather Review*, 138(6), pp. 2174–2187.
- Hoffer, M. I., Callegari, A. J., és Hsieh C. T., 1980: The role of deep sea heat storage in the secular response to climatic forcing. *J Geophys. Res.*, 85, pp. 6667-6679.
- Holtlag, A., de Bruijn, E., and Pan, H.-L., 1990: A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Mon. Weather Rev.* 118, pp. 1561-1575.
- Horányi, A., Bartholy, J., Krüszelyi, I., Pieczka, I., Pongrácz, R., Szabó, P., Szépszó, G., Torma, Cs., 2011: A hazai regionális klímamodellek eredményeinek együttes kiértékelése, In: 36. Meteorológiai Tudományos Napok –Változó éghajlat és következményei a Kárpát-medencében. (szerk.: Lakatos, M.) OMSZ, Budapest, pp. 99–114.
- ICI Interaktív Zrt., 2013: Budapest XIII. kerület városi rendszereinek klímaváltozással szembeni sérülékenysége, 41p

- Illy, T., Sábitz J., Szépszó, G., 2015: Az ALADIN-Climate modellkísérletek eredményeinek validációja. Kutatási beszámoló, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 19 p.
- Illy, T., Szabó, P., Szépszó, G., Otto, J., Madsen, M.S., Christensen, O.B., Kämäräinen, M., Mäkelä, A., Ruosteenoja, K. 2017: Catalogue on CORDEX data provision, applicability and volume. DECM (C3S\_51\_Lot4) projekt D2.2 beszámoló, 74 p.
- IPCC, 2007a: Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (szerk.: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 946 p.
- Jacob, D., Podzun, R., 1997: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics* 63, pp 119–129.
- Jacob, D., Kotova, L., Lorenz, P., Moseley, C., Pfeifer, S. 2008a: Regional climate modelling activities in relation to the CLAVIER project. *Időjárás*, 112, pp. 141–153.
- Kalmár T., Pieczka, I., Pongrácz, R., 2018: A RegCM4.5 regionális klímamodell tesztelése: a hidrosztatikus és nem-hidrosztatikus közelítés szerepe különböző csapadéksémák alkalmazása, In: Aktuális környezeti problémák az időjárás és az éghajlat összefüggésében. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája, (szerk: Mészáros, R.), ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet Meteorológiai Tanszék, Budapest, pp 84-94.
- Kalmár T., Pieczka, I., Pongrácz, R., 2020: A sensitivity analysis of the different setups of the RegCM4.5 model for the Carpathian region, *International Journal of Climatology.*, 41, pp. 1180-1201.
- Kasahara, A., és Washington, W, M., 1971: General circulation experiments with six-layer NCAR model, including orography, cloudiness and surface temperature calculations. *J, Atmos. Sci.*, 28, pp. 657-701.
- Kiehl, J., Hack, G. B. Bonan, B. Boville, B. Briegleb, D. Williamson, P. Rasch., 1996: Description of NCAR community climate model (CCM3). NCAR technical note NCAR/TN-420+STR, pp. 152
- Manabe, S, Smagorinsky, J, and Holloway, J. L. Jr., 1965: Numerical Results from a Nine-Level General Circulation Model of the Atmosphere, *Monthly Weather Review*, 93(12) pp. 227-768.
- McGregor, J.L., Katzfey, J.J., Nguyen, K.C., 1995: Seasonally varying nested climate simulations over the Australian region. Third Int. Conference on Modelling of Global Climate Change and Variability, Hamburg, Germany
- Mesinger, F., 1981: Horizontal Advection Schemes of a Staggered Grid – An Enstrophy and Energy-Conserving Model. *Mon. Wea. Rev.*, 109, pp. 467–478.
- Mitchell, T. D., Carter, T. R., Jones, P. D., Hulme, M., New, M., 2004: A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). Working Paper 55. Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, UK.
- Molnár, G., Gyöngyösi A. Z., Gál, Tamás., 2017: A városi hősziget vizsgálata meteorológiai modell segítségével Szegeden. *Légekör* 61, pp. 130-135
- Morcrette, J.-J., Smith, L., Fouquart, Y., 1986: Pressure and temperature dependence of the absorption in longwave radiation parameterizations. *Beitr. Phys. Atmos.*, 59, pp. 455–469.
- Morcrette, J, J., 1989: Description of the Radiation Scheme in the ECMWF Model. Technical Memorandum, 165, ECMWF, 26 p
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S. K., van Vuuren, D.P., Carter, T.E., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, pp. 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., Dadi, Z., 2000: IPCC special report on emissions scenarios. Cambridge University Press, Cambridge.

- Nogherotto, R., Tompkins, A.M., Giuliani, G., Coppola, E., Giorgi, F., 2016: Numerical framework and performance of the new multiple-phase cloud microphysics scheme in RegCM4. 5: precipitation, cloud microphysics, and cloud radiative effects. *Geosci. Model Dev.*, 9(7): pp. 2533–2547.
- Noilhan, J. and Planton, S., 1989: A simple parametrization of land and surface processes for meteorological models'. *Mon. Weather Rev.* 117, 536-549.
- Parkinson, C. L., és Washington, W, M., 1979: A large scale numerical model of sea ice. *J. Geophys. Res.* 84, pp. 311-337
- Phillips, N, A., 1956: The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 82, pp. 123-164
- Pieczka, I., 2012: A Kárpát-medence térségére vonatkozó éghajlati scenáriók elemzése a PRECIS finom felbontású regionális klímamodell felhasználásával. Doktori értekezés, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest, (Témavezető: Bartholy J), 95p
- Pieczka, I., Pongrácz, R., Németh, P, Cs., Kalmár, T., 2019: Analysis of regional climate model simulations for Central Europe as a potential tool to assess weather-related air quality conditions. *International Journal of Environment and Pollution Volume 66 Nos. 1/2/3:* pp. 98-116
- Pongrácz R., Bartholy J., Pieczka I., Szabóné André K., 2015: Regionális klímamodellezés a Kárpát-medencére-Érzékenységvizsgálatok különböző csapadéksémák alkalmazására. In: Aktuális kutatások az ELTE Meteorológiai Tanszékén. Jubileumi kötet - 70 éves az ELTE Meteorológiai Tanszéke. (Pongrácz R., Mészáros R., Kis A., szerk.) Egyetemi Meteorológiai Füzetek, 26: pp. 76–81.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Pieczka, I., Szabóné André, K., 2016: RegCM szimulációkon alapuló éghajlati becslések eredményei. In: Kutatási és operatív feladatok meteorológusként. Az ELTE Meteorológus TDK 2016. évi Nyári Iskola előadásának összefoglalói. (Pongrácz, R., Mészáros, R. és Kis, A. szerk.) Egyetemi Meteorológiai Füzetek 27: pp. 125–133.
- Ricard, J.-L. and Royer, J.-F., 1993: A statistical cloud scheme for use in a AGCM. *Ann. Geophysicae* 11, pp. 1095-1115.
- Richardson, L.F. 1922: *Weather Prediction by Numerical Process.* Cambridge University Press, Cambridge. pp. XII+236.
- Roberts, M. J., Baker, A., Blockley, Ed. W, Calvert, D., Coward, A., Hewitt, T. H., Jackson, C, L., Kuhlbrodt, T., Mathiot, P., Roberts, D.C., Schiemann, R., Seddon, J., Vannière, B., Vidale, L. P., 2019: Description of the resolution hierarchy of the global coupled HadGEM3-GC3.1 model as used in CMIP6 HighResMIP experiments, *Geoscientific Model Development*, 12(12): pp. 4999-5028
- Rotárné Sz, Á, Homolya, E., Selmeczi, P., 2015: A klímaváltozás hatása az ivóvízbázisokra. Kutatási jelentés. MFGI, Budapest, 59p
- Sellers, W, D, 1969: A global climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system, *J. Appl. Meteor* 8, pp. 392–400.
- Semprner, A, J., és Chervin, R, M., 1988: A simulation of the global ocean circulation with resolved eddies. *J Geophys. Res.*, 93, pp. 15502-15522.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR, NCAR Technical Note, 125 p.
- Smith, R.N.B., 1990: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 116, pp. 435-460
- Somodi, I., Bede-Fazekas, Á., Lepesi, N., Czúcz, B., 2016: Természetes ökoszisztémák éghajlati sérülékenységeinek elemzése. Kutatási jelentés, MFGI, Budapest, 42p
- Sundquist, H., 1978: A parameterization scheme for non-convective condensation including precipitation including prediction of cloud water content. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 104, pp. 677–690.
- Szalai, S., Auer, I., Hiebl, J., Milkovich, J., Radim, T. Stepanek, P., Zahradnicek, P., Bihari, Z., Lakatos, M., Szentimrey, T., Limanowka, D., Kilar, P., Cheval, S., Deak, Gy., Mihic, D., Antolovic, I., Mihajlovic, V., Nejedlik, P., Stastny, P., 738 Mikulova, K., Nabyvanets, I., Skyryk, O., Krakovskaya, S., Vogt, J., Antofie, T., and Spinoni, J., 2013: Climate of the Greater Carpathian Region. Final 740 Technical Report.

- Szentimrey, T., Bihari, Z., Szalai, S., 2005: Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis (MISH). *Geophysical Research Abstracts* 7.
- 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 disszertáció, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, (Témavezető: Horányi) 160p
- Szépszó, G., Krüzselyi, I., Illy, T., Sábitz, J., 2015: Az ALADIN-Climate regionális klímamodell integrálási tartományának megválasztására vonatkozó érzékenységvizsgálat, Kutatási beszámoló, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 19p
- Szépszó, G., Csorvási, A., 2016: Az ALADIN-Climate modellszimulációk eredményei, In: A Balatonvízforgalmának a klímaváltozás hatására becsült változása, Kutatási jelentés, NAK, pp.65-75
- Szépszó, G., Illy, T., Szabó, P., 2016: A regionális klímamodellek eredményeinek utó-feldolgozása és a NATÉR számára szükséges paraméterek előállítására, Kutatási beszámoló, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 15p
- Thompson, S. L., és Schneider, S. H., 1979: A seasonal zonal energy balance climate model with an interactive lower layer. *J. Geophys. Res.*, 84, pp. 2414.
- Tiedtke, M., 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, pp. 1779–1800.
- Torma, Cs., Bartholy, J., Pongrácz, R., Barcza, Z., Coppola, E., Giorgi, F., 2008: Adaptation and validation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Időjárás* 112, pp. 233–247.
- Torma Cs., Coppola E., Giorgi F., Bartholy J., Pongrácz R. 2011: Validation of a high resolution version of the regional climate model RegCM3 over the Carpathian Basin. *Journal of Hydrometeorology*. 12. (No 1.), pp. 84-100.
- Torma, Cs., 2011: Átlagos és szélsőséges hőmérsékleti és csapadék viszonyok modellezése a Kárpát-medencére a XXI. századra a RegCM regionális klímamodell alkalmazásával. Doktori értekezés. ELTE, Budapest (témavezető: Bartholy, J.). 125 p.
- van den Besselaar, E.J.M., Haylock, M.R., van der Schrier, G., Klein Tank, A.M.G., 2011: A European Daily High-resolution Observational Gridded Data set of Sea Level Pressure. *J. Geophys. Res.* 116, D11110,
- van der Linden, P., Mitchell, J.F.B. (szerk.), 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter EX1 3PB, UK.
- Varga, Á. J., 2017: A WRF modell előkészítése regionális klimatológiai vizsgálatokhoz. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: dr. Breuer H.). 38 p.
- Varga, Á. J., Breuer, H., 2018: Regionális éghajlatmodellezés a WRF modell segítségével érzékenységvizsgálat. In: Aktuális környezeti problémák az időjárás és az éghajlat összefüggésében. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája, (szerk: Mészáros, R.), ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet Meteorológiai Tanszék, Budapest, pp 84-94.
- Varga, Á. J., 2019: A WRF mint regionális klímamodell adaptálása és érzékenységvizsgálata a Kárpát-medence térségére Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: dr. Breuer H.). 53 p.
- Varga, Á.J., Breuer, H. 2020: Sensitivity of simulated temperature, precipitation, and global radiation to different WRF configurations over the Carpathian Basin for regional climate applications. *Clim Dyn* 55, pp. 2849–2866
- Warrilow, D.A., Sangster, A.B., Slingo, A. 1986: Modelling of land surface processes and their influence on European climate. In: Tech. Note DCTN 38. Dynamical Climatology Branch, United Kingdom Meteorological Office.
- Wicker, L. J. and W. C. Skamarock, 2002: Time splitting methods for elastic models using forward time schemes, *Mon. Wea. Rev.*, 130, pp. 2088–2097.
- Webb, T., Wigley, T. M. L., 1985: What Past Climates Can Indicate about a Warmer World. In: *The Potential Climatic Effects of Increasing Carbon Dioxide*, US Dept. of Energy Washington D. C., pp. 235-257.

Zsebeházi, G., 2018: KlimAdat – Az éghajlatváltozás magyarországi hatásainak feltérképezése regionális klímamodellszimulációk elvégzésével és reprezentatív adatbázis fejlesztésével. A KEHOP-1.1.0 (KlimAdat) projekt nyitórendezvénye, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 25p

### **Internetes források**

[1 – met.hu]

[https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek\\_tanulmanyok/index.php?id=3011&hir=Atallas\\_az\\_1991%E2%80%932020-as\\_eghajlati\\_normalra](https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3011&hir=Atallas_az_1991%E2%80%932020-as_eghajlati_normalra) (letöltés ideje: 2021. 05. 02)