Eötvös Loránd Tudományegyetem Földrajz- és Földtudományi Intézet Meteorológiai Tanszék

# A Közép-Európában várható melegedés elemzése az új típusú sugárzási kényszer változásán alapuló forgatókönyvek felhasználásával

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

**Csorvási Anett** Meteorológus mesterszak, Éghajlatkutató szakirány

Témavezető:

Dr. Pongrácz Rita, adjunktus

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015

# Tartalomjegyzék

1. BEV	EZET	ÉS	3			
2. A KLÍMASZCENÁRIÓK ÉS A FELHASZNÁLT ADATBÁZISOK BEMUTATÁSA						
	2.1.	RCP klímaszcenáriók	5			
	2.2.	CMIP5 program	9			
	2.3.	E-OBS adatbázis	10			
3. A VIZSGÁLT GLOBÁLIS KLÍMAMODELLEK ÁTTEKINTÉSE						
	3.1.	BCC-CSM1.1 és BCC-CSM1.1-M	14			
	3.2.	HadGEM2	16			
	3.3.	NorESM1	17			
	3.4.	CanESM2	19			
	3.5.	CNRM-CM5	21			
	3.6.	GISS-E2-R	22			
	3.7.	GFDL-ESM	24			
	3.8.	BNU-ESM	26			
	3.9.	CMCC-CMS	28			
	3.10.	CSIRO-ACCESS CM	29			
	3.11.	CSIRO-Mk3.6.0	32			
	3.12.	EC-EARTH	33			
	3.13.	FIO-ESM	35			
	3.14.	INMCM4	38			
	3.15.	IPSL-CM5-LR/MR és IPSL-CM5B-LR	39			
	3.16.	MIROC	41			
	3.17.	MPI-ESM	44			
	3.18.	MRI-CGCM3	46			
	3.19.	NCAR-CESM1 és CCSM4	48			
4. EREDMÉNYEK						
	4.1.	A modellek validációs vizsgálata	51			
	4.2.	A becsült hőmérsékletváltozás elemzése	59			
	4.2.1.	Az egyes időszakokra kapott modelleredmények szcenáriónkénti összehasonlítása	60			
	4.2.2.	Az egyes időszakokra kapott modelleredmények együttes összehasonlítása	65			
	4.2.3.	Az egyes időszakokra országonként várható hőmérsékletváltozások	72			
5. ÖSS	5. ÖSSZEFOGLALÁS					
KÖSZ	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS					
FELHA	ASZNÁ	ALT IRODALOM	82			

#### 1. Bevezetés

A XXI. század egyre több szempontból vizsgált környezeti, gazdasági és társadalmi problémája a globális felmelegedés. Ennek oka, hogy ez egy szerteágazó probléma, mely többek között megmutatkozik az olvadó gleccserekben, a mezőgazdaságot érintő aszályokban (és ezzel együtt járó terméskiesésben), az egyre gyakoribb heves esőzésekben és árvizekben, a növekvő hőhullámokban vagy éppen az óceánok vízszintemelkedésében is (IPCC, 2013). Mivel az előbbiekben felsorolt problémák veszélyeztetik a mai, de leginkább a későbbi generációk életfeltételeit, szükséges a mielőbbi cselekvés, mely részben az alkalmazkodásban nyilvánul meg. Utóbbihoz viszont elengedhetetlen a Föld egyes pontjain a jövőben várható tendenciák minél pontosabb elemzése. Mindehhez a fizikai és dinamikai alapokon nyugvó kiindulást a globális és regionális klímamodellek teremthetik meg. Diplomamunkám ezzel a témakörrel kapcsolatban a Kárpát-medence és a közeli régiók országaiban a XXI. században várható középhőmérsékletek alakulásának elemzését tűzte ki célul, globális klímamodellek havi középhőmérsékleti outputjait felhasználva, az új RCP<sup>1</sup> klímaszcenáriók figyelembe vételével.

A vizsgálatokhoz azokat a modelleket használtam fel, melyeket a CMIP5<sup>2</sup> projekt keretein belül is széleskörűen vizsgáltak. A CMIP5 a csatolt óceán-légkör cirkulációs modellek összehasonlítására vonatkozó nemzetközi program ötödik szakasza. Fő céljai többek között a szénciklus és a felhőzet bonyolult visszacsatolásainak értelmezése, az éghajlat kiszámíthatóságának elemzése, valamint a klímamodellek azon képességének vizsgálata, hogy mennyire tudják az éghajlat alakulását évtizedes vagy még hosszabb időskálán előrejelezni (Meehl és Bony, 2011). Az ezekkel kapcsolatos vizsgálatokkal, eredményekkel az IPCC<sup>3</sup> Ötödik helyzetértékelő jelentése (IPCC, 2013) foglalkozik részletesen. Ebben már a négy új klímaszcenárió (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5) alapján készült jövőbeli tendenciák szerepelnek, amik a korábbi ún. SRES<sup>4</sup> emissziós szcenáriókat (A1, A2, B1, B2) váltották fel (Moss et al., 2010).

A dolgozatban ismertetendő eredményeimhez a CMIP5-ben is szereplő modellek közül 32 globális klímamodellt vettem alapul, melyeket különböző klímaszcenáriókra tekintettem. A vizsgálatokat egységesített interpolált rácsra végeztem 1,25°-os rácsfelbontással, az 5-30°

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Representative Concentration Pathway (RCP) - Reprezentativ koncentráció menet

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) - Csatolt modellek összehasonlító projektje

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - Éghajlat-változási Kormányközi Testület

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Special Report on Emission Scenarios (SRES) - Tematikus jelentés a kibocsátási forgatókönyvekről

keleti hosszúsági körök és az 54,18°-40,05° északi szélességi körök közötti területen. A számításokat három éghajlati normál időszakra vonatkozóan végeztem el, melyek a XXI. század közepét és végét, valamint az 1971-2000 referencia időszakot fedik le.

Az éghajlati becslések elkészítéséhez minden modellre 30 évre vonatkozó havi és évi középhőmérsékleti átlagokat és változásokat számítottam a referencia időszakhoz viszonyítva. A kapott eltérések átfogó értékeléséhez statisztikai próbát végeztem. A teljes vizsgált régión belül az egyes országokra fókuszáló részletesebb elemzésekhez, az alkalmazott régión belül megfelelő maszkokat készítettem az éghajlati információk leválasztásához.

A vizsgálatok során két nagy adatbázist használtam fel. A modellfuttatások hőmérsékleti eredményeit a CMIP5 interneten elérhető adatbázisából töltöttem le, a múltra vonatkozó validációs vizsgálatokhoz referencia adatként a rácsponti adatokat tartalmazó E-OBS adatbázisát használtam. A számításokat CDO<sup>5</sup>-val végeztem, majd ezt követően a térképes megjelenítést GrADS programmal, a grafikonokat pedig MS Excel szoftverrel készítettem.

A továbbiakban elsőként a felhasznált éghajlati forgatókönyvek fizikai alapjait ismertetem, majd a felhasznált adatbázisok legfontosabb ismérveit foglalom össze. Ezután a vizsgált modellek legfontosabb tulajdonságait, moduljait és parametrizációit részletezem, melyet kapott eredményeim kifejtése követ. Ennek során először a modellek múltbeli időszakára elvégzett validációs vizsgálatokat és eredményeiket mutatom be, majd térképek segítségével a klímamodellek által a vizsgált szcenáriók alapján prognosztizált évi és havi középhőmérséklet változásokat, illetve a több klímamodell által kapott együttes előrejelzéseket ismertetem. Ezek után pedig néhány kiválasztott országra bemutatom a GCM-ek különböző forgatókönyvekre vonatkozó eredményeit a XXI. században vizsgált két időszak évi és havi középhőmérsékleti viszonyait illetően. Legvégül a dolgozat legfontosabb eredményeinek rövid összegző értékelése következik.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Climate Data Operator (CDO) - Éghajlati adatfeldolgozó szoftver

### 2. A klímaszcenáriók és a felhasznált adatbázisok bemutatása

#### 2.1. RCP klímaszcenáriók

Az új reprezentatív koncentrációtrendek egy innovatív együttműködés eredményeként jöttek létre az éghajlati modellezők, a földi ökoszisztémák modellezői és a kibocsátásokat vizsgáló szakemberek közös munkájával. Mint már a bevezetőben említettem, az IPCC Ötödik helyzetértékelő jelentésében már ezen négy új klímaszcenárió (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5) alapján készült jövőbeli tendenciák jelennek meg, amik az SRES emissziós szcenárióknál (A1, A2, B1, B2) részletesebb információkat tartalmaznak az új generációs klímamodellek futtatásához (Moss et al., 2010). Mindez azért is fontos, mert az ilyen jellegű szcenáriók lehetővé teszik a hosszútávú klímavédelmi célok ún. "költség-haszon elvű" értékelését.

A korábban használt emissziós szcenáriók közös jellemzői között említhető, hogy a jövőképek a fejlődés globális, illetve regionális/lokális jellegéhez, valamint ipari, illetve környezetkímélőbb jellegéhez kötődnek. Mindegyikhez meghatározott demográfiai, társadalmi, gazdasági, technológiai, környezeti és politikai tendenciák tartoznak (Nakicenovic és Swart, 2000). Mivel azonban az éghajlat megváltozása nem közvetlenül a kibocsátástól, hanem az üvegházhatású gázok, aeroszol részecskék légköri felhalmozódásától, és az ebből fakadó energetikai kényszertől függ, új forgatókönyveket kezdtek kidolgozni, melyek elsősorban az előbbiekre fókuszálnak. Maga a név utal a legfontosabb tulajdonságokra. A "representative" arra, hogy a meglévő szcenáriók egy szélesebb csoportját képviseli, összeegyeztethető az összes többi szakirodalomban megtalálható emissziót vizsgáló szcenárióval. A "concentration" szó használata az emisszió helyett, hangsúlyozza, hogy a koncentrációt, mint az RCP-k elsődleges termékét, használják a klímamodellek bemeneti adataiként. Az új reprezentatív koncentráció menetek által meghatározott forgatókönyvek a 2100-ra kialakuló, W/m<sup>2</sup>-ben kifejezett energetikai kényszert fejezik ki. Mindegyik forgatókönyv az 1850-2100 közötti időszakra terjed ki, és az említett sugárzási kényszer becsléseire utal (van Vuuren et al., 2011):

- RCP8.5: 8,5 W/m<sup>2</sup>-nél nagyobb sugárzási kényszer éri a Földet 2100-ra, ami abból adódik, hogy 1370 ppm-et meghaladó mennyiségben lesz jelen a CO<sub>2</sub> a légkörben, s a koncentráció folyamatosan növekszik.
- RCP6.0: 6 W/m<sup>2</sup> sugárzási kényszernél stabilizálódás történik 2100 után, amely 850 ppm-es CO<sub>2</sub> szintnek felel meg.

- RCP4.5: 4,5 W/m<sup>2</sup> sugárzási kényszernél történik meg a stabilizáció 2100 után, az ehhez tartozó CO<sub>2</sub> szint 650 ppm.
- RCP2.6: a sugárzási kényszer 3 W/m<sup>2</sup> értékénél már 2100 előtt megtörténik a stabilizáció, ezután csökkenés következik, s 2100-ra a becsült sugárzási kényszer változása összességében már csak 2,6 W/m<sup>2</sup> lesz. A maximális 490 ppm-es CO<sub>2</sub> szint csúcspont is 2100 előtt jelentkezik.

Ezek közül az RCP2.6, RCP4.5 és RCP6.0 köztes forgatókönyveknek tekinthetők, melyek közül az RCP2.6 és RCP6.0 forgatókönyvek a primer energiafelhasználást körülbelül 750 EJra teszik 2100-ra, míg az RCP4.5 szcenárió megközelítőleg 900 EJ-ra, vagyis a mai értéknek nagyjából a duplájára. Az RCP8.5 ezzel szemben egy rendkívül energiaigényes szcenárió a nagyobb népességnövekedés és a kisebb mértékű technológiai fejlődés miatt. Az olaj felhasználása nagyjából változatlan szinten marad minden szcenárió esetén, kivéve az RCP2.6-ot, ahol csökkenés várható az energiahordozók kimerülése és a környezetbarát klímapolitika miatt. A nem-fosszilis energiahordozók felhasználása valamennyire növekszik minden szcenárió esetén, különösen a megújuló energiaforrásokra (szél, nap), bioenergiára és nukleáris energiára igaz ez. Ennek fő hajtóereje a növekvő energiaigény, a fosszilis tüzelőanyagok növekvő ára és a kedvező klímapolitika. Az RCP2.6 szcenáriónak fontos eleme a bioenergia felhasználás és az ún. széncsapdázás (Moss et al., 2010).

A sugárzási kényszer vizsgálata mellett az RCP-k fontos részét képezi a földhasználat valamint az üvegházhatású gázok és egyéb légköri szennyezőanyagok kibocsátása is. A földhasználat számos különböző módon befolyásolja az éghajlati rendszert. Ezek között említhetünk hidrológiai, biogeofizikai hatásokat (mint például az albedó vagy a felületi érdesség változása), valamint a növényállomány méretét (a légköri CO<sub>2</sub> kivonás miatt) (van Vuuren et al., 2011). Fontos tehát, hogy a felszínt szántó, fű (legelő) vagy egyéb vegetáció borítja-e. Az elmúlt 100 évre vonatkozóan megállapítható, hogy a szántók és füves területek aránya nőtt, míg az egyéb vegetációé csökkent. A jövőbeli tendenciák alakulására a különböző szcenáriók alapján nyerhetünk információt, melyet az 1. ábra mutat be. A grafikonok alapján láthatóan az RCP8.5 szcenárió növekedést feltételez a szántók és a legelők kiterjedésében, amit elsősorban a növekvő globális népesség vált ki. A szántók kiterjedésére az RCP2.6 szcenárió esetén is növekedés becsülhető a növekvő bioenergia termelés miatt, miközben a füves területek arányában nem mutat változást. Az RCP6.0 szcenárió pedig a szántóföldek növekedését, ugyanakkor a legelők területének csökkenését valószínűsíti. Végül az RCP4.5 szcenárió foldhasználatban a globális

klímapolitika miatt, mely eredményeként a szántók és füves területek aránya csökkenni fog, így a vegetációé növekedni (van Vuuren et al., 2011).



1.ábra: A földhasználat változás alakulása az RCP klímaszcenáriók alapján (van Vuuren et al., 2011). A szürke terület a szcenáriók 90. percentilisét jelzi. A vegetáció foglalja össze azokat a területeket, amelyek nem szántók és nem emberi felhasználású szántóterületek.

A földhasználat mellett az éghajlat alakulásában nagyon fontos szerepe van az üvegházhatású gázok koncentráció változásának is. Az erre vonatkozó becsléseket a 2. ábrán látható kibocsátási tendenciákból becsülhetjük.



2.ábra: A fontosabb üvegházhatású gázok antropogén kibocsátása az RCP klímaszcenáriók becslései szerint (van Vuuren et al., 2011). A világosszürke terület a 98. percentilist, a sötétszürke pedig a 90. percentilist jelöli. A szaggatott vonalak a korábbi SRES szcenáriókat mutatják.

A CO<sub>2</sub> kibocsátásában a század végéig becsült folyamatos növekedés csak az RCP8.5 forgatókönyvnél figyelhető meg, a többi szcenárió esetén eltérő időponttól kezdődő csökkenés várható. Az RCP8.5 estében 30 Gt-nál várható a kibocsátás tetőzése, ami 2000-hez képest több mint háromszoros növekedést jelent. Az RCP6.0 esetében a század végére a csökkenés ellenére is a 2000. évi kiinduláshoz képesti 10 Gt növekedés várható, míg az RCP4.5 és az RCP2.6 szcenáriók bekövetkezése esetén várhatóan 5 Gt-ra, illetve 0 Gt-ra csökkenne a szénkibocsátás. A CH<sub>4</sub> emisszióját tekintve is hasonló általános tendenciák fogalmazhatók meg. Az RCP8.5 esetében további jelentős növekedés várható megközelítően 600 Tg növekedéssel a 2000. évi kiindulási értékhez képest. A többi szcenárió esetében pedig vagy stagnálás, vagy pedig csökkenés várható a század végére a kibocsátásban. A N<sub>2</sub>O estében az

RCP8.5 és az RCP6.0 szcenáriónál is növekedésre lehet számítani, de nem olyan jelentős mértékben, mint a többi üvegházgáznál. Az RCP4.5 és az RCP2.6 forgatókönyveknél pedig csak stagnálás várható a kibocsátásban, csökkenés nem (van Vuuren et al., 2011). Az emissziós menetekhez hasonló képet mutatnak a koncentrációs görbék is, melyeket a 3. ábra mutat be.



3.ábra: Üvegházgázok várható jövőbeli koncentráció változásai (van Vuuren et al., 2011). A világos- és sötétszürke területek a 98. és 90. percentilist jelölik.

Az üvegházhatású gázok mellett fontos szerepe van még a légszennyező gázok közül a SO<sub>2</sub>-nak és az NO<sub>x</sub>-nak is, melyek főleg a helyi levegőminőséget határozzák meg. Ezek várható kibocsátásának alakulása a 4. ábrán látható. A becslések alapján egységesen minden forgatókönyvre igaz, hogy a kibocsátás valószínűsíthetően csökkenni fog a kiindulási szinthez képest, ami főleg a jelenlegi és jövőben várható további környezetvédelmi szabályozásoknak köszönhető.



4.ábra: SO<sub>2</sub> és NO<sub>x</sub> kibocsátás várható alakulása az RCP klímaszcenáriók szerint (van Vuuren et al., 2011). A szürke terület a 90. percentilist jelöli, a szaggatott vonalak pedig az SRES szcenáriókat.

Összességében megállapítható, hogy az új klímaszcenáriók a földhasználatra, a légköri kibocsátásokra és a koncentráció változások vizsgálatára vonatkozóan integráltan értékelt modelleredményeket használnak fel, melyek összhangban vannak az eddigi megfigyelésekkel is. Az RCP szcenáriók alapvetően abban térnek el a korábbi forgatókönyvektől, hogy olyan

további kiegészítéseket tartalmaznak, melyek lehetővé teszik az éghajlat modellezését akár 2300-ig is (van Vuuren et al., 2011). Az RCP-k fontos fejlődést jelentenek a klímakutatásban, s egyben potenciális alapot is a további kutatásokhoz, a kibocsátás mérsékléséhez és a hatáselemzéshez.

#### 2.2. CMIP5 program

A CMIP5 a csatolt modellek összehasonlítására vonatkozó nemzetközi projekt ötödik szakasza. A program a CLIVAR<sup>6</sup> nemzetközi kutatási program keretei közt működő WCRP<sup>7</sup> részeként valósult meg, a Meteorológiai Világszervezet támogatásával. A vizsgálatok eredményeit az IPCC Ötödik helyzetértékelő jelentésében publikálták (Hurrel et al., 2011).

A WCRP-n belül a WGCM<sup>8</sup> munkacsoportban mintegy 20 modellező csapat vett részt. A CMIP5 szükségessége az IPCC Negyedik helyzetértékelő jelentés készítése során fogalmazódott meg, amikor egyértelművé váltak a CMIP3 információiból adódó hiányosságok. 2006 közepén több tudományterület (éghajlattan, biogeokémia, hatások és alkalmazkodásokkal foglalkozó gazdasági és társadalomtudományok) képviselőivel egy Aspenben tartott munkaértekezleten megfogalmazták a CMIP5 alapvető célkitűzéseit. Ezek között szerepelt a hosszabb és rövidebb távú éghajlati becslések készítése, valamint további kísérletek a biogeokémiai visszacsatolások jobb modellezésére (Meehl és Bony, 2011). Ezen kívül fontosnak tartották a fizikai folyamatok visszacsatolási mechanizmusainak nagyobb mértékű tanulmányozását is, különösen a felhőkkel és nedvességgel kapcsolatosan. Annak érdekében, hogy felhőkkel kapcsolatos modellszimulációs eredményeket а а megfigyelésekkel jobban össze lehessen vetni, szorgalmazták műholdas mérések felhasználását is.

A CMIP3-mal összehasonlítva alapvető különbség a CMIP5-ben a rövid (near-term) és hosszú (long-term) távú éghajlati szimulációk megjelenése. Utóbbiak jellemzője, hogy nem csak a hagyományos klímamodelleket (AOGCM<sup>9</sup>, ESM<sup>10</sup>) használja fel, hanem újabb komplex rendszerszemléletű modelleket is. Ezek a szénciklust biogeokémia hozzáadásával zárják le, illetve vannak olyan komponenseik is, amelyek képesek szimulálni levegőkémiai változásokat és rekonstruálni a légköri aeroszol részecskék légkörbe való bekerülési és légkörből való kikerülési folyamatait (Stouffer et al., 2011).

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Climate Variability & Predictability (CLIVAR) - Éghajlati változékonyság és előrejelezhetőség

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> World Climate Research Programme (WCRP) - Világméretű Klímakutató Program

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Working Group on Coupled Models (WGCM) - Csatolt modellekkel foglalkozó munkacsoport

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Atmosphere-Ocean General Circulation Model (AOGCM) - Általános légkör-óceán cirkulációs modell

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Earth System Model (ESM) - Komplex Föld-rendszer modell

#### 2.3. E-OBS adatbázis

Ez az adatbázis napi megfigyelésekből származó rácsponti adatsorokat tartalmaz Európa szárazföldi részére vonatkozóan. Az adatbázis a 25°-75° északi szélességi körök és 40° nyugati és 75° keleti hosszúsági körök közötti területre terjed ki. Kétféle rácstípussal és azokon belül két-két rácsfelbontással érhető el. Az egyik 0,22°-os és 0,44°-os elforgatott rács, a másik pedig 0,25°-os és 0,50°-os felbontású szabályos rácsháló. A jelenlegi 10.0-s verzió 1950-2014 időszakra érhető el öt változóra (minimumhőmérséklet, átlaghőmérséklet, maximumhőmérséklet, csapadékmennyiség és tengerszinti légnyomás). Az adatbázis létrehozásának fő célja az volt, hogy a korábban rendelkezésre álló interpolált adatok térbeli és időbeli felbontását javítsák (Haylock et al., 2008). Ezt úgy végezték el, hogy az állomáshálózat napi éghajlati megfigyelései alapján minden rácsponti adatsor a lehető legjobb becslését adja a rácspont által reprezentált teljes térbeli cella átlagának kiszámításához (ahelyett, hogy pontbeli értékeket határoznának meg). Ezeknek az interpolált adatoknak a jelentősége többek között abban áll, hogy lehetővé teszik a megfigyelő állomásoktól távol eső területek éghajlati változóinak és klímájának becslését is. Másrészt hozzájárulnak az éghajlatváltozás regionális és nagyobb léptékű monitorozásához is, például területi átlagokra vonatkozó indexek bevezetésével. Ilyen például a Közép-Angliai hőmérsékleti idősor, amit akár a globális léptékű hőmérsékletváltozás indikátorának is tekinthetünk (Parker és Horton, 2005). Az E-OBS adatbázisnak fontos szerepe van a regionális klímamodellek validálásában, és ezáltal a regionális éghajlatváltozás tanulmányozásában is.

Az adatgyűjtésben a Holland Királyi Meteorológiai Intézet vezetésével az Európai Éghajlat Értékelő és Adatgyűjtő Központ (ECA&D) vesz részt. Kezdetben csak 250 állomás napi adataiból álló adatsor állt rendelkezésre 50 évre vonatkozóan, ami viszont még nem volt elegendő finomabb térbeli felbontású vizsgálatokhoz. Ideális esetben a 25 km-es rácsfelbontás eléréséhez Európában 16 000 állomás adataira lenne szükség, ami nyilvánvalóan nem megvalósítható. Ezért vált kiemelkedően fontossá az elérhető adatok lehető legjobb térbeli interpolációja (Haylock et al., 2008). Több nemzetközi összefogás eredményeként mára az állomások száma a kezdeti 250-ről mintegy 2316-ra nőtt, s folyamatosan nő (habár az ideálistól még mindig messze van). A legnagyobb az állomássűrűség Nagy-Britanniában, Hollandiában és Svájcban, illetve néhány állomás adatai még Észak-Afrikából is rendelkezésre állnak.

Az adatsorokban olykor előfordulnak minőségi problémák. Például a napi csapadék kevesebb, mint 0 mm, vagy több mint 300 mm; a hőmérséklet 60 °C-nál magasabb; a napi minimumhőmérséklet magasabb, mint a napi maximumhőmérséklet; több mint 10 egymást

követő napon ugyanolyan (nem-nulla) értékű napi csapadékösszeg fordult elő. A csapadékra vonatkozóan ezeket az egyértelműen hibás vagy gyanús értékeket újból ellenőrzik. A hőmérséklet kiugró értékeit pedig az elvégzett statisztikai próba eredményétől függően eltávolítják (Haylock et al., 2008).

Fontos része a napi adatokat tartalmazó adatbázis összeállításának az interpoláció bizonytalanságának becslése, mely az adatsorok standard hibáját adja meg. Ennek a bizonytalanságnak alapvető oka a térbeli interpoláció alkalmazása. A hőmérséklet esetében Folland et al. (2001) javaslata alapján ez a hiba 0,2 °C. A térbeli interpoláció nagy hatással van a szélsőségek magnitúdójára is. Haylock et al. (2008) kimutatták, hogy az extrémumok legnagyobb simítása a napi anomáliák interpolációjánál lép fel.

### 3. A vizsgált globális klímamodellek áttekintése

A vizsgálatokhoz kapcsolt légkör-óceán általános cirkulációs modellek és komplex Földrendszer modellek outputjait használtam fel. Az előbbiek az általános cirkulációs modellek csoportjába tartoznak, melyek a háromdimenziós térben zajló mozgásokat írják le. Ezeknek két alapvető összetevője a légköri (AGCM) és az óceáni általános cirkulációs modell (OGCM). A légköri modell hasonló az időjárás előrejelzésben alkalmazott numerikus modellekhez, de az előrejelzések nem néhány napra, hanem néhány évtizedre, néhány évszázadra történnek. A teljes modell a légköri és óceáni komponens mellett, földfelszíni és tengeri jég modellt is tartalmaz. A légköri cirkulációs modellek figyelembe veszik a földfelszín és a krioszféra kapcsolódását az atmoszférával egy háromdimenziós térben. Az óceáni cirkulációs modell egy háromdimenziós megfeleltetése az óceánnak és a tengeri jégnek, ahol figyelembe veszik az óceán örvénylését és a hőmérsékleti, valamint sókoncentrációs viszonyokat. A légkör és a világóceán modelljeinek belső tulajdonsága a kaotikus szabad változékonyság, amelynek az értéktartománya a fizikailag megengedett összes állapotra kiterjed. Az 1960-as évek végén a pontosabb eredmények érdekében összekapcsolták a légköri és az óceáni modelleket, így létrehozva a kapcsolt légkör-óceán általános cirkulációs modelleket (AOGCM) (Bryan, 1969; Manabe, 1969).

A komplex Föld-rendszer modelleket főként klímarekonstrukciókra és a jövőbeli klíma meghatározására használják. Ezek a modellek - mint ahogy a nevük is mutatja - a Földet alkotó rendszerek (légkör, óceán, krioszféra, szárazföldi és tengeri bioszféra) közötti kapcsolatokat veszik figyelembe, vagyis az előbbiekben felsoroltak mellett tartalmaznak szárazföldi és óceáni biogeokémiai ciklust is. Emellett bele vannak építve a rendszerre ható külső, klímát befolyásoló hatások is (vulkánkitörések, beérkező napenergia). Az ezek közötti kapcsolatokat a köztük fennálló egyenletek adják meg.

Az 1. táblázat foglalja össze az elemzésekhez felhasznált modell szimulációk legfontosabb információit: milyen típusú modell, milyen rácsfelbontással, milyen szcenáriókra lett futtatva, mely országokban és mikor fejeződtek be a futtatások.

Modell jelölése, modell rövid neve	Modell típusa	Rácsfelbontás (fok)	Fejlesztő ország, futtatás éve	Modellfuttatás időszaka	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
BCC-CSM1.1 (B1)	ESM	2,8	Kína, 2011	2006.01-2099.12	Х	X	Х	X
HadGEM2-ES (H1)	ESM	1,8	Nagy-Britannia, 2009	2005.12-2099.11	x	x	x	x
NorESM1-M (NO1)	ESM	2,5	Norvégia, 2011	2006.01-2100.12	х	Х	х	X
CanESM2 (CA)	ESM	2,8	Kanada, 2010	2006.01-2100.12	х	х		х
CNRM-CM5 (CN)	AOGCM	1,4	Franciaország, 2010	2006.01-2100.12	х	х		х
GISS-E2-R (GI)	ESM	2,5	USA, NASA, 2011	2006.01-2100.12	х	х		х
GFDL-ESM2G (GF1)	ESM	2,5	USA, NOAA, 2012	2006.01-2100.12	Х	Х		Х
BCC-CSM1.1-M (B2)	ESM	1,125	Kína, 2011	2006.01-2100.12		Х		Х
BNU-ESM (BN)	ESM	2,8	Kína, 2011	2006.01-2100.12		Х		Х
CMCC-CMS (CM)	AOGCM	1,8	Olaszország, 2009	2006.01-2100.12		Х		Х
CSIRO-ACCESS1-0 (CS1)	ESM	1,8	Ausztrália, 2011	2006.01-2100.12		x		x
CSIRO-ACCESS1-3 (CS2)	ESM	1,8	Ausztrália, 2011	2006.01-2100.12		x		x
CSIRO-Mk3-6-0 (CS2)	AOGCM	1,8	Ausztrália, 2009	2006.01-2100.12		Х		х
EC-EARTH (E)	ESM	1,125	Európa, 2010	2006.01-2100.12		X		Х
FIO-ESM (F)	ESM	2,8	Kína, 2011	2006.01-2100.12		х		х
GFDL-ESM2M (GF2)	ESM	2,5	USA, NOAA, 2011	2006.01-2100.12		х		х
HadGEM2-AO (H2)	AOGCM	1,8	Korea, 2009	2006.01-2099.12		х		х
HadGEM2-CC (H3)	ESM	1,8	Nagy-Britannia, 2010	2005.12-2099.12		x		x
INMCM4 (I)	ESM	2,0	Oroszország, 2009	2006.01-2100.12		х		х
IPSL-CM5A-LR (IP1)	ESM	3,75	Franciaország, 2010	2006.01-2100.12		х		х
IPSL-CM5A-MR (IP2)	ESM	2,5	Franciaország, 2010	2006.01-2100.12		Х		х
IPSL-CM5B-LR (IP3)	ESM	3,75	Franciaország, 2010	2006.01-2100.12		х		х
MIROC-5 (MI1)	AOGCM	1,4	Japán, 2010	2006.01-2100.12		Х		х
MIROC-ESM (MI2)	ESM	2,8	Japán, 2010	2006.01-2100.12		х		х
MIROC-ESM-CHEM (MI3)	ESM	2,8	Japán, 2010	2006.01-2100.12		x		x
MPI-ESM-LR (MP1)	ESM	1,8	Németország, 2009	2006.01-2100.12		X		Х
MPI-ESM-MR (MP2)	ESM	1,8	Németország, 2009	2006.01-2100.12		Х		х
MRI-CGCM3 (MR)	AOGCM	1,125	Japán, 2011	2006.01-2100.12		х		х
NCAR-CESM1-BGC (N1)	ESM	1,25	USA, NCAR, 2010	2006.01-2100.12		x		x
NCAR-CESM1-CAM5 (N2)	ESM	1,25	USA, NCAR, 2010	2006.01-2100.12		x		x
NCAR-CCSM4 (N3)	ESM	1,25	USA, NCAR, 2010	2006.01-2100.12		х		х
NorESM1-ME (NO2)	ESM	2,5	Norvégia, 2012	2006.01-2102.12		X		X

1.táblázat: A CMIP5 keretében vizsgált modellek legfontosabb sajátosságai, "x" jelöli, hogy adott modell eredményei milyen szcenáriókra állnak rendelkezésre.

# 3.1. $BCC-CSM1.1^{11}$ és BCC-CSM1.1-M

A BCC-CSM1.1 a Pekingi Éghajlati Központ, Éghajlati Rendszer Modelljének 1.1-es változata, melyet a Kínai Meteorológiai Központtal közösen fejlesztettek ki. Ez a modell a kapcsolt globális éghajlat-szénciklus modellek közé sorolható, mely tartalmazza a változó vegetációt és a globális szénciklust is. Légköri komponense a BCC\_AGCM2.1<sup>12</sup>, az óceáni a MOM4-L40<sup>13</sup>, a földfelszíni a BCC\_AVIM1.0<sup>14</sup> és a tengeri jég komponense pedig a SIS<sup>15</sup>. Ezek a modulok egymással kapcsolatban állnak a momentum-fluxus, energiaátadás, víz-és szénciklus útján. A légkör és az óceán közötti információcserét naponta egyszer végzi a modell, míg a légkör és a földi bioszféra közötti szén-dioxid kicserélődést minden egyes 20 perces időlépcsőre meghatározza (Wu, 2012). A CMIP5-ben is részt vett modell előrejelzései szerint az elkövetkező 10-30 évre egy melegedő trend fogja jellemezni a globális felszíni hőmérsékletet (Gao et al., 2012).

A modell finomabb felbontású változata a BCC-CSM1.1-M, mely légköri modelljének komponense a BCC\_AGCM2.2 T106-os vízszintes felbontással és 26 vertikális szinttel rendelkezik, ugyanígy felszíni modellje a BCC\_AVIM1.0 is. Az óceáni és a tengeri jég komponenst is a másik modellhez hasonlóan a MOM4-L40 és SIS modellek alkotják, de eltérő óceáni topográfiai felbontással, mint a BCC-CSM1.1 esetében. Mind az óceáni mind a tengeri jég modell tripoláris rácsot használ, melyben a szélességi körök szerinti felbontáss 1°, a meridionális felbontás pedig 1/3° a 10° É és 10° D szélességek között, míg a 30° É és 30° D szélességektől a sarkokig 1°-os felbontású. BCC-CSM1-M modell szintén részt vett a CMIP5 projektben (Flato et al., 2013). A következőkben az egyes almodellek legfőbb tulajdonságait ismertetem.

BCC\_AGCM 2.1: a BCC-CSM1-1 légköri modelleje, melyben egy új gomolyfelhő konvektív sémát alkalmaznak, melynek alapja a tömeges felhő megközelítés. Eszerint mély konvekció indul a maximális nedvesség tartalom szintjén a határréteg teteje felett, ami akkor váltódik ki, ha rendelkezésre áll pozitív konvektív potenciális energia (CAPE), és a levegő relatív páratartalma, illetve az emelési szinten a konvektív felhőzet több mint 75%. A konvektív tömegfeláramlást, száraz statikus energiát, nedvességet, a felhő folyékony víztartalmát és a lendületet is parametrizálták ezzel az

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM) - Pekingi Éghajlati Központ éghajlati rendszer modellje

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Beijing Climate Center Atmosphere Generation Circulation Model (BCC-AGCM) - Pekingi Éghajlati Központ általános légköri cirkulációs modellje

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Modular Ocean Model (MOM) - Moduláris óceáni modell

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Beijing Climate Center Atmosphere-Vegetation-Interaction Model (BCC-AVIM) - Pekingi Éghajlati Központ légkör és vegetácició közötti kölcsönhatást leíró modellje

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Sea Ice Simulator (SIS) - Tengeri jég szimulációs modell

egydimenziós felhő modellel (Wu, 2012). A modellben a szén-dioxid prognosztikai változóként szerepel, nem passzív nyomjelző, amit az energia háztartási egyenlet alapján számolnak, mint a globális integrált szén-dioxid kibocsátás és a felszín és óceán közötti interaktív szén-dioxid fluxus függvényét. A modell horizontális spektrális felbontása T42 ( $2,8^{\circ} \times 2,8^{\circ}$ ), a felszínkövető vertikális szintek száma pedig 26 (a legfelső szint 2,914 hPa-on) (Flato et al., 2013).

- BCC\_AGCM2.2: a BCC\_CSM1.1-M klímamodell légköri modellje. A modell elkészítését a regionális klíma szimulációk alkalmazásában kapható jobb eredmények motiválták. Az ebben megjelenő különbségek a korábbi változathoz képest egyrészt a jobb horizontális felbontás (T106) 1° × 1°-os rácstávolsággal, illetve, hogy a kezdeti folyamat adott a kimenetek pedig az operatív előrejelző rendszer által frissülnek (Flato et al., 2013).
- BCC\_AVIM1.0: a légkör és a vegetáció közötti interakción alapuló modell, mely három almodult foglal magába: biogeofizikai, ökofiziológiai és talaj szén-nitrogén dinamikai modult (Ji, 1995). A módosított biogeofizikai keret tíz talajréteggel és legfeljebb öt hóréteggel majdnem ugyanaz, mint az NCAR<sup>16</sup> Community Land Model 3.0 verziójában (Oleson et al., 2004), csak mivel a hóborítottság frakciót (SCF) a CLM3 alulbecsli, ezért ezt javították ebben a változatban. A modellben a földi szénciklus egy sor biokémiai és élettani folyamaton keresztül működik. Az integrációs időlépcső a vegetáció fotoszintézisére 20 perc, a biomassza akkumulációjára, és a talajban a szén bomlásának folyamataira 24 óra. A modell továbbfejlesztett változatában megjelenik a növényzet fenológiai tulajdonságainak környezettől való függése, a talaj karakterisztikája és a talajnedvesség függése a küszöbhőmérsékletektől (olvadás, fagyás).
- MOM4\_L40: globális óceáni általános cirkulációs modell (OGCM) hárompólusú ráccsal. A vízszintes felbontása 1°, a meridionális felbontása pedig 1/3° a 10° É és 10° D szélességek között, míg a 30° É és 30° D szélességektől a sarkokig 1°-os felbontású. 40 vertikális szintet tartalmaz, melyből 20 szint az óceán felszíne és a 200 m-es mélység között helyezkedik el (Murry, 1996). A MOM4 elnevezésből a 4-es utal rá, hogy a moduláris óceáni modell (MOM) 4-es verziója, melyet az amerikai Geofizikai Folyadékdinamikai Laboratórium dolgozott ki. Az utóbbi években történt új

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> National Center for Atmospheric Research (NCAR) - Amerikai Nemzeti Légkörkutató Központ

fejlesztések révén változott a modell felbontása, topográfiai tulajdonságai, megjelent a szénciklus és növekedett a kimeneti változók száma.

 SIS: ez egy globális dinamikai-termodinamikai tengeri jég modell, mely a rugalmasképlékeny-plasztikus módszert használja a jég belső feszültségeinek kiszámításához (Hunke, 1997). Horizontális felbontása ugyanaz, mint a MOM4-L40-nek. A modell három vertikális réteget tartalmaz, minden rácsra a tengeri jég öt kategóriáját különbözteti meg a jégvastagság alapján. Figyelembe veszi az átalakulást egyik kategóriából a másikba termodinamikai és dinamikai feltételek mellett. Kiszámítja többek között a tengeri jég koncentrációját, vastagságát, hőmérsékletét, sótartalmát és mozgásait is (Wu és Wu, 2004).

### 3.2. HadGEM2<sup>17</sup>

A HadGEM modellcsalád második generációját képviseli ez a modell. Tartalmaz kapcsolt légkör-óceán konfigurációt és komplex Föld-rendszer konfigurációt is, amely magában foglalja a szárazföldi és óceáni ökoszisztémákat, valamint a levegőkémiát is, illetve néhány modell a sztratoszférára is kiterjedő vertikális felbontással bír. Az ökoszisztéma komponensek elsősorban a szénciklus és az éghajlattal történő kölcsönhatások vizsgálatára irányulnak. Az óceáni biogeokémiai modellje lehetővé teszi a műtrágya használat és az óceánok szén felvétele közötti visszacsatolás értelmezését. A levegőkémiai modell által modellezhetővé válik, hogyan befolyásolja a troposzférikus levegőkémia a sugárzási kényszert a metánon és az ózonon keresztül, és hogyan befolyásolja a kén-dioxid kibocsátás a szulfáttá alakulást (Collins et al., 2011).

A CMIP5 projekt keretében is felhasználták ezeknek a klímamodelleknek az eredményeit. A standard légköri komponense 38 szintre tejed ki, mintegy 40 km-es magasságig. Horizontális felbontása 1,25° a szélességi körök és 1,875° a hosszúsági körök mentén, így mindösszesen 192 × 145 rácspontot tartalmaz. Ez a felszínen nagyjából 208 km × 139 km felbontásnak felel meg az Egyenlítőnél, és 120 km × 139 km felbontásnak az 55° szélességtől. A modell vertikálisan bővített változata 60 magassági szintet tartalmaz, és 85 km-ig terjed ki. Ez utóbbit a sztratoszférikus folyamatok és ezek globális klímára gyakorolt hatásának vizsgálatára használják. Az óceáni komponens szélességi és hosszúsági felbontása egyaránt 1° a sarkok és a 30° szélesség között, majd az Egyenlítő felé lecsökken 1/3°-ra. Tehát a modell mindösszesen 360 × 216 rácspontot tartalmaz 40 vertikális szinten (Collins et al., 2008). Az

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Hadley Centre Global Environment Model version 2 (HadGEM2) - Hadley Központ globális környezeti modelljének második verziója

általam használt modelleredmények a HadGEM2-AO, HadGEM2-CC és a HadGEM2-ES modellektől származnak, melyek fontosabb jellemzői az alábbiakban foglalhatók össze.

- HadGEM2-AO: tartalmaz a légköri komponens mellett óceáni és tengeri jégre vonatkozó modellt is, mely így a légkör-óceán csatolt (AO) konfigurációt alkotja. Légköri modellje a HadGAM2, mely 1,875°-os a hosszúsági körök és 1,25° a szélességi körök mentén 60 vertikális szinttel, melyek közül a legfelső 84 132 m-en található. Nem tartalmaz levegőkémiai modellt és óceáni biogeokémiai modellt sem. Felszíni modellt, tengeri jégre vonatkozót és óceánit viszont igen, melyek 1,875° × 1,25° horizontális felbontásúak.
- HadGEM2-CC: előbbi modell kiegészül a szénciklus folyamataival, így létrehozva a kapcsolt szénciklus (CC) modellt. Almodelljeinek jellemzői megegyeznek a HadGEM2-AO esetében ismertetettekkel, de azzal ellentétben tartalmaz levegőkémiai modellt és óceáni biogeokémiai modellt is.
- HadGEM2-ES: az előbbieket kiegészítve troposzférikus kémiai folyamatokkal, kapjuk meg a teljes komplex Föld-rendszer modellt. Légköri modellje ennek is a HadGAM2, mely felbontása megegyezik az előzőekkel, de a vertikális szintek száma csak 38, a legmagasabb szint pedig 39 254 m magasságban található. Tartalmaz levegőkémiai, óceáni biogeokémiai, tengeri jég modellt és felszíni modellt is. Óceáni modelljének felbontása az előzőektől eltérően 1° × 1° a sarkok és a 30° szélességek között, az Egyenlítő térségében pedig 1/3°. Vertikális szintjeinek száma 40, melyek közül a felszínhez legközelebbi szint a felszíntől 5 m mélységben található (Flato et al., 2013).

#### 3.3. NorESM1

A Norvég Éghajlati Központ és az NCAR által közösen kifejlesztett komplex Földrendszer modell, mely a CCSM4<sup>18</sup> klímamodellen alapul, azonban eltérés van például abban, hogy a norvég modell óceáni komponense izopiknikus koordinátát használ, és magasabb szintű a levegőkémiai kölcsönhatások leírása a légköri modellben. A földfelszíni és a tengeri jég modellek megegyeznek a CCSM4-beliekkel, annyi eltéréssel, hogy a norvég modell a hó és jég felületeken történő korom és ásványi por lerakódásokat a légköri komponensben számítja (Bentsen et al., 2013). A dolgozatban vizsgált két modell a NorESM1-M és a NorESM1-ME, melyek közötti fő különbség, hogy utóbbi klímamodell tartalmaz óceáni

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Community Climate System Model version 4 (CCSM4) - Közösségi éghajlati rendszer modell negyedik verziója

biogeokémiai komponenst is a megszokott légköri, óceáni, földfelszíni és tengeri jég modellek mellett.

- CAM4-Oslo: A légköri modellben megtartották az NCAR légköri modelljének standard fizikai konfigurációját, de bővítették az aeroszol részecskék, az aeroszolsugárzás és az aeroszol-felhő kölcsönhatások parametrizációját. Aeroszol modellje kiszámítja az egyes aeroszol típusok tömegkoncentrációját, ami a keletkezési mechanizmus és méret alapján lehet Aitken, akkumulációs és durva részecske. A modell által figyelembe vett alapvető aeroszol részecskék: szulfát, feketeszén, szeves anyagok, tengeri só, ásványi por. A szállított aeroszol prekurzor gázok, mint a dimetil-szulfid vagy a kén-dioxid koncentrációját az elsődleges részecskék kibocsátásától és koncentrációjától függően határozza meg (Kirkevåg et al., 2013). A modell felhő sémája kiszámítja a felhőcseppek koncentrációját, hogy ezáltal meghatározhassák a felhő albedóját és élettartamának hatásait. A modellben alkalmazott Abdul-Razzak és Ghan (2000) felhő parametrizációs séma leírja, hogyan vesznek részt az aeroszol részecskék a felhőcseppek képződésében. Megjelenik a modellben a Zhang és McFarlane (1995) által leírt mély konvekciós felhő parametrizáció, és a konvektív momentum-transzport leírása is, melyek a CCSM4 modellben is szerepelnek. A modell horizontális felbontása 1,9° a szélességi és 2,5° a hosszúsági körök mentén. Vertikális szintjeinek száma 26, melyek közül a legmagasabb 2,19 hPa-on van. A modell σ vertikális koordináta rendszert alkalmaz.
- *CLM4:* A földfelszíni modell a CCSM4-ben is alkalmazott komponens, melybe beágyazva megtalálható a Flanner és Zender (2006) által leírt SNICAR<sup>19</sup> modell is, mely lehetővé teszi az aeroszol részecskék (feketeszén, ásványi por) okozta sötétedő hófelszín sugárzási hatásainak számítását. Meghatározza a felszíni albedót és a vertikális abszorpciós profilt is, mely függ a Nap zenitszögétől, illetve a légkörből kiülepedő aeroszol részecskék tömeg koncentrációjától is. A modell a szén-nitrogén ciklust is vizsgálja, ehhez a szén és a nitrogén prognosztikus változók, míg a szén és a nitrogén fluxusok diagnosztikusak, és nem függenek más modellkomponensektől (Thornton et al., 2007). A modell horizontális felbontása megegyezik a légköri modell felbontásával, kivéve a folyók transzport modelljét, mert annak felbontása 0,5°.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Snow, Ice, and Aerosol Radiative Model (SNICAR) - Hó, jég és aeroszol sugárzási modell

- NorESM-Ocean: Az óceáni modell vertikális koordinátaként a már említett potenciális sűrűséget használja. A keveredési réteg mélységét a turbulens kinetikus energia egyenlet parametrizációjával számítja ki, melyre két módszer is rendelkezére áll (Kraus és Turner, 1967; Gaspar, 1988), azonban mindkét módszer túlbecsli a keveredési réteg mélységét a magas földrajzi szélességeken, ezért további parametrizációkra volt szükség. Az édesvíz fluxust virtuális sófluxussá alakítja a modell, mielőtt az óceánba keveredne. Felbontását tekintve a CCSM4-ben is alkalmazott 1,125°-os rácsfelbontású az Egyenlítő mentén. A vertikális szintek száma 53, melyek közül a felszínhez legközelbbi 1 m mélységben található. A nyomási gradiens erőt a felszíni nyomási felület geopotenciál gradiense által becsli, ami csökkenti a régóta fennálló problémát az izopiknikus modellek pontatlan dinamikájában, azokban a régiókban, ahol a nyomás jelentősen eltér a referencia nyomástól (Sun et al., 1999).
- HAMOCC5<sup>20</sup>: A NorESM1-ME almodellje, mely széles körben modellezi az óceáni biogeokémiai folyamatokat. Meghatározza az eufotikus zóna biogeokémiai folyamatait, a mély óceán aerob remineralizációs folyamatait, valamint a tenger és a légkör közötti O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> és dimetil-szulfid kicserélődést is (Maier-Reimer et al., 2005).
- CICE4.1<sup>21</sup>: A tengeri jég modell legfontosabb része a delta Eddington rövidhullámú sugárzás átviteli séma alkalmazása (Briegleb és Light, 2007), és az itt is megjelenő aeroszol parametrizáció (Holland et al., 2012). A hó és jégfeületekre történő aeroszol ülepedést prognosztikusan számítja, a légköri komponens alapján. Rácsfelbontása az óceáni modellével megegyező.

### *3.4. CanESM2*<sup>22</sup>

A Kanadai Klímamodellező és Elemző Központ második generációs komplex Földrendszer modellje, mely tartalmaz légköri modellt, aeroszol és levegőkémiai modellt, földfelszíni, óceáni, óceáni biogeokémiai modellt valamint tengeri jég modellt is. Az alábbiakban a modell legfontosabb tulajdonságait fejtem ki.

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Hamburg Ocean Carbon Cycle Model version 5 (HAMOCC5) - Hamburgi óceáni szénciklus modell ötödik verziója

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Community Ice CodE (CICE4.1) - Közösségi jég modell 4.1-es verziója

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Canadian Earth System Model version 2 (CanESM2) - Kanadai komplex Föld-rendszer modell második verzója

- CanAM4<sup>23</sup>: A CanESM2 légköri modellje, mely elődjéhez képest lényegesen módosított fizikai parametrizációkkal rendelkezik, többek között a felhőzet keletkezése, a felhőzet sugárzás módosító hatása és a csapadék kezelés terén. Az aeroszol részecskék közvetett és közvetlen hatásait az ún. bulk aeroszol séma alapján számolja. A modell horizontális felbontása T63 (1.875° × 1.875°) konfigurációt követ, 35 vertikális szinttel, melyek közül a legmagasabb szint 0,5 hPa-on található (von Salzen et al., 2013).
- CLASS2.7<sup>24</sup>: A CanESM2 földfelszíni modellje, mely többrétegű felszíni sémát használ, ezáltal jobb leírását adja a víz és energia kicserélődésnek a földfelszín és a légkör között. A felszíntől kezdve három talajréteget különböztet meg, melyek vastagsága rendre 0,1 m, 0,25 m és 3,75 m. Ez közelítően az a mélység, ahol még van napi változás, illetve ahol a hőmérsékletnek éves menete van. A CLASS prognosztikai egyenletei írják le a víz és az energia áramlását, valamint a hidrológiai és termikus különbségeket a talajrétegek között. A talaj mellett a lombkorona vegetáció is leírásra kerül a modellben (Abdella és McFarlane, 1996). A modell részét képezi a CTEM<sup>25</sup> modul is, mely többek között a fotoszintézis, autotrófok és heterotrófok légzésének, tápanyag allokációjának, fenológiájának leírásával illetve a földhasználat változás leírásával foglalkozik (Verseghy, 1991).
- CanOM4<sup>26</sup>: A CanESM2 óceáni modellje, mely z vertikális koordinátát használ. Horizontális felbontása 1,41° × 0,94° a szélességi és hosszúsági körök mentén, a vertikális szintek száma pedig 40. A legelső szint a felszínen van, majd a következő 10 méterre a felszíntől. A felső 200 méteren 16 modellszint található (Merryfield et al., 2013).
- CMOC<sup>27</sup>: A CanESM2 óceáni biogeokémiai modellje, mely a szénciklust modellezi. Tartalmaz beágyazott szervetlen kémiai modult, illetve ökoszisztéma modellt dinamikus klorofill modellel. A fitoplanktonok számának növekedését a modellben a fény, a hőmérséklet, a tápanyag és a vas mennyisége korlátozza. A szervetlen kémiai modul változói az oldott szervetlen szén mennyisége és a teljes lúgosság. Az

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Canadian Atmospheric Global Climate Model Version 4 (CanAM4) - Kanadai globális légköri klímamodell negyedik verziója

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Canadian LAnd Surface Scheme (CLASS2.7) - Kanadai földfelszíni séma 2.7-es verziója

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Canadian Terrestrial Ecosystem Model (CTEM) - Kanadai szárazföldi ökoszisztéma modell

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Canadian Ocean General Circulation Model Version 4 (CanOM4) - Kanadai általános óceáni cirkulációs modell negyedik verziója

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Canadian Model of Ocean Carbon (CMOC) - Kanadai óceáni szénciklus modell

ökoszisztéma modul változói pedig a nitrogén, a fitoplankton, a zooplankton és a klorofill mennyiségének változása (Zahariev et al., 2006).

### 3.5. CNRM-CM $5^{28}$

A CNRM-CM5 a CNRM-CM kapcsolt légkör-óceán általános cirkulációs modell új generációja, amit a francia Nemzeti Meteorológiai Kutatóintézet 2010-ben fejlesztett ki a CMIP5 projekt keretein belül. A modell tartalmaz légköri (ARPEGE), óceáni (NEMO<sup>29</sup>), földfelszíni (SURFEX<sup>30</sup>) és tengeri jégre (GELATO<sup>31</sup>) vonatkozó komponenseket és ezek mellett egy őket összekapcsoló platformot is. A modellt érintő főbb fejlesztéseket a CMIP3 óta a horizontális rácsfelbontás növelésében végezték a légköri (2,8°-ról 1,4°-ra) és az óceáni (2°-ról 1°-ra) modell esetében (Voldoire et al., 2011). A CNRM-CM5 klímamodell fontosabb összetevőinek részleteit az alábbiakban fejtem ki.

- ARPEGE: A CNRM-CM3 41 szintjét 31 vertikális szintre csökkentették ebben a modellben, melynek oka a számítások erőforrás korlátja volt. A modellben kilenc réteg található 200 hPa, illetve négy 100 hPa szint felett. A legmagasabb szint 10 hPa-on van. Az alacsony szinteken hat réteget tartalmaz a modell 850 hPa alatt, kivéve azokat a régiókat ahol magas a domborzat, mert ott kevesebb szint van. A modell időlépcsője 30 perces, leszámítva a sugárzás átviteli modult, ahol 3 órás. A modellben lévő hat prognosztikus változó: a hőmérséklet, a specifikus nedvesség, az ózonkoncentráció, a felszíni nyomás logaritmusa, az örvénydiffúzió és a divergencia. Ugyanakkor nincs benne prognosztikai egyenlet, mely az összes kondenzációs csapadékképződésre vonatkozó folyamatot leírná (Voldoire et al., 2011).
- SURFEX: A CNRM-CM3-ban még az ISBA<sup>32</sup> modellt használták (Noilhan és Planton 1989; Noilhan és Mahfouf, 1996), melyet tovább fejlesztettek a földfelszíni hidrológia terén, így létrehozva a legújabb verziót a SURFEX-et. A CNRM-CM5-ben megjelenő SURFEX három felszíni rendszert foglal magába: a természetes felszíneket, a tavakat, valamint a tengereket/óceánokat.

 <sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) - Francia Nemzeti Meteorológiai Kutatási Központ
 <sup>29</sup> Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO) - Európai óceáni modell

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> SURFface Externalise (SURFEX) - Felszín leíró modell

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean (GELATO) - Globális jégmodell légköri és óceáni alkalmazásokhoz

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere (ISBA) - Talaj, bioszféra és légkör közötti kölcsönhatások

- NEMO: A CNRM-CM3 alapjául még egy régebbi óceáni modell verzió (OPA8.0<sup>33</sup>, Madec et al., 1998) szolgált durvább felbontással és eltérő óceáni fizikával. Ennek még 2° volt a felbontása (az Egyenlítőnél 1,5°), és 31 vertikális szintet tartalmazott. A CMIP5 már az ORCA-1 globális óceáni konfigurációt alkalmazza, mely egy hárompólusú kvázi-izotróp rácsot jelent, 1° felbontással. A modell 42 vertikális szintet tartalmaz (10 m-re a felszíntől, 25 m-től 100 m-ig, 130 m-től-600 m-ig, 300 m-től 5000 m-ig), és 1 órás időlépcsőt alkalmaz (Barnier et al., 2006; Penduff et al., 2007).
- *GELATO:* Az óceáni komponensbe van közvetlenül beágyazva a tengeri jég modell. Az időlépcsője 6 órás. A jégvastagságra négy kategóriát különböztet meg: 0–0,3 m, 0,3–0,8 m, 0,8–3 m és több mint 3 m. A kategóriák között átfedések lehetnek a jégvastagság termodinamikai változása és a tengeri jég mozgása miatt (Voldoire et al., 2011).

## 3.6. $GISS^{34}$ -E2-R

A GISS a NASA éghajlat-modellezési programjának fejlesztése, mely elsődleges célja a kapcsolt légkör-óceáni modellek fejlesztése a Föld éghajlati rendszerének jobb, pontosabb szimulálására. A modellben az elsődleges hangsúlyt a regionális és globális éghajlatérzékenységi vizsgálatok kapták, beleértve az éghajlati rendszer válaszát a különféle kényszerekre, pédául a napsugárzás változására, vulkánkitörésekre, az antropogén és természetes kibocsátásból származó üvegházhatású gázokra és aeroszol részecskékre, illetve paleoklimatikus változásokra. A modell fejlesztési kutatásai elsősorban a felhők és a nedves konvekció parametrizálására, valamint az óceán-légkör-jég közötti kölcsönhatásokra főkuszáltak (Schmidt et al., 2014). A GISS-E2-R modell mellett léteznek még a GISSE2-H és GISS-E2H-CC modellek is, melyek más felbontással, illetve modulokkal rendelkeznek. A továbbiakban csak a dolgozatban felhasznált GISS-E2-R modell leírásával foglalkozom, mely tartalmaz légköri, levegőkémiai, földfelszíni, óceáni és tengeri jég modellt is. Az alábbiakban az egyes komponensek rövid bemutatása következik.

 ModelE2: A GISS-E2 modellcsalád légköri modellje, mely horizontális felbontását tekintve 2° × 2,5° a szélességi és hosszúsági körök mentén. A modell legmagasabb szintje 0,1 hPa-on található, vertikális szintjeinek száma 40, ami kétszer annyi, mint a CMIP3 során alkalmazott modellverzió esetében. A korábbi verziókhoz képest a

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Océan PArallélisé (OPA8.0) - Párhuzamosított óceáni modell nyolcadik verziója

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> Goddard Institute for Space Studies (GISS) - Goddard Űrkutatási Intézet

modell dinamikai magja, a légköri keveredés és a határréteg parametrizációja nem változott. A modell 225 másodperces időlépcsőt alkalmaz (Schmidt et al., 2014). Tartalmaz Collins et al. (2006a) alapján leírt sugárzási sémát és Del Genio és Yao (1993) által leírt tömeg fluxus cumulus parametrizációs sémát is.

- *TCAD<sup>35</sup>/TCADI<sup>36</sup>:* A GISS-E2-R aeroszol modelljei, melyek a szulfát, nitrát, elemi és szerves szén, tengeri só és por koncentráció számításait végzik. Továbbá a direkt és indirekt hatásokon keresztül az éghajlatra gyakorolt hatásaik vizsgálatát is (Menon et al., 2010). Ezeken kívül tartalmazza még a poros felszíneken lezajló heterogén kémiai reakciókat, illetve az NO<sub>x</sub> függő másodlagos aeroszol részecskék képződését az izoprénekből és terpénekből (Tsigaridis és Kanakidou, 2007).
- G-PUCCINI<sup>37</sup>: A GISS-E2-R levegőkémiai modellje, mely főleg a troposzféra alapvető kémiai folyamatait írja le a NO<sub>x</sub>-HO<sub>x</sub>-O<sub>x</sub>-CO-CH<sub>4</sub> molekulák között (Schindell et al., 2013). Ezen kívül a korábbi modellverziókhoz képest bővebben tartalmazza a sztratoszféra kémiai folyamatainak leírására a klór és bróm tartalmú vegyületek, illetve a halogénezett szénhidrogének reakcióit is, továbbá a poláris sztratoszférikus felhőképződés folyamatait, mely a salétromsavtól, a vízgőztől és a hőmérséklettől függ (Hanson és Mauersberger, 1988). Összességében a modell a troposzférára és a sztratoszférára 156 kémiai reakciót vesz figyelembe 30 perces időlépcsővel dolgozva (Schmidt et al., 2014).
- Ent TBM<sup>38</sup>: A GISS-E2-R bioszféra modellje, mely szoros kapcsolatban áll a légköri modellel és a földfelszíni hidrológiai modellel. Kiszámítja többek között a levélfelületet és a víz, illetve CO<sub>2</sub> fluxust. A levélfelület számításához figyelembe veszi a hőmérsékletet, a páratartalmat, a szélsebességet, a fényviszonyokat, illetve a szezonális levélfelületi indexet is (Schmidt et al., 2014). A modell nem egyes növényeket, hanem csoportokat szimulál a növények funkcionális típusa és mérete (geometria és biomassza tárolás szerint) alapján. Ezek a biomassza tároló csoportok a fás szárú növényekre tartalmazzák a fák élő és holt szárát, finom és durva gyökereket, a lágyszárúakra pedig a lombozatot, illetve a finom gyökereket. A növény geometriája alapján a magasságot, a korona átmérőt, a törzs átmérőt és a levélfelületi

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> Tracers of Chemistry, Aerosols and their Direct effects (TCAD) - Kémiai nyomjelző anyagok, aeroszol részecskék és közvetlen hatásaik

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> Tracers of Chemistry, Aerosols and their Direct and Indirect effects (TCADI) - Kémiai nyomjelző anyagok, aeroszol részecskék közvetlen és közvetett hatásaik

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> GISS model for Physical Understanding of Composition Climate INteractions and Impacts (G-PUCCINI) - GISS modell a légkör összetételével kapcsolatos éghajlati kölcsönhatások és hatások fizikai megértésére
<sup>38</sup> Ent Terrestrial Biosphere Model (Ent TBM) - Átfogó szárazföldi bioszféra modell

indexet veszi figyelembe. Ezen kívül megkülönböztet 16 funkcionális növénytípust is – örökzöldek, lombhullatók, fűfélék, szántók alcsoportjai alapján – (Su et al., 1996). Tartalmaz a modell talaj biogeokémiai modult is, mely meghatározza a talajban lévő szén és nitrogén mennyiségét, illetve a mikrobiális légzésből származó CO<sub>2</sub> fluxusokat is (Del Grosso et al., 2005). A modellhez tartozik szárazföldi jég és édesvízi jég modell is, melyekben a tömeg és az energia a nettó hófelhalmozódásból származik.

• Russel Ocean: A GISS-E2-R óceáni modellje, mely horizontális felbontása 1° × 1,25° a szélességi és hosszúsági körök mentén. 1 m és 12 m között 32 vertikális szintet tartalmaz. A modell megmaradó mennyiségei a víztömeg, a sótömeg és a hőmennyiség. A hőtartalmom változásának kifejezésére a potenciális entalpiát használja, illetve számít friss víz bekeveredést is (Schmidt et al., 2014). A korábbi konfigurációkhoz hasonlóan dinamikus óceáni modell, mely a megfigyelt tranziens tengerfelszín hőmérsékleteket és tengeri jégmezőket használja, illetve q-fluxus modellt, mely lehetővé teszi az óceáni hőmérséklet változások megfigyelését a felszíni fluxus változás függvényében (Hansen et al., 2007). A CMIP3 projekthez képest a horizontális felbontás mintegy négyszeresére, a vertikális felbontás pedig kétszeresére nőtt. Ezen kívül többek között voltak fejlesztések a vertikális advekció számításában is. A modellhez tartozik tengeri jég modell, melyben a korábbi változatokhoz képest nem voltak változások. A dinamikai leírásra a Zhang és Rothrock (2000) által ismertetett viszkózus-plasztikus formulát használja.

## $3.7. \quad GFDL^{39}\text{-}ESM$

A NOAA<sup>40</sup> első komplex Föld-rendszer modellje, mely a Föld biogeokémiai ciklusainak, az emberi tevékenységnek és az éghajlati rendszer kölcsönhatásainak megértését szolgálja. A GFDL mint fizikai klímamodell előbbiek szimulációit a légköri és óceáni cirkulációs modellen, valamint a földfelszíni, óceáni biogeokémiai és tengeri jég modellen keresztül számítja. A földfelszíni komponens magában foglalja a csapadék és párolgás viszonyokat, patakokat, tavakat, folyókat, illetve ezek lefolyási viszonyait, valamint a földi ökoszisztéma komponenseit, ezáltal szimulálva a szén és egyéb anyagok dinamikáját a rezervoárok között. Óceáni modellje magában foglalja a szabad vízfelszínt a hullámzással kapcsolatos folyamatok modellezésére. Ezeken kívül a modell még a víz fluxusának, tengeri jég dinamikájának,

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) - Geofizikai Folyadékdinamikai Laboratórium

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) - Amerikai Nemzeti Óceáni és Légköri Intézet

jéghegyek mozgásának és az óceáni rétegek közötti keveredésnek a szimulációját végzi (Dunne et al., 2012).

Az első modellváltozat az ESM2.1 volt, ami a CM2.1 klímamodell továbbfejlesztett változata (Delworth et al., 2006). Erre építve két új modellt hoztak létre, melyeknek leginkább az óceáni komponense különbözik a korábbiaktól és egymástól.

- *CM2.1<sup>41</sup>*: A GFDL-ESM2M és a GFDL-ESM2G légköri modellje, melynek horizontális felbontása 2° × 2,5° a szélességi és hosszúsági körök mentén. A modell vertikális szintjeinek száma 24, melyek közül a legmagasabb szint 3,65 hPa-os magasságban van. A légköri modell tartalmazza az aeroszol részecskék (természetes és antropogén), a felhőfizikai folyamatok és a csapadékképződés parametrizációját (Delworth et al., 2006).
- MOM4.1<sup>42</sup>: A GFDL-ESM2M óceáni modellje, melyet 2005-ben fejlesztettek ki. A modell 1°-os horizontális felbontású, 50 vertikális szinttel és z vertikális koordinátával. A modell legfelső szintje a felszínen van (Dunne et al., 2012).
- GOLD<sup>43</sup>: A GFDL-ESM2G óceáni modellje, melyet 2006-ban fejlesztettek ki. Ez is 1°-os horizontális felbontású 63 vertikális szinttel, és nyomásváltozás szerinti vertikális koordinátával. A modell legfelső szintje ebben az esetben is a felszínen van (Dunne et al., 2012).

Mind a két óceáni modell tartalmaz biogeokémiai modellt is többek között a fitoplanktonok diverzitására és elhelyezkedésére vonatkozóan. Az ESM2M modellben erősebb az óceáni szénkörzés, viszont gyengébb az észak felé történő légköri CO<sub>2</sub> szállítás. A legnagyobb előnye az ESM2G-vel szemben, hogy javult az oxigén és a tápanyag tartalom korábban hibás becslése a déli és trópusi óceáni térségekben. Ugyanakkor az ESM2G modell előnye a másik változathoz képest, hogy javult az Atlanti- és a Csendes-óceánban a felszíni klorofill tartalom becslése (Dunne et al., 2013).

 LM3<sup>44</sup>: A GFDL földfelszíni modellje, mely a légköri modellel van csatolva. Többek között a víz, a szén-dioxid, a nitrogén és az energia cseréjét szimulálja a földfelszín és a légkör között. A biogeográfia parametrizációjával meghatározható a különféle vegetációk éves változása. Segítségével a bioszféra-hidroszféra-éghajlat közötti kölcsönhatások és visszacsatolások megragadhatóak a légköri fizikai, kémiai

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> Coupled Model (CM2.1) - Csatolt modell 2.1-es verziója

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> Modular Ocean Model (MOM4.1) - Moduláris óceáni modell 4.1-es verziója

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> Generalized Ocean Layer Dynamics (GOLD) - Általánosított rétegzett óceán dinamikai modell

<sup>&</sup>lt;sup>44</sup> Land Model Version 3 (LM3) - Földfelszíni modell harmadik verziója

folyamatokon keresztül. Az LM3 már képes figyelembe venni az eső és hó intercepciójának mértékét is a növényzeten, továbbá tartalmaz globális lefolyási modellt is. Ugyanakkor még fejlesztési fázisban van a szén szállítás modellezése a talajon és a folyókon keresztül (Donner et al., 2011).

- TOPAZ<sup>45</sup>: A GFDL óceáni biogeokémiai modellje, mely horizontális felbontása 1° × 1° a 30° szélességig és 1/3° az Egyenlítőig. A vertikális felbontást tekintve 50 szintet tartalmaz az óceánban és 24 szintet a légkörben. A modell tartalmaz szén-, oxigén-, nitrogén-, foszfor-, vastranszport folyamatokat, továbbá figyelembe veszi a légköri kiülepedést és a folyók általi beszállítódást is (Dunne et al., 2013).
- SIS: A GFDL dinamikai/termodinamikai tengeri jég modellje, mely kiszámítja a jég vastagságát, hőmérsékletét, sótartalmát és a hó vastagságot többféle vastagsági kategóriával. A modell tartalmazza a jégre ható belső erők teljes körű dinamikai leírását. Ezeken kívül az óceánfelszíni albedó és érdesség számítását is végzi (Delworth et al., 2006).

### $3.8. \quad BNU-ESM^{46}$

A Pekingi Egyetem által kifejlesztett komplex Föld-rendszer modell, mely több másik széles körben alkalmazott klímamodell komponenseiből tevődik össze. Célja, hogy tanulmányozzák a légkör-óceán közötti kölcsönhatások mechanizmusait, a természetes éghajlati változékonyságot, illetve az éghajlat és a szénciklus közötti visszacsatolások mechanizmusait. Az eredmények alapján a modell jól szimulálta a felszíni hőmérséklet és csapadék éves ciklusát, a trópusi tengerfelszín hőmérsékletváltozásának éves ciklusát vagy éppen az ENSO<sup>47</sup> jelenségkört (Ji et al., 2014). A modell felépítését tekintve tartalmaz légköri, óceáni, óceáni biogeokémiai, földfelszíni és tengeri jég modelleket kiegészülve szénciklus modellel. A BNU-ESM az NCAR által fejlesztett CCSM4 klímamodellen alapul, óceáni modellje a GFDL által fejlesztett MOM4p1, földfelszíni modellje a CoLM<sup>48</sup>, mely elsősorban az NCAR fejlesztése kiegészítve néhány részlettel a Pekingi Egyetem által. Légköri modellje a CCSM4-ben is szereplő CAM3.5<sup>49</sup>, tengeri jég modellje pedig a szintén

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> Tracers of Phytoplankton with Allometric Zooplankton (TOPAZ) - Fitoplanktonok nyomjelzői allometrikus zooplanktonokkal

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) - Pekingi Általános Egyetem Föld-rendszer modellje

<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> El Niño-Southern Oscillation (ENSO) - El Nino Déli Oszcilláció

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> Common Land Model (CoLM) - Közös földfelszíni modell

<sup>&</sup>lt;sup>49</sup> Community Atmospheric Model 3.5 version (CAM3.5) - Közösségi légköri modell 3.5-ös verziója

CCSM4-ben lévő CICE4.1 modell. A továbbiakban az egyes modellkomponensek legfontosabb jellemzőinek bemutatása következik.

- *CAM3.5:* A modell eltérése a CCSM4 légköri modelljétől a Zhang és McFarlaneféle mély konvekciós sémával (Zhang és McFarlane, 1995) történt kiegészítés, illetve a konvektív momentum transzport (Richter és Rasch, 2008) hozzáadása. A modell felbontását tekintve T42 horizontális spektrális felbontású, azaz 2,81° × 2,81°-os a szélességi és hosszúsági körök mentén. Vertikális szintjeinek száma 26, melyet σ-koordinátarendszer ír le. A modell legmagasabb nyomási felülete 2,917 hPa-on van. A modellhez tartozik légkörkémiai folyamatokat leíró modell komponens is (Lamarque et al., 2010), mely az üvegházhatású gázokhoz és aeroszol részecskékhez kötődő folyamatokat írja le, figyelembe véve az aeroszol részecskék közvetett hatásait is.
- MOM4p1: A modell óceáni fizikai része megegyezik a GFDL modellben lévővel, az általános geometriai és földrajzi részei azonban módosítottak, ugyanis tripoláris rácsot használ, hogy elkerüljék a sarkok felé a rácshálózat szingularitását (Murry, 1996). A modell horizontális felbontása 1° × 1°, kivéve az Egyenlítő 10°-os térségében, ahol 1/3°. A vertikális szintek száma 50, melyek közül a legfelső 23 réteg mintegy 10 143 m vastagságú. Tartozik hozzá óceáni biogekémiai modul is, melynek legfőbb változója a foszfát mennyiség változása. A két legfontosabb szimulált folyamat a modellben a foszfát újratermelődés szimulációja, illetve az eufotikus zónában történő nettó biológiai felvétel, ami a fitoplanktonok aktivitásához kötődik (Ji et al., 2014).
- *CoLM*: Ez a földfelszíni modell három másik földfelszíni modellt ötvöz, mely a bioszféra-légkör átviteli sémájából (BATS<sup>50</sup>) (Dickinson et al., 1993), a Kínai Légkörfizikai Tudományos Akadémia modelljéből (IAP94<sup>51</sup>) (Dai és Zeng, 1997) és az NCAR földfelszíni modelljéből tevődik össze. A modell legfőbb eltérései az NCAR modelljétől, hogy javult a lombkoronán át történő sugárzás átvitel modellezése, mely során elkülöníti a lombkorona napsütötte és árnyékos részén át történő sugárzás abszorpcióját. Tartalmaz továbbá egy fotoszintézis-sztóma konduktancia modellt (a napsütötte és árnyékos leveket elkülönítve) a levelek CO<sub>2</sub> és víztranszportjára vonatkozóan. Továbbá rendelkezik egy dinamikus vegetációs

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) - Bioszféra és légkör közötti átviteli séma

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> Institute of Atmospheric Physics (IAP) - Légkörfizikai Intézet

almodellel is, illetve szárazföldi szén- és nitrogénciklus modellel, amelyek az LPJ<sup>52</sup> modellen (Sitch et al., 2003) és az LPJ-DyN<sup>53</sup> sémán (Xu és Prentice, 2008) alapulnak. Az LPJ-DyN séma jelentősen eltér a CCSM4 modellben lévő CLM4 földfelszíni modellben lévő biogeokémiai szén-nitrogén sémától.

CICE4.1: Hunke és Lipscomb (2010) munkájában leírt tengeri jég modell, mely szintén tripoláris rácsot használ, hogy az óceáni modellel kompatibilis legyen. Elasztikus, rugalmas, viszkózus dinamikai sémát használ a jég belső feszültségének kifejezésére (Hunke és Dukowicz, 1997). A jégre és a nyílt vízre vonatkozóan egyaránt öt kategóriára van osztva. A hó és jég felszíni hőmérsékletét a Semtner (1976) által leírt zéró-réteg termodinamikai séma nélkül számítja. Ez a séma egy egyszerűsített változata a réteges tengeri jég termodinamikai modelljének, mert hiányzik belőle a hőtárolási tag, kivéve a látens hőt, ami a jégképződéssel van összefüggésben.

## $3.9. \quad CMCC-CMS^{54}$

Az olasz Közép-Európai Mediterrán Klímaváltozási Központ klímamodellje, mely a kapcsolt légkör-óceán általános cirkulációs modellek közé tartozik. A modellcsalád tagjai között említhető a CMCC-CM és a CMCC-CESM is. Ezek közül a CMCC-CESM a széleskörűbb modell, melyet a szénciklus szimulációjára terveztek, így tartalmazza a szénciklus biológiai és geokémiai folyamatait, valamint felszíni, vegetációs (Alessandri, 2006), és óceáni biogeokémiai modelleket (Vichi et al., 2007) is. A modell 39 vertikális szintet tartalmaz, 80 km magasságig, a légköri modellje pedig T31-es felbontású (3,75° × 3,75°). A dolgozatban vizsgált CMCC-CMS klímamodell viszont csak légköri, óceáni, tengeri jég modellt és ezeket kapcsoló modellplatformot tartalmaz, illetve egy sztratoszférikus komponenst. Az alábbiakban ezeket ismertetem röviden.

 ECHAM5: A CMCC-CMS légköri modellje, mely T63-as horizontális felbontású. Ez megfelel egy 1,875° × 1,875°-os felbontású Gaussi-rácsnak. A modell vertikális szintjeinek a száma 95, ezek közül a legmagasabb 0,01 hPa-os nyomási szinten van (Roeckner et al., 2006). Elődjével, az ECHAM4-gyel összehasonlítva számos változást vezettek be, többek között semi-Lagrange-i transzport sémát alkalmaz a

<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> Lund-Potsdam-Jena model (LPJ) - Lund-Potsdam-Jena modell

<sup>&</sup>lt;sup>53</sup> Lund-Potsdam-Jena Dynamic Nitrogen schema (LPJ-DyN) - Lund-Potsdam-Jena dinamikus nitrogén séma

<sup>&</sup>lt;sup>54</sup> Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici Climate Model with the Stratospheric Component (CMCC-CMS)-Közép-Európai Mediterrán Klímaváltozási Központ klíma modellje sztratoszférikus komponenssel

vízkomponensek és a kémiai nyomanyagok számítására. Ezen kívül hosszúhullámú sugárzási sémát használ, külön kezeli a prognosztikai egyenleteket a felhőben lévő folyékony vízre és felhő jégre vonatkozóan, illetve új felhő mikrofizikai sémát alkalmaz. Nőtt még a spektrális intervallumok száma is, mind a rövid, mind pedig a hosszúhullámú spektrum esetében. Változások történtek a földfelszíni folyamatok modellezésében is, például a földfelszín és a légkör közötti transzport és az orografikus légellenállás leírásában is. A földfelszíni folyamatok leírásánál kiszámolja a talaj hőháztartási egyenlegét, a földfelszíni hőmérsékletet és a talaj hőmérsékletét is. A horizontális és vertikális diffúzió leírása, a cumulus konvekciós séma, illetve a spektrális dinamika változatlan maradt a korábbi modell verzióhoz képest (Roeckner et al., 2003).

- NEMO: A CMCC-CMS óceáni modellje, mely horizontális felbontása átlagosan 2° × 2°, az Egyenlítő térségében pedig 0,5° × 0,5°. A modell vertikális szintjeinek száma 31, a felszínhez legközelebbi szint 5 m mélységben van. Z-mélységi koordinátát használ és lineáris implicit sémát (Madec, 2008).
- LIM2<sup>55</sup>: A CMCC-CMS tengeri jég modellje, melynek meghatározott fizikai mezői a jégmennyiség, a hó és a jég térfogata illetve entalpiája. A modell horizontális felbontása a NEMO felbontásával egyezik meg. A havon és jégen belüli szenzibilis hőtárolást és függőleges hővezetést egy háromrétegű modellel határozza meg (Timmermann et al., 2005).

## 3.10. CSIRO-ACCESS CM<sup>56</sup>

Ez a modellcsalád az Ausztrál Időjárási és Klímakutató Központ fejlesztése, ami a Tudományos és Ipari Kutató Szervezet és az ausztrál Meteorológiai Szolgálat közötti együttműködés eredménye. Ez a modell a brit légköri egységes modellt és egyéb almodelleket tartalmaz. Ilyenek az ACCESS óceáni modell, amely a NOAA és a GFDL (Griffies, 2009) óceáni modelljéből tevődik össze, ezen kívül tartalmaz tengeri jég modellt, mely a CICE4.1 (Hunke és Lipscomb, 2010), és az Oasis3.2-5 (Valcke, 2006) összekapcsoló platform-modellt is. Levegőkémiai és óceáni biogeokémai modellt viszont egyik sem tartalmaz. Az ACCESS CM modellnek két verziója van, melyeket a CMIP5 keretein belül vizsgáltak, ezek az ACCESS1.0 és az ACCESS1.3. A két modell ugyanazt a tengeri jég modellt használja

<sup>&</sup>lt;sup>55</sup> Louvain-la-Neuve sea Ice Model (LIM) - Louvain-la-Neuve-i tengeri jég modell

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation - Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model (CSIRO-ACCESS CM) - Nemzetközösségi Tudományos és Ipari Kutató Szervezet - Ausztrál Közösségi éghajlati és Föld-rendszer szimulációs csatolt modellje

(néhány paraméterbeli különbséggel), de a légköri és földfelszíni modelljei különböznek. Az ACCESS1.0 a HadGEM2 légköri modelljét és szintén a brit földfelszíni modellt tartalmazza. Az ACCESS1.3 pedig a brit légköri modell 1. verzióját és a CSIRO földfelszíni modelljének 1.8. verzióját alkalmazza. A továbbiakban a modellkomponensek legfontosabb tulajdonságainak bemutatása következik.

- *HadGEM2:* az ACCESS1.0 légköri modellje, mely horizontális rácsfelbontása 192 km × 145 km, a vertikális szintjeinek száma 38, a legmagasabban lévő szint pedig 39 255 m. A modellbe sugárzási folyamatok vizsgálata is be van építve a H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CFC11, CFC12 és O<sub>2</sub> légköri gázokon keresztül. Továbbá 20 féle aeroszol részecskét is vizsgál, mint például a szulfát, a korom vagy a tengeri só (Edwards és Slingo, 1996). Ezeken kívül a modellben megjelenik a konvekciós séma is, sekély és mély konvekcióra egyaránt (Gregory és Rowntree, 1990), valamint a csapadék mikrofizika is, mely explicit számításokkal határozza meg a gőz, folyadék és jégfázis közötti átalakulásokat.
- UK Met Office Global Atmosphere1.0: az ACCESS1.3 légköri modelljének felbontása megegyezik az előzőekben megadottakkal, de a parametrizációkban vannak eltérések. A sugárzási folyamatok vizsgálata annyiban mutat eltérést, hogy megjelenik benne a Shonk és Hogan (2008) által kifejlesztett ún. tripleclouds séma a vízszintes felhő inhomogenitás vizsgálatára. Emellett jobb a modell hőmérsékleti és nyomási skálázása (Hewitt et al. 2011), ami javítja a hosszúhullámú sugárzási fluxus szimulációját a légkör középső részében. A konvekció fizikáját tekintve többnyire hasonló az előző modellben lévőhöz, de itt a sekély konvekció leírásában vannak különbségek, melyek révén a vertikális fluxus leírása következetesebbé vált (Hewitt et al., 2011).
- CLASSIC<sup>57</sup>: ez az almodell mind a két verzióban megegyezik. Hét aeroszol fajtával dolgozik. Ezek az ásványi por, a tengeri só, a feketeszén, a szerves szén, a másodlagos szerves aeroszol részecskék, a szulfát aeroszol részecskék és a biomassza égéséből származó aeroszol részecskék. Ezek mind prognosztikai változók, kivéve a tengeri sót, melyet minden egyes időlépcsőre diagnosztizálnak a felszín közeli szélsebesség alapján (Bellouin et al., 2011).

<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> Coupled Large-scale Aerosol Simulator for Studies in Climate (CLASSIC) - Csatolt nagy-skálájú aeroszol szimulációs modell éghajlati vizsgálatokhoz

- MOSES2.2<sup>58</sup>: az ACCESS1.0 földfelszíni modellje, mely a növényzet és a légkör közötti kölcsönhatásokat vizsgálja. Többek között fizikai, biofizikai és biogeokémiai folyamatok formuláit tartalmazza a momentumcsere, sugárzás, hő, víz és szén fluxus ellenőrzésére a földfelszín és a légkör között (Kowalczyk et al. 2013).
- CABLE1.8<sup>59</sup>: az ACCESS1.3 földfelszíni modellje, mely az előzőekben leírt modellhez hasonló fluxusok kiszámítását végzi (Kowalczyk et al., 2006). A modell 13 felszíntípust különböztet meg (10 növényzettel borítottat és 3 nem-növényzettel borítottat).

A két almodell közötti eltérés, hogy a CABLE1.8 megkülönböztet napsütötte és árnyékos leveleket a fotoszintézis, a sztómák vezetőképességének és a levél hőmérsékletének számításához. Továbbá a CABLE1.8 tartalmaz növényzet turbulencia modellt is, mely a levegő hőmérsékletét és páratartalmát képes kiszámítani a lombkoronán kívül. A MOSES2.2 a földfelszíni albedó mellett használ beépített talaj albedó és lombkorona albedó értékeket is, míg a CABLE1.8 beépített talaj albedó értékeket alkalmaz, de a lombkorona albedót a napsugárzás törésének, a nap beesési szögének, a lombkorona levélfelületi indexének, a levéltartás szögeloszlásának, valamint a levelek fényáteresztő és fényvisszaverő képességének függvényében számolja. Ez általában azt eredményezi, hogy kisebb a földfelszíni albedó, mint a MOSES2.2 esetben (Kowalczyk et al. 2013).

- MOM4p1: mindkét modell ezt az óceáni modellt használja, mely Boussinesqközelítést alkalmaz az óceánban, a felszínen pedig valódi tömeg fluxust az édesvízre, ami a csapadék, párolgás és szárazföldről történő lefolyás révén cserélődik (Marsland et al., 2013). Horizontális felbontása 1° a szélességi és hosszúsági körök mentén tripoláris rácson. Az Egyenlítőtől 10°-ra északra és délre 1/3°-ra módosul a felbontás. A modell vertikális szintjeinek száma 50, a vízfelszínhez legközelebbi szint 0-10 m között van (Adcroft és Campin, 2004).
- CICE4.1: mindkét modell a Hunke és Lipscomb (2010) által leírt tengeri jég modellt használja, melyre vonatkozó legfőbb tulajdonságok érvényesek a NorESM1 és a BNU-ESM klímamodelleknél már leírtakkal. Ahhoz hogy a CICE-t a légköri modellel (UM) kapcsolják, speciális termodinamikai konfigurációra volt szükség a brit

<sup>&</sup>lt;sup>58</sup> Met Office's Surface Exchange Scheme (MOSES2.2) - Brit Meteorológiai Szolgálat felszíni kicserélődési sémájának 2.2-es verziója

<sup>&</sup>lt;sup>59</sup> Community Atmosphere Biosphere Land Exchange (CABLE1.8) - Közösségi légköri, felszíni és bioszféra közötti kicserélődési modell 1.8-as verziója

modellben használt implicit határréteg séma miatt, amit a modell a tengeri jégre használ. A brit modell légköri határréteg sémája ugyanis magában foglalja, a tengeri jég vagy hófelszín hőmérsékletének közvetlen kiszámítását, így a CICE nem használhatja a réteges termodinamikai sémát és számolhat vele felszíni hőmérsékletet (Hewitt et al., 2011). Így a CICE az ACCESS modellekben a Semtner (1976) által leírt zéró-réteg termodinamikai modellt használja, mely ismertetése a 3.8. alfejezetben már megtörtént.

### 3.11. CSIRO-Mk3.6.0

A korábbi CSIRO-Mk3.0. modell továbbfejlesztett változata. Alapvető változások történtek a korábbi verzióhoz képest a légköri, az óceáni, a földfelszíni és a tengeri jégre vonatkozó modellekben is, azzal a céllal, hogy csökkentsék a korábbi verzió hibáit. Különösen az óceáni modell lett frissítve (MOM2.2) új térbeli változó, az örvényátviteli együttható beépítésével (Visbeck et al., 1997). A kapcsolt modellek közé sorolható. A modell magját egy spektrális AGCM és a vele kapcsolt OGCM modell adja. Az AGCM egy olyan egységes csomagként lett kifejlesztve, ami tartalmaz légköri, földfelszíni és tengeri jég modellt is, levegőkémiai és óceán biogeokémiai modellt viszont nem. A vízszintes rácshálózat Gaussi-rácshálózatot követ, azaz a szélességi fokok nem egyenletesen helyezkednek el a sarkok felé haladva. A hosszirányú távolság viszont szabályos elrendezést követ (Gordon et al., 2010). A továbbiakban a modell légköri és óceáni komponenseinek legfőbb jellemzőit ismertetem.

• AGCM: a modell légköri komponensét leíró almodell. A modell T63-as (1.875° × 1.875°) vízszintes spektrális felbontást használ 18 vertikális szinttel, ahol a legmagasabb szint 4,5 hPa-on van. A modell dinamikai felépítése a spektrális módszeren alapul. Nedvességi változói a vízgőz, a folyékony víz és a jég. A modell korábbi 3.5. verziójához képest jelentős változás történt a fizikai parametrizációkban, többek között a sugárzási egyenleg, a felhő mikrofizika és a felszíni ellenállás terén. A korábbi változathoz képest javult a hosszúhullámú sugárzás abszorpció számítása. Ennek hatására a hosszúhullámú sugárzási kényszer irreális változása megszűnt a határrétegben, különösen tiszta égbolt esetén (Gordon et al., 2010). Az AGCM részeként van beépítve a tengeri jégre vonatkozó modell is, melyben szintén voltak fejlesztések a korábbi verzióhoz képest. Ezek között említhető a jég advekciós algoritmus finomítása a parti pontoknál és az óceáni jég határánál, valamint a jég és az óceán sebességének figyelembe vétele és beépítése a modellbe (O'Farrell, 1998).

OGCM: a kapcsolt óceáni modell a MOM2.2, melynek horizontális felbontása 0.9° × 1,875°. A vertikális szintek száma 31, a legfelső szint 5 m mélységben van, a legalsó pedig 4800 m mélységben. A modell felbontása meridionális irányban finomabb, hogy az El Niño-t jobban reprezentálja (Gordon et al., 2010).

### *3.12. EC-EARTH*

Az EC-EARTH komplex Föld-rendszer modellt 27 kutatóintézet 10 európai ország együttműködésével hozta létre. A cél egy csatolt légkör-óceán-felszín-bioszféra modell megalkotása volt, mely az ECMWF<sup>60</sup> modellre és annak technológiájára épül. Az EC-EARTH szimulációi is hozzájárultak a nemzetközi éghajlatváltozási becslések elkészítéséhez, a CMIP5 projekt keretein belül. Folyamatos fejlesztése biztosítja az egyre megbízhatóbb előrejelzéseket, melyek országos és nemzetközi szinten is segítséget nyújthatnak a döntéshozók számára.

Harmadik változata egyben legújabb verziója, az ECMWF légköri modelljét (IFS<sup>61</sup>), ezen kívül általános óceáni cirkulációs modellt (NEMO), felszín modellt (H-TESSEL<sup>62</sup>), tengeri jég modellt (LIM), valamint az ezeket összekapcsoló Oasis platformot tartalmazza. Ezek közül az első kettő alkotja a modell legfontosabb részeit. A felbontás tekintetében különböző konfigurációit különböztetik meg a modellnek, melyek a T159, a T255 és a T799 (Hazeleger, 2010). A modell fontosabb összetevőinek részletes ismertetése az alábbiakban következik.

- *IFS:* az ECMWF globális időjárás előrejelző modellje, melyet 12 óránként 16 km-es felbontással futtatnak. Ezt használja az EC-EARTH is légköri komponensként. A modell 3D-s Navier-Stokes egyenleteket és spektrális módszert használ a légkör dinamikájának kiszámítására, melynek segítségével minden rácspontra meghatározza a produktumok értékét (Hazeleger, 2010).
- NEMO: óceáni modell, mely tartalmazza többek között a biogeokémiára, illetve a tengeri jégre vonatkozó információkat is (Madec, 2008). Több klímamodellben is használják, így az IPCC Ötödik helyzetértékelő jelentésében megjelenő CNRM-CM5, és CMCC-CMS klímamodellekben is, ezért a 3.5, illetve a 3.9 alfejezetekben ezzel kapcsolatban már összegeztem a legfőbb tulajdonságokat.

<sup>&</sup>lt;sup>60</sup> European Centre for Medium Range Weather Forecasting (ECMWF) - Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ

<sup>&</sup>lt;sup>61</sup> Integrated Forecasting System (IFS) - Intergrált Előrejelző Rendszer

<sup>&</sup>lt;sup>62</sup> Hydrology-Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchange over Land (H-TESSEL) - Hidrológiai egységű ECMWF szerinti séma a szárazföldi felszíni kicserélődés leírására

- H-TESSEL: Az EC-EARTH földfelszíni modellje, melv az ECMWF földfelszíni • modelljének a TESSEL-nek a hidrológiai viszonyokkal való kapcsolásával jött létre. Összesen hatféle felszíntípust különböztet meg a szárazföldön: csupasz földfelszín, alacsony és magas vegetáció, csapdázott víz, árnyékos és napsütötte hófelszín. Ezen kívül tartalmaz kétféle vízfelület típust: fagyott és folyékony víz (Balsamo et al., 2010). Deardorff (1978) alapján a modell vertikálisan négy talajréteget (7 cm, 21 cm, 72 cm, 189 cm) különít el, melyre még egy hóréteg kerülhet. A talaj hőháztartása a Fourrier diffúziós törvényt követi Viterbo et al. (1999) leírása szerint. Az energiaegyenlet megoldásához a nettó felszíni hőfluxust felső peremfeltételnek tekinti és nullának veszi. A csapadék felhalmozódást egy intercepciós réteg biztosítja a modellben, amíg telítetté nem válik az adott réteg, a fennmaradó csapadékot pedig megosztja a felszíni lefolyás és az infiltráció között. A felszín alatti vizek viselkedését a Darcy-törvény határozza meg. A talajhidrológiai viszonyokra vonatkozóan a különböző talajtípusok helyett egy egységes agyagos talajt használ. A talaj hidraulikai tulajdonságait pedig a Clapp és Hornberger séma írja le. A felszíni lefolyás általános változása a beszivárgás mértékétől függ, amit a talajtípus és a topográfia határoz meg (Pappenberger et al., 2009).
- Oasis: A CERFACS<sup>63</sup> (Franciaország), a DKRZ<sup>64</sup> (Németország), és a CNRS<sup>65</sup> (Franciaország) által, az EU-FP7-IS-ENES projekt keretein belül fejlesztett platform, mely lehetővé teszi az információcserét a modell egyes elemei között. Jelenleg mintegy 30 klímamodell használja, többek között az EC-EARTH (Valcke, 2006).
- ORCA1-T159 konfiguráció: ebben az esetben az IFS légköri modell 128 km-es rácsfelbontású, 62 vertikális szinttel. A NEMO 1°-os (kb. 110 km) rácsfelbontású 42 vertikális szinttel. Láthatóan a légköri és az óceáni modell felbontása szorosan illeszkedik. Mivel azonban az IFS sokkal több fizikai folyamatot foglal magában, így jóval több a számítási igénye, mint a NEMO-nak. Az IFS és a NEMO időlépcsője is egyaránt 1 óra (Donner et al., 2012).
- ORCA1- T255 konfiguráció: 2011 novemberében jelent meg a fejlesztés, mely az EC-EARTH 3.1-es verziója, ebben a légkör alapértelmezett rácsfelbontása változott, az

<sup>&</sup>lt;sup>63</sup> Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) - Európai Tudományos Kutatási és Képzési Központ

<sup>&</sup>lt;sup>64</sup> Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) - Német Klímakutatási Központ

<sup>&</sup>lt;sup>65</sup> Centre national de la recherche scientifique (CNRS) - Francia Nemzeti Tudományos Kutatási Központ

IFS légköri modell 91 vertikális szintet tartalmaz és 0,7°-os horizontális felbontású, a NEMO hasonlóan 42 vertikális szinttel rendelkezik és 1°-os horizontális felbontással. Az IFS és a NEMO időlépcsője ebben a verzióban is 1 óra maradt (Donner et al., 2012).

 ORCA0.25- T799 konfiguráció: az EC-EARTH nagyfelbontású változata. A légkörre és óceánra nézve is 25 km a horizontális rácstávolság. A légköri modell időlépcsője 12 perc, az óceáni modellé 20 perc, a tengeri jégre vonatkozó modellé pedig 1 óra (Donner et al., 2012).

## 3.13. FIO-ESM<sup>66</sup>

A kínai Oceanográfiai Intézet komplex Föld-rendszer modellje, mely fejlesztésének fő célja az óceán felszíni hullámok éghajlati rendszerre gyakorolt hatásainak vizsgálata volt. Annak ellenére, hogy Hasselmann már 1991-ben javasolta a felületi gravitációs hullámok modellezésének beépítését a komplex Föld-rendszer modellekbe, a legtöbb kutató mégis úgy vélte, hogy ezek jellemző tér- és időbeli skálája túl kicsi ehhez (Qiao et al., 2013). Az elvégzett modellkísérletek azonban bebizonyították, hogy a klímamodellek futtatása során érdemes a felületi gravitációs hullámokat figyelembe venni.

A modell tartalmaz légköri, óceáni, földfelszíni, felületi hullám modellt, óceáni biogeokémiai és tengeri jég modell komponenseket is, melyeket az NCAR kapcsoló modellje, a CPL6 köt össze. A továbbiakban ezek rövid bemutatása következik.

CAM3.0: Az NCAR által kifejlesztett légköri modell harmadik verziója, melynek horizontális felbontása 2,875° × 2,875°, az Északi-sark környékén azonban 1,1° a hosszúsági, és 0,3°-0,5° a szélességi körök mentén. A modell vertikális szintjeinek száma 26, melyek közül a legmagasabb 3,545 hPa-on van (Collins et al., 2006b). Parametrizációit tekintve a Zhang és McFarlane (1995) mély konvekciós sémát alkalmazza. A korábbi modell verziókhoz képest több fejlesztés is történt, többek között a kondenzáció és az evaporáció parametrizálásában (Zhang et al., 2003). Új termodonamikai csomagot építettek be a tengeri jég modellbe, melynek felhasználásával a hótakaró vastagságot, az ún. sóujjakat, a belső rövidhullámú sugárzás átvitelt és a felszíni albedót határozzák meg. További újítás a vízgőz hosszúhullámú abszorpciójának emissziójának alkalmazott és leírására parametrizációs séma. A közeli infravörös tartományban a vízgőz általi abszorpciót

<sup>&</sup>lt;sup>66</sup> First Institute of Oceanography - Earth System Model (FIO-ESM) - Elsőszámú Oceanográfiai Intézet - Földrendszer modellje

is fejlesztették, ennek parametrizációja a HITRAN2 $k^{67}$  adatbázison alapul (Rothman et al., 2003). Mindezeken kívül a konvektív csapadék párolgásának leírásában is történtek módosítások. Külön levegőkémai modellt ugyan nem tartalmaz, de a kénkibocsátást, annak száraz és nedves ülepedését és kémiai folyamatait modellezi, valamint a légköri CO<sub>2</sub> transzport leírását is tartalmazza (Collins et al., 2006b).

- CLM3.5: A földfelszíni modell felbontása a légköri modellével egyezik meg, szintén az NCAR fejlesztése. A modell egyik legfontosabb fizikai változója a talajnedvesség állapota. Ez szabályozza ugyanis a víz- és energiaegyenleget a földfelszínen, illetve szállítja a vizet és a hőenergiát a légkör alacsonyabb rétegei és földfelszín között. А talajnedvességben bekövetkező változások а megváltoztathatják a talaj hőkapacitását és a felszíni albedót is, ami pedig további változásokat idézhet elő a nedvességi és termikus viszonyok egyenlegében a légkör alacsonvabb rétegei és a földfelszín között. Ezek a változások kulcsfontosságúak lehetnek a szinoptikus skálán és az éghajlattani folyamatokban egyaránt (Li et al., 2011). Az előző verziókhoz képest javult a fagyott talaj modellezése és megjelent a folyók általi szállítás szimulációja is. A növényzettel borított területeken a növényzet funkcionális típusok szerinti elkülönítését alkalmazták, hogy a rácscellán belüli heterogenitást biztosítsák. Jelentős javulás történt a korábbi CLM3.0-hoz képest a víz- és energiaciklus leírásában is (Li et al., 2011), bár előbbi esetében még mindig nagy a torzítás. Ezen kívül fejlesztették a lombkorona általi intercepció, a lefolyás, a szén- és nitrogénciklus leírását is, valamint javult a felbontása az evaporáció és a rendelkezésre álló talajvíz modellezésének is (Niu et al., 2007).
- POP2.0: Az NCAR óceáni modellje, melyet a CCSM4 globális klímamodell is használ, horizontális felbontása 1,125° a hosszúsági és 0,27-0,64° a szélességi körök mentén. Vertikálisan 40 szintet tartalmaz mélység szerinti vertikális koordinátázással, a felszínhez legközelebbi szint 5 m mélységben található. A modell legfontosabb jellemzői között említhető a keveredési réteg (Fox-Kemper et al., 2008), a horizontális viszkozitás és a vertikális irányú keveredések parametrizációja. Az állapotegyenletre vonatkozóan Boussinesq-közelítést

<sup>&</sup>lt;sup>67</sup> High ResolutionTransmission (HITRANK) - Nagyfelbontású átviteli modell
alkalmaz (Dewar et al., 1998), ezen kívül leírja még az édesvíz tengerekbe történő bekeveredést is.

- MASNUM: Az óceáni felszíni hullámokat leíró modellkomponens. Ezeknek a felületi hullámoknak két fontos szerepük is van. Egyik, hogy a megtörő hullámok befolyásolják a levegő és a tenger közötti fluxusokat. Azáltal, hogy ezeket az óceán felszíni hullámokat beépítették az AGCM-be, javult a globális tengerszinti nyomás modellezése (Yu et al., 2005). Ugyanakkor a töréshullámok befolyásolhatják a tenger és légkör közötti hőfluxust és gázátvitelt is, mint például a vízgőz, CO<sub>2</sub> és aeroszol fluxusok (Wunsch és Ferrari, 2004). A légkör és a tenger közötti fluxusok parametrizációjánál a felszíni hullámok beépítésével nagymértékben sikerült csökkenteni a bizonytalanságot. Ez azt jelzi, hogy a felületi hullámok fontos tényezőt jelentenek a légkör és a tenger közötti fluxusok parametrizációjában (Guan és Xie, 2004). Másrészt a felületi hullámok meghatározó szerepet játszanak a felső óceáni réteg vertikális átkeveredésében is, mivel a megtörő hullám vertikális átkeveredést idéz elő (Craig és Banner, 1994). Az ilven típusú keveredés azonban csak néhány méteren befolyásolja a felső óceáni réteget, ami éppen a hullám amplitúdójával egyezik meg. A nem-megtörő hullámok okozta vertikális átkeveredésről a laboratóriumi kísérletek megállapították, hogy ezek játsszák a kulcsszerepet a felső óceánban (Qiao et al., 2010), és hatékonyan javítják az óceáni modellekben a felső óceáni réteg hőmérsékletére vonatkozó szimulációkat (Huang et al., 2012), így természetesen fontosnak vélték a felszíni hullámok modellezését a klímamodellben.
- OCMIP2: A FIO-ESM biogeokémiai modellje, mely az óceáni szénciklust modellezi. Az óceánokban a tápanyag bevitelnek három forrását különbözteti meg: a légkörből való kiülepedést, a folyók általi behordást, és az üledék lerakódását. A nettó fitoplankton növekedés kiszámításához szükséges a sugárzási és hőmérsékleti viszonyok ismerete, melyek a dinamikai modellből nyerhetőek ki. A modellszámításokhoz a következő változók ismeretére is szükség van: O<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, SiO<sub>3</sub>, és C<sup>14</sup> izotóp tartalom, valamint lúgosság. Ezeket tartalmazó adatbázisok azonban a legtöbb esetben nem állnak rendelkezésre, így közelítést kell alkalmazni (Bao et al., 2012).

 CICE4.0: A tengeri jég komponens felbontása és legfontosabb tulajdonságai (Hunke és Lipscomb, 2008) megegyeznek a 3.3., a 3.8. és a 3.10. alfejezetekben leírtakkal.

# 3.14. INMCM4<sup>68</sup>

Az INMCM4 az Orosz Tudományos Akadémia Numerikus Matematikai Intézetének a modellfejlesztése. A klímamodell két alapvető blokkból épül fel: az általános légköri és óceáni cirkulációt leíró modellekből.

A légköri modell a háromdimenziós hidro-termodinamikai egyenletrendszeren alapul, amely véges különbséges közelítéssel oldható meg. A modell felbontása a korábbi, INMCM3 verzióhoz képest javult. A horizontális felbontást  $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ -ról  $2^{\circ} \times 1,5^{\circ}$ -ra finomították, a vertikális szintek száma változatlanul 21 maradt, az időlépcső pedig 12 percről 5 percre csökkent. Az alapvető fizikai folyamatok – például a sugárzás, az erős és gyenge konvekció, a domborzat és a nem-domborzat keltette gravitációs hullám ellenállások, valamint a talajban illetve növényzetben lejátszódó folyamatok – parametrizációi csak kismértékben módosultak (Vodolin et al., 2010).

Az óceáni modell térbeli felbontása a korábbi verzióhoz képest ebben az esetben is javult. A horizontális felbontás  $2,5^{\circ} \times 2^{\circ}$ -ról  $1^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ -ra nőtt, a vertikális szintek száma pedig 33-ról 40-re. A modell számítási időlépcsője 2 óra, a hő- és sótranszport esetén pedig 30 perc. Ez utóbbi számítására implicit séma helyett explicit Adams-Bashforth sémát használ, mely számítása a hosszú távú éghajlati számítások esetében meghatározó. A hőmérséklet és a sótartalom változására a vertikális irányú diffúzió helyett izentropikus diffúziót használ konstans együtthatóval. Az óceáni modellhez tartozik a tengeri jég dinamikáját és termodinamikáját leíró modell is (Vodolin et al., 2010).

A légköri és az óceáni modell csatolásával történik a hő- és az édesvíz-fluxus, valamint a szél hatásainak továbbítása a légkörből az óceánba, illetve a felszíni hőmérséklet és a tengeri jég hatásainak beépítése az óceánból a légkörbe. Megemlítendő még, hogy az előző verzióban még szerepelt az édesvíz-fluxus korrekciója a Norvég-tengernél, de ebben már nem. Az édesvízi lefolyás szempontjából 48 nagyobb vízfolyást vesznek figyelembe. Ez azért fontos, mert az óceáni sótartalom változására az édesvizekből érkező lefolyás a hígulás révén hatással van (Vodolin et al., 2010).

A légköri és az óceáni modell mellett a klímamodellbe beépítésre került még szén-dioxid és metánciklus számítására vonatkozó komponens is.

<sup>&</sup>lt;sup>68</sup> Institute of Numerical Mathematics Climate Model version 4 (INMCM4) - Numerikus Matematikai Intézet éghajlati modelljének negyedik verziója

## 3.15. IPSL-CM5-LR/MR és IPSL-CM5B-LR

Az IPSL-CM5 a francia Pierre Simon Laplace Intézet által fejlesztett IPSL modell legutóbbi változata, mely a komplex Föld-rendszer modellek közé tartozik. A légköri, földfelszíni, óceáni és tengeri jég modellek mellett tartozik még hozzá szénciklus modell, valamint a troposzféra és sztratoszféra kémiai folyamatait tartalmazó modell is. A légköri, óceáni és tengeri jég modelleket az Oasis kapcsolja össze. A modellnek két verziója van, az IPSL-CM5A és az IPSL-CM5B, melyek közötti fő különbség a légköri modellek nagyon eltérő fizikai parametrizációjában van (Flato et al., 2013). Az IPSL-CM5A-LR és az IPSL-CM5B-LR modellek paraméterezése, felbontása és komponensei megegyeznek, kivéve a légköri komponenst. A légkör tetejére érkező sugárzási fluxus egyforma ugyan, a két változatnál, azonban a nettó sugárzási fluxus a légkör tetején nem nulla még egyensúlyi helyzetben sem, mert az energia nem teljesen konzerválódott az 5B változat légköri modelljében. Ez a különbség a légkör tetejére érkező nettó sugárzási fluxusban - 0,71 W/m<sup>2</sup> az 5A-LR modellben (Dufresne et al., 2013). A továbbiakban az egyes modellkomponensek rövid ismertetése következik.

LMDZ<sup>69</sup>: Az IPSL-CM5 légköri modellje, melynek felbontása alapján két változata • van. Az IPSL-CM5A-LR és az IPSL-CM5B-LR durvább felbontásúak 1,9° × 3,75°-os horizontális rácstávolsággal. Az IPSL-CM5A-MR modell pedig közepes felbontású 1,25° × 2,5°-os horizontális rácstávolsággal. Az előző modellverzióhoz képest a vertikális szintek száma mindkét esetben 19-ről 39-re nőtt, ebből 15 szint 20 km feletti magasságban van. A legmagasabb nyomási szint 0,04 hPa. A felbontás mellett különbség van a turbulencia, a konvekció és a felhőzet parametrizálásában is (Hourdin et al., 2013). A modell részét képezi a REPROBUS<sup>70</sup> sztratoszférikus levegőkémiai modell is, valamint az INCA<sup>71</sup> troposzférikus levegőkémiai modell, amely az aeroszol részecskék és a gázrészecskék eloszlását és az ezekhez kapcsolódó folyamatokat szimulálja. A modell számításba veszi a felszíni és az in-situ kibocsátásokat (villámlás, repülőgép), a kémiai átalakulásokat, valamint a kiülepedési folyamatokat. A modell 117 féle nyomanyaggal dolgozik, ezen kívül 223 homogén kémiai reakció, 43 fotolitikus reakció és 6 féle heterogén kémiai reakció van beleépítve (Dufresne et al., 2013).

<sup>&</sup>lt;sup>69</sup> Laboratoire de Meteorologie Dynamique (LMDZ) - Dinamikus Meteorológiai Laboratórium

<sup>&</sup>lt;sup>70</sup> Reactive Processes Ruling the Ozone Budget in the Stratosphere (REPROBUS) - Sztratoszférikus ózonegyenleget meghatározó kémai reakciók modellje

<sup>&</sup>lt;sup>71</sup> INteraction with Chemistry and Aerosol (INCA) - Aeroszol részecskék levegőkémiai kölcsönhatásainak modellje

- ORCHIDEE<sup>72</sup>: Az IPSL földfelszíni modellje, mely az energia- és vízciklust szimulálja a talaj és a vegetáció között. A földfelszínt 12 féle növényzet típusra, valamint csupasz talajra osztja (Krinner et al., 2005). A fotoszintézist 30 perces időlépcsőben számítja, míg a szén allokációját a talaj és a különböző növények között napi időlépcsőben. Mivel a légköri modellhez kapcsoltan került beépítésre, így az LMDZ-vel megegyező a tér- és időbeli felbontása. A kapcsolás a hő- és vízfluxusokon keresztül implicit módon történik Marti et al. (2010) munkája alapján.
- NEMO: Ez alkotja az óceáni modellt, ehhez csatolva jelenik meg az óceándinamikai modell és az óceáni biogeokémiai modell, valamint a LIM2 tengeri jég modell is. ORCA2 konfigurációt használ, amely tripoláris globális rácsú. A modell horizontális felbontása 2° × 2°, a trópusokon pedig 0,5°. A vertikális szintek száma 31, a felszínhez legközelebbi szint magán a vízfelszínen, azaz 0 m-en van (Madec, 2008).
- *LIM2:* A 3.9. alfejezetben ismertetett legfontosabb tulajdonságai a modellnek az IPSL modellcsalád esetében is érvényesek. A felszíni albedó parametrizációja a felszíni hőmérséklet, valamint a hó és jégvastagság függvényében történik. A jég vertikális és oldalirányú növekedését a prognosztikai energiaháztartási egyenletből nyeri a jég alsó és felső határrétegei között (Dufresne et al., 2013). A jég belső erejének számítására a Hibler (1979) által kidolgozott viszkózus-plasztikus konstitutív törvényt használják. E szerint a jég ereje a jég vastagságának és tömörségének függvénye. A meghatározott fizikai mezők: a jégmennyiség, a hó és jég térfogata, valamint entalpiája. A modell horizontális felbontása a NEMO felbontásával egyezik meg.
- PISCES<sup>73</sup>: Ez az óceáni almodell szimulálja a szénciklust, valamint az oxigénben és fontosabb tápanyagokban (foszfát, nitrát, ammónium, kovasav és vas) való ellátottságot, mely az óceáni fitoplanktonok fejlődéséhez szükséges. A szén körforgalmához kapcsolódó kémiai modellezés az OCMIP2<sup>74</sup> modellel történik (Najjar et al., 2007), amely a tenger és a légkör közötti CO<sub>2</sub> és O<sub>2</sub> cserén alapul. A szén és a különféle tápanyagok utánpótlása az óceánban három forrásból történik: légköri kiülepedés, folyók, valamint az üledék mozgása. Ezek közül a légköri kiülepedést (vas, nitrogén, foszfor, szilicium) az INCA modell becsli, a folyók szén- és

<sup>&</sup>lt;sup>72</sup> ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms (ORCHIDEE) - Szén és hidrológiai ciklus a dinamikus ökoszisztémákban

<sup>&</sup>lt;sup>73</sup> Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies (PISCES) - Pelágikus interakciós séma a szénciklus és az ökoszisztémák tanulmányozására
<sup>74</sup> Ocean Carbon Model Intercomparison Project (OCMIP2) - Óceáni szénciklus modellek összehasonlító

<sup>&</sup>lt;sup>74</sup> Ocean Carbon Model Intercomparison Project (OCMIP2) - Oceáni szénciklus modellek összehasonlító projektje

tápanyagszállítása Ludwig et al. (1996) alapján, míg az üledék mozgásából származó bevétel Aumont és Bopp (2006) munkája alapján kerül számításra. A PISCES a légkör és az óceán közötti szénfluxus számításánál figyelembe veszi a biológiai produktivitáshoz kapcsolódó klorofillkoncentrációt is, mely kihat az óceáni hőháztartásra a fény visszaverődés befolyásolása által (Dufresne et al., 2013).

# 3.16. MIROC<sup>75</sup>

A MIROC modellcsalád a Tokiói Egyetem fejlesztése, melynek három fő modellje van: a MIROC5, mely légkör-óceán általános cirkulációs modell, illetve a MIROC-ESM és a MIROC-ESM-CHEM, melyek komplex Föld-rendszer modellek.

A dolgozatban vizsgált MIROC5 néhány szempontból ugyan rosszabbnak tekinthető elődjénél, a MIROC3-nál, más téren viszont sokkal jobb eredmények érhetők el vele. Ilyen például a csapadék, az átlagos, zonális légköri mezők, az egyenlítői óceánfelszín alatti területek vagy az ENSO jelenségkör vizsgálata. Különbségként említhető még, hogy javult a modell felbontása is. Tartalmaz légköri modellt (ehhez aeroszol modellezés is tartozik), földfelszíni modellt, óceáni modellt és tengeri jég modellt is (Watanabe et al., 2010). Az alábbiakban ezek rövid bemutatása következik.

- CCSR/NIES/FRCGC AGCM6: Hibrid σ-p koordináta rendszert használ, mely a korábbi MIROC3-beli σ koordinátát váltotta fel. A modell horizontális felbontása 1,41° × 1,41° a vertikális szintek száma pedig 40. A legmagasabb szint 3 hPa-on van (Watanabe et al., 2010). A modell számít sugárzás transzportot, melynél az előző modellhez képest 18-ról 29-re nőtt az abszorpciós sávok száma, így javult a sugárzás fűtő hatásának és a troposzféra hűtő hatásának figyelembe vétele. Továbbá tartalmaz cumulus konvekciós sémát is. A modell többféle felhőtípust is megkülönböztet a felhőtető tulajdonságai alapján. A felhőalap tömeg fluxusának meghatározásához a prognosztikus konvektív kinetikus energia lezárást használja (Xu, 1993). Ezeken kívül a modell számol még a felhőkre vonatkozóan mikrofizikai karakterisztikákat, valamint turbulenciát is.
- SPRINTARS<sup>76</sup>: A MIROC aeroszol modulja, ami a légköri modellen belül található. A troposzférában lévő legfontosabb aeroszol részecskék (elemi szén, szerves anyagok, szulfát, por, tengeri só, kén-dioxid, dimetil-szulfid) tömegkeverési arányát adja meg. Modellezi az aeroszolszállítással kapcsolatos folyamatokat: az emissziót, az advekciót,

<sup>&</sup>lt;sup>75</sup> Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) - Interdiszciplinális éghajlatkutató modell

<sup>&</sup>lt;sup>76</sup> Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS) - Spektrális sugárzási szállítási aeroszol modell

a diffúziót, a kénkémiát, a nedves ülepedést, a száraz ülepedést vagy a gravitációs ülepedést. Meghatározza a talajfelszínről származó por, a dimetil-szulfid és a tengeri só részecskék kibocsátását a modellen belüli folyamatok és a valós kibocsátási adatok alapján. Lényeges továbbá, hogy csatolva van a felhő mikrofizikai és sugárzási sémával, hogy számítani tudja az aeroszol részecskék közvetett és közvetlen hatásait (Takemura et al., 2005).

- COCO4.5<sup>77</sup>: A MIROC5 óceáni modellje. Az előző változathoz képest a koordináta rendszerben jelentek meg változtatások, mivel az alapegyenletek görbe vonalú koordináta rendszerben vannak leírva. A szélességi és a hosszúsági körök menti általánosításhoz és transzformáláshoz polár sztereografikus projekciót használ (Bentsen et al., 1999). A modell horizontális felbontása 1,4° × 0,5° az Egyenlítőtől a 8° szélességekig és 1,4° × 1,4° innentől a sarkok felé. Vertikálisan 50 szintet tartalmaz a korábbi 43 helyett, melyek közül a felszínhez legközelebbi szint 1,25 m mélyen van. A vertikális rácstávolságok változása a mélységgel: 2,5 m a felszín közelében, 20 m 100 m-es mélységben, 100 m 1000 m-es mélységben és 250 m a 2000 m alatti mélységben. A fizikai parametrizálás az előző verzióhoz képest javult a vertikális konvekciónál és az alsó határrétegnél is (Hasumi, 2006).
- Tengeri jég modell: A MIROC3 még kétdimenziós kontinuumként kezelte a tengeri jég dinamikáját. Koncentrációját, vastagságát és a horizontális sebesség komponenseket minden egyes rácspontban kiszámolta. A MIROC5-ben viszont már több kategória szerepel, hogy a tengeri jég koncentrációját, vastagságát és a jég olvadási energiáját meghatározzák minden egyes rácspontban. Horizontális irányban a tengeri jég öt vastagsági kategóriáját (0,3 m, 0,6 m, 1 m, 2,5 m és 5 m) különbözteti meg, valamint a nyílt vizet (Komuro et al., 2012).
- MATSIRO<sup>78</sup>: A MIROC5 földfelszíni modellje, mely a hőmérsékleti és víz ellátottsági viszonyokat a lombkorona szinttől egészen 14 m-es mélységig határozza meg. Ebben a változatban olyan területegységeket hoztak létre, melyek a szárazföldi felszínt egy-egy földfelszín típust reprezentáló kisebb részekre osztja fel. A rácshálózaton belül egy földfelszíni rácscella háromféle területegységre (vegetáció, művelt terület és tófelszín) van felosztva a kontrollfuttatásnál. Minden prognosztikai és diagnosztikai

<sup>&</sup>lt;sup>77</sup> CCSR (Center for Climate System Research) Ocean COmponent Model (COCO4.5) - Klímarendszer Kutató Központ óceáni komponens modelljének 4.5-ös verziója

<sup>&</sup>lt;sup>78</sup> Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and RunOff (MATSIRO) - Felszíni kölcsönhatásokat és a lefolyást kezeló modell

változót kiszámol a modell minden egyes területegységre és a földfelszíni fluxusokat az alapján átlagolja, hogy egy rácscellában milyen arányban fordul elő a három különböző felszíntípus. A modellen belül van egy tavi modell, egy folyókhoz köthető lefolyási modell és egy hó-jég albedó modell is (Takata et al., 2003).

A MIROC-ESM és MIROC-ESM-CHEM modellek a MIROC modellcsalád komplex Föld-rendszer modelljei, melyek közötti fő különbség, hogy az utóbbi levegőkémiai modellt is tartalmaz a légköri, aeroszol, óceáni, óceáni biogeokémiai, földfelszíni és tengeri jég modellek mellett. Az alábbiakban azoknak a modelleknek a rövid bemutatása következik, melyek eltérnek a már bemutatott modellektől (Watanabe et al., 2011).

- MIROC-AGCM: A légköri modell horizontális felbontása 2,81° × 2.81°, a vertikális szintek száma pedig 80. A legmagasabb szint 0,003 hPa-on van. A modell fizikai parametrizációi: a sugárzási séma és a cumulus parametrizációs séma (Flato et al., 2013).
- CHASER<sup>79</sup>: A MIROC-ESM-CHEM levegőkémiai modellje, mely többek között a troposzféra és a sztratoszféra fotokémiai folyamatait vizsgálja, valamint a halogén vegyületekhez kapcsolódó kémiai folyamatokat (Watanabe et al., 2011). A jelenlegi verzió az O<sub>x</sub>-NO<sub>x</sub>-HO<sub>x</sub>-CH<sub>4</sub>-CO molekulák alapvető kémiai ciklusát és az illékony szerves vegyületekkel való oxidációját tartalmazza. Összesen 92 kémiai anyagot és 262 kémiai reakciót (58 fotolitikus, 183 kinetikus, 21 heterogén) képes modellezni (Sudo et al., 2002).
- COCO3.4: A MIROC-ESM és a MIROC-ESM-CHEM óceáni modellje, mely a légköri modellnél finomabb felbontású. Horizontális felbontása a COCO4.5-nél tárgyaltakkal megegyező, a vertikális szintek száma viszont csak 44. Ezek megoszlását tekintve nyolc szint található a felszín közelében, és 35 a mélyebb rétegekben, egy további réteg pedig a határréteg parametrizációjához szükséges (Hasumi és Emori, 2004).
- NPZD-type<sup>80</sup>: Az óceáni modellbe beépített biogeokémiai modell, mely az eufotikus és nitrogén bázis rétegben az elsődleges biológiai produktivitást és tápanyag termelést számítja (Kawamiya et al., 2000). A szén és a kálcium áramok meghatározásához

<sup>&</sup>lt;sup>79</sup> CHemical atmospheric general circulation model (AGCM) for study of AtmoSpheric Environment and Radiative forcing (CHASER) - Kémiai légköri általános cirkulációs modell a légköri környezet és a sugárzási kényszer tanulmányozására

<sup>&</sup>lt;sup>80</sup> Type of Nutrient-Phytoplankton Zooplankton-Detritus Model (NPDZ) - Fitoplankton tápanyag és zooplankton bomlástermék modell

állandó Redfield-aránnyal számol, vagyis a szén és nitrogén arányát 6,625-nek veszi. Ezeken kívül CO<sub>2</sub> fluxust is számol a légkör és az óceán között.

## *3.17. MPI-ESM*

A modell a komplex Föld-rendszer modellek csoportjába sorolható, melyet a németországi Max Planck Intézet fejlesztett ki. Jellemzője, hogy az óceánon, a szárazföldi felszíneken és a légkörön keresztül, az energia, az impulzus, a víz és a fontosabb gázok (pl.: CO<sub>2</sub>) kicserélődését írja le. Ennek a modellnek a fejlesztése is a CMIP5 keretein belül zajlott (IPCC, 2013). Az MPI-ESM légköri modellje az ECHAM6, mely az ECHAM5 továbbfejlesztett változata, óceáni GCM modellje pedig az MPIOM<sup>81</sup> (Roeckner et al., 2006). A légköri és az óceáni modell közötti kapcsolatot az Oasis3 összekapcsoló platform teremti meg. Légköri modelljének horizontális rácsfelbontása 1,9°, vertikálisan pedig 47 szintet tartalmaz (80 km-es magasságig). Az MPIOM óceáni modell rácsfelbontása 1,5°. Felszíni modellje a JSBACH<sup>82</sup>, mely a globális szénciklus óceáni és szárazföldi részét számolja ki, ami az ECHAM6-ba és a HAMOCC<sup>83</sup> óceáni biogeokémiai modellbe van beágyazva.

A modellnek két változata van, az MPI-ESM-MR és az MPI-ESM-LR, melyek közötti legfontosabb különbség a vertikális felbontásban van. Előbbi légköri modellje 95 vertikális szintet tartalmaz, míg utóbbié csak 47-et. A továbbiakban a modell egyes komponenseinek bemutatása következik.

• ECHAM6: az ECHAM modellcsalád fejlesztése során a 6. verzió, melynek legfontosabb új elemei: a rövidhullámú sugárzásbevétel számítása, a modell felső szintjének magassága, valamint egy kisebb mértékű változtatás a konvektív triggerekben. Szintén változás történt a modell horizontális felbontásában, mely T63-as konfigurációjú, vagyis 1,8° × 1,8°. Ennek ellenére a korábbi modell változatokhoz hasonlóan továbbra is jelentős a torzítás a kisebb skálájú fizikai folyamatok parametrizációjában. A modell vertikális felbontása nőtt a középső troposzférában, melynek következtében csökkent a modell hőmérsékleti hibája a felső- és középső troposzférában. A modellben tapasztalt legnagyobb javulás a trópusokon kívüli cirkulációban figyelhető meg. A fejlesztéseknek köszönhető kedvező változások mellett maradtak még hiányosságok is, például az alacsony szintű felhőzet modellezése, a nagy csapadékú zónák szisztematikus észak felé helyeződése, a

<sup>&</sup>lt;sup>81</sup> Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) - Max Planck Intézet óceáni modellje

<sup>&</sup>lt;sup>82</sup> Jena Scheme for Biosphere Atmosphere Coupling in Hamburg (JSBACH) - Jénai séma a bioszféra és a légkör kapcsolására

<sup>&</sup>lt;sup>83</sup> HAMburg Ocean Carbon Cycle (HAMOCC) - Hamburgi óceáni szénciklus modell

szárazföld és az óceánok feletti csapadékzónák hibás megoszlása – különösen a trópusokon – (Stevens et al., 2013).

- MPIOM: óceáni modell, mely lényegében egy primitív egyensúlyi modell, ami hidrosztatikai és Boussinesq-közelítést alkalmaz. Magában foglal egy dinamikus/termodinamikus tengeri jég modellt és a tengerfenéki meredek topográfiára vonatkozó alsó határréteg modellt is. Előbbi feladata, hogy egyensúlyt teremtsen a turbulens légköri sugárzási fluxus és az óceáni hőfluxus között. Megjelenik benne a tengeri jégen történő hófelhalmozódás, valamint a hó-jég átalakulás hatásának figyelembe vétele is. A modell a jégképződési és a jégolvadási folyamatokat 5 psu értékű állandó sókoncentráció mellett számolja. Görbe vonalú ortogonális rácsot használ, mely a modell különböző konfigurációit teszi lehetővé. Horizontális rácsfelbontása 1,5°. Vertikálisan 40 szintet tartalmaz, a felszínhez legközelebbi szintje 6 m mélységben található (Jungclaus et al., 2013).
- *HAMOCC:* egy MPIOM-on belüli almodell, mely az óceáni vízoszlopban és az üledékben lévő biogeokémiai folyamatokat modellezi. A modell a sugárzási energián keresztül önmeghajtó, mint ahogy az OGCM is a fotoszintézis által. A hőmérséklet és a sótartalom kiszámításához többek között a szén-dioxid oldhatóságát veszi figyelembe. A modell 17 prognosztikai változót számol a vízoszlopban (ezek közül néhány: összlúgosság, oldott szervetlen kén-, foszfát-, nitrát-, szilikát-, oldott oxigén-, oldott szervesanyag tartalom) és 12 változót az üledékben (Illyina et al., 2013). A korábbi változathoz képest a CMIP5 során fontos fejlesztések történtek a modellben. Ezek között említhető a levegő és óceán közötti hőmérséklet korrekció, a fotoszintézis hőmérséklettől való függésének beépítése, a szulfáttartalom csökkentése, valamint a remineralizáció az eufotikus rétegben (Gröger és Mikolajewicz, 2011).
- JSBACH: az ECHAM6 szerves részeként biztosítja az alsó légköri peremfeltételeket a szárazföldön. Eredetileg az ECHAM5 felszíni komponenseinek izolálásából származott különösen a talaj hidrológiai folyamatainak és hőszállításának, valamint a földfelszíni energiamérlegnek a leírása (Roeckner et al., 2003). Azért, hogy a talaj szénfelvételének és leadásának dinamikáját minél pontosabban megadja, a modell központi magja bővült a fotoszintézissel és a lombkorona sugárzási komponenseivel (Knorr, 1998). A felszínborítás földrajzi kiterjedésének természetes változásait a dinamikus vegetációs modul prognosztikusan szimulálja (beleértve a szél- és a tűzkárokat is).

# 3.18. MRI-CGCM3<sup>84</sup>

Ez a globális klímamodell a japán Meteorológiai Kutató Intézet általi fejlesztés, mely neve is utal rá, csatolt globális klímamodell. A CMIP5 keretei között vizsgálták, ahol a fejlesztések két fő irányban haladtak. Az egyik az ún. C-vezérlés, melynél az üvegházhatású gázok koncentrációja és egyéb kényszerek a modell meghajtói. A másik irány pedig az ún. Evezérelt, ahol a légköri kibocsátások a modell meghatározó irányítói. Az MRI modellcsalád is mindkét irányban fejlődött. Így az E-vezérelt modellek közé tartozik az MRI-ESM1, mely levegőkémiai modellel (MRI-CCM2) is rendelkezik, továbbá a szénciklus, illetve a tengeri és szárazföldi ökoszisztémák modellezése is beépítésre került. A C-vezérlésű típust képviseli az MRI-CGCM3, melynek szimulációs eredményeit ebben a dolgozatban felhasználtam. Közelítően az előzővel megegyező konfigurációval rendelkezik, de nincs benne levegőkémiai modell és szénciklus modellezés sem (Yukimoto et al., 2012). A modell a korábbi MRI-CGCM2 klímamodell frissített változata, amit főleg hő-, édesvíz-, és részben momentum fluxus kiigazításokra használtak annak érdekében, hogy regionális klímamodell peremfeltételeiként a Japán környéki éghajlatváltozás vizsgálatában segítsen (Kurihara et al., 2005). A továbbiakban az egyes modellkomponensek rövid ismertetése következik.

MRI-AGCM3: Az MRI-CGCM3 légköri modellje, melynek dinamikáját globális • spektrális modell írja le, ahol a prognosztikai egyenleteket a hidrosztatikus primitív egyenletek adják meg. A modell TL159-es vízszintes felbontású, vagyis horizontális rácsfelbontása 320 km × 160 km. Vertikálisan 48 szintet tartalmaz, melyek közül a legmagasabb szint 0,01 hPa-on van, így a sztratoszférára is teljes egészében kiterjed a modell (Yukimoto et al., 2012). A minél pontosabb eredmények elérése érdekében, egy új tömeg-fluxuson alapuló cumulus sémát építettek be. Tartalmaz felhő modellt is, ugyanis a felhőcseppek és a jégkristályok koncentrációja fontos változó az aeroszol részecskék indirekt hatásainak vizsgálatához. Így a már korábban meglévő Tiedtke felhő modellt (Tiedtke, 1993) bővítették egy új, kétmomentumú ún. bulk felhő modellel (MRI-TMBC), mellyel sikerült jól modellezni a felhőcseppek és jégkristályok konvektív folyamatok során történő kialakulását. A modell részét képezi egy planetáris határréteg modell is, mely egyik fejlesztési iránya a nagy örvények szimulációjára vonatkozik, a másik pedig egy új diagnosztikai egyenlet a keverési hossz számítására (Hara, 2007).

<sup>&</sup>lt;sup>84</sup> Meteorological Research Institute-Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model (MRI-CGCM3) -Meteorológiai Kutató Intézet - Csatolt légkör-óceán általános cirkulációs modell

- MASINGAR mk- $2^{85}$ : Mivel a légköri aeroszol részecskék a földi sugárzási egyenleget több módon is befolyásolják, így kihatnak az éghajlatra. Ezek között említhető, hogy kondenzációs magként betöltött szerepük által befolyásolják a felhő albedóját, a csapadékképződést és a felhő élettartamát is. A hófelületre lerakódva csökkentik az albedót és ezzel fokozzák a hóolvadást (Hansen és Nazarenko, 2004). Az MRI-CGCM3 aeroszol modellje öt aeroszol részecskét vizsgált: a szulfátot, a tengeri sót, az ásványi port, a szerves szént és a kormot. A modell horizontális felbontása TL95-ös, vagyis 180 km × 180 km. A vertikális szintek száma megegyezik a légköri modell szintjeinek számával. A modell a számításokhoz szükséges meteorológiai mezőket (vízszintes szélkomponens, léghőmérséklet, specifikus nedvesség, konvektív tömegáram, csapadékmennyiség, párolgás, konvektív és nagyskálájú felhők, függőleges örvénydiffúzió és felszíni nyomás) és felszíni viszonyokat (felszínközeli szélsebesség, felszíni hőmérséklet, talajhőmérséklet, tengerfelszín hőmérséklete, tengeri jégborítottság, hómennyiség, földhasználat, vegetáció mennyisége és levélfelületi index) a légköri modellből kapja. A modell az ötféle aeroszol részecske koncentrációját és az abszorpciós aeroszol részecskék (korom és ásványi por) ülepedési fluxusát továbbküldi a légköri modellnek, hogy az felhasználja ezeket az aeroszol részecskék direkt és indirekt sugárzási hatásainak és a hó albedójának számításához. A tengeri só alkotta aeroszol részecskékre vonatkozóan ezeket a számításokat két méretre (1 mm-nél nagyobb, illetve kisebb) küldi tovább a légköri modellnek. Ezeken kívül számol még légköri transzportfolyamatokat, száraz és nedves ülepedést és kémiai folyamatokat is (Yukimoto et al., 2012).
- MRI-COM3<sup>86</sup>: Az MRI-CGCM3 óceáni és egyben tengeri jég modellje is, mely a primitív egyenletek megoldására hidrosztatikus és Boussinesq-közelítést alkalmaz. A modell horizontális felbontása 1° × 0,5°. Általánosított ortogonális koordináta rendszert használ a sarkvidéki régióban (64° északi szélességnél magasabb szélességek). A modell vertikális szintjeinek száma 50, valamint egy alsó határréteget is tartalmaz, mely vastagsága 50 m (Nakano és Suginohara, 2002). A felszíni réteg 4 m vastag, és az ez alatti rétegek 1000 m mélységig 30 réteget tartalmaznak. Ahol a vertikális szintek 32 m-nél laposabbak, ott a modell a felszíni topográfiát követi, mint a σ-koordináta rendszerben (Hasumi, 2006). A tengeri jégre vonatkozóan vastagság szerint több kategóriát különböztet meg a modell.

<sup>&</sup>lt;sup>85</sup> Model of Aerosol Species in the Global Atmosphere (MASINGAR) - Teljes légköri aeroszol modell

<sup>&</sup>lt;sup>86</sup> MRI Community Ocean Model Version 3 (MRI-COM3) - MRI Közösségi óceáni modell harmadik verziója

## 3.19. NCAR-CESM1 és CCSM4<sup>87</sup>

Az amerikai Nemzeti Légkörkutató Központ által fejlesztett komplex Föld-rendszer modellek, céljuk a légkör és az ehhez kapcsolódó tudományok kutatása és fejlesztése, így a klímaváltozás modellezése is. A dolgozatban a CCSM4, a CESM1-BGC<sup>88</sup> és a CESM1-CAM5<sup>89</sup> modellek eredményeit használtam fel. Az alábbiakban ezek legfontosabb almodelljeinek bemutatása következik.

- CAM: Az NCAR légköri modellje, melynek több verziója is van. A CESM1-BGC és a • CCSM4 a 4. verziót, a CESM1-CAM5 modell pedig az 5. verziót használja. A modell horizontális felbontása  $0.9^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ , továbbá 27 vertikális szintet tartalmaz, melyek közül a legmagasabb 2,19 hPa-on van. A CAM4-ben a nedvességre vonatkozó fizikai paraméterek fejlesztésére fordították a legnagyobb hangsúlyt a már meglévő Zhang és McFarlane (1995) féle mély konvekciós paraméterezési séma mellett, melyhez szorosan hozzátartozik a rendelkezésre álló konvektív potenciális energia (CAPE) és a momentumtranszport konvektív parametrizálása. А mély konvekció paramterizálásának javulása leginkább az El-Niño modellezése szempontjából fontos. Az 5. verzióban jelentősen javítottak számos fizikai folyamat paraméterezésén. Ezek a parametrizációk lehetővé tették többek között az aeroszol-felhő kölcsönhatás teljes körű szimulációját, beleértve az aeroszol részecskéken történő felhőcsepp képződést, a csapadékképződési folyamatoknak az aeroszol részecske méretétől való függését, illetve a felhőrészecskék sugárzásra gyakorolt hatását. A korábbi modellváltozathoz képest javult a nedvesség turbulencia fizikai parametrizációja (Bretherton és Park, 2009), a sekély konvekciós séma és a felhő makrofizika szimulációja is.
- MAM3<sup>90</sup>: A CAM légköri modellhez tartozó aeroszol modell, mely a természetes és antropogén kibocsátásból származó aeroszol részecskék koncentráció- és tömegváltozásait írja le (Neale et al., 2012). A sugárzási séma frissült a globális klímamodellek gyors sugárzás átviteli sémájával, ami egy hatékony és pontos módszer a sugárzási fluxus és a fűtőhatás meghatározására derült égbolt esetén. Minden rövidhullámú sávban kiszámítja az aeroszol részecskék optikai mélységét, szórási

<sup>&</sup>lt;sup>87</sup> National Center for Atmospheric Research (NCAR) - Amerikai Nemzeti Légkörkutató Központ

<sup>&</sup>lt;sup>88</sup> Community Earth System Model Biogeochemistry (CESM1-BGC) - Közösségi Föld-rendszer modell biogeokémiai modulja

<sup>&</sup>lt;sup>89</sup>Community Earth System Model and Community Atmosphere Model (CESM1-CAM5) - Közösségi Földrendszer és közösségi légköri modell

<sup>&</sup>lt;sup>90</sup> 3-Mode Modal Aerosol Model (MAM3) - Modális aeroszol modell harmadik verziója

képességét és albedóját, valamint minden hosszúhullámú sávban kiszámítja a tömeg specifikus abszorpciót (Iacono et al., 2008).

- *CAM-CHEM:* A CESM modellben a légköri modellhez tartozó levegőkémiai komponens, mely főleg a biogén vegyületek kibocsátását, illetve az aeroszol részecskék hó, jég, óceán és a vegetáció felszínére való kiülepedését modellezi (Neale et al., 2012).
- CLM4<sup>91</sup>: Az NCAR földfelszíni modellje. A korábbi modell verziókhoz képest a cél a legújabb tudományos eredmények beépítése, a földfelszíni folyamatok pontosabb modellezése, a földfelszínen és légkörben ható több kényszerrel való bővítés, valamint a talaj hidrológiai folyamatok kifinomultabb modellezése (talajvíz kölcsönhatások, talaj párolgása) volt. A modell fő változásai között említhető az előzőeken kívül a szén- és nitrogénciklus beépítése, továbbá a felszínborítottság változásának modellezése. A momentum, a szenzibilis és a látens hő meghatározására a Monin-Obukhov-féle hasonlósági elméletet alkalmazza (Bonan et al., 2013).
- POP2<sup>92</sup>: A CESM és a CCSM óceáni modellje, mely horizontális felbontása 1,125° a hosszúsági körök mentén és 0,27°-0,64° a szélességi körök mentén. A modell vertikális szintjeinek száma 60, a felszínhez legközelebbi szint 5 m mélyen van. Vertikális koordinátaként a mélységet alkalmazza. A modell számított mennyiségei: a horizontális és vertikális diffúzió. A parametrizált mennyiségek: a keverési réteg folyamatai, illetve a vertikális konvekció. Ezen kívül a modell Boussinesq-közelítést alkalmaz, figyelembe veszi a hó- és jégolvadást, valamint az édesvíz bekeveredését is (Smith et al., 2010).
- BEC<sup>93</sup>: A CESM1-BGC biogeokémiai modellje, mely az óceán szénfelvételét és széntárolását szimulálja összehasonlítva a megfigyelt értékekkel. Az óceán nagy részén ezek az értékek egyeznek is, viszont jelentős eltérések mutatkoznak az óceáni térség déli részein. Az antropogén eredetű CO<sub>2</sub> felvétel ugyanis a déli félgömb óceánjaiban gyengébb, mint a valóságban, ami jelentős mértékű alulbecslést okoz az antropogén eredetű szén és halogénezett szénhidrogének tárolásában a közepes mélységekben. Ugyanakkor az antropogén eredetű szén mennyisége az Észak-Atlanti régióban kicsit magasabb a megfigyeltnél. Összességében ez a modell jól írja le az

<sup>&</sup>lt;sup>91</sup> Community Land Model version 4 (CLM4) - Közösségi földfelszíni modell negyedik verziója

<sup>&</sup>lt;sup>92</sup> Parallel Ocean Program version2 (POP2) - Párhuzamos óceáni modell második verziója

<sup>&</sup>lt;sup>93</sup> Biogeochemical Elemental Cycling (BEC) - Biogeokémiai elemi ciklus modell

óceáni szénciklus változásának az éghajlat változékonyságára kifejtett hatását (Long et al., 2013).

• *CICE4:* Az NCAR tengeri jég modellje (Hunke és Lipscomb, 2010), melynek legfontosabb jellemzőit a 3.3, a 3.8 és a 3.10 alfejezetkben már bemutattam.

## 4. Eredmények

#### 4.1. A modellek validációs vizsgálata

Ebben az alfejezetben annak bemutatására kerül sor, hogy a vizsgált klímamodellek referencia időszakra kapott eredményei milyen jól közelítették a múltban ténylegesen bekövetkezett hőmérsékleti értékeket. Ennek vizsgálatára Welch-próbát alkalmaztam (Dévényi és Gulyás, 1988), mely során a klímamodellek referencia időszakra adott értékeit az E-OBS adatbázis alapján meghatározott értékekkel hasonlítottam össze.

Az 1971-2000 referencia időszakra vonatkozó E-OBS adatbázissal történő modell validációhoz első lépésként az E-OBS eredeti,  $0,25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ -os felbontású rácshálózatát átalakítottam a modell eredmények egységesített bemutatásához alkalmazott felbontásra  $(1,25^{\circ} \times 0,9424^{\circ})$  a hosszúsági és a szélességi körök mentén). A Welch-próba alkalmazásával szignifikancia vizsgálatot végeztem annak eldöntésére, hogy a mért múltbeli évi és havi középhőmérséklet értékeket jól közelítik-e a modellszimuláció során múltbéli időszakra adott értékek.

Az évi és havi középhőmérsékletre vonatkozóan egyaránt együttesen ábrázoltam azon modellek rácspontonként vett értékeinek az eltérését az E-OBS adatbázishoz képest, amelyeket ugyanazokra a szcenáriókra vizsgáltam meg. Elsőként kiválasztottam azt a három modellt, melyek mind a négy forgatókönyvre rendelkezésre álltak, majd ezek referencia időszakra kapott eredményeinek az E-OBS adatbázistól való eltérését, minden rácspontban átlagoltam, s az így kapott átlagos hibamezőt ábrázoltam. Ugyanígy jártam el azzal a hét modellel, melyek az RCP2.6, az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyvekre álltak rendelkezésre, majd azzal a 32 modellel, amelyek az RCP4.5 és az RCP8.5 szcenáriókra készítettek éghajlati szimulációkat. A kapott három hibatérkép hasonló szerkezetű, ezért a terjedelmi korlátok miatt csak az 5. ábrán lévő, 32 modell hibái alapján készült térképet mutatom be.



5.ábra: Az 1. táblázatban látható 32 modell évi középhőmérsékletének együttes átlagos eltérése az E-OBS adatbázistól az 1971-2000 referencia időszakban

A térkép alapján egyértelműen kirajzolódik, hogy nagyobb az eltérés az E-OBS adatbázistól a hegyvidéki területeken. Ennek oka, hogy itt vélhetően ritkább a referencia adatbázis értékeit meghatározó mérőhálózat, és a modellek is kevésbé pontos becsléseket adnak a domborzati hatások nem kellően finom felbontású reprezentációja miatt. Ezeken a területeken akár 3 °C is lehet a különbség, vagyis a modellek ennyivel becslik felül az E-OBS adatokat a referencia időszakban. Szintén jól láthatóan sötétkék színnel jelennek meg azok a területek, ahol az E-OBS adatbázisban hiányzó adatok voltak, ez a probléma leginkább a tengeri területeket érintette, mivel az E-OBS csak a szárazföldi térségre tartalmaz értékeket. A legjobb hőmérsékleti becslést, vagyis a legkisebb eltéréseket az északi területeken találjuk, Lengyelország, Ukrajna, Fehéroroszország, Csehország, Szlovákia, illetve Németország egyes területein. Magyarország térségében jellemzően a modellek által a referencia időszakra adott évi középhőmérséklet eredmények kisebbek voltak a ténylegesen bekövetkezettnél.

Az évi átlagos középhőmérsékleti hibához hasonlóan elkészítettem a modellek által a referencia időszakra becsült havi középhőmérsékletek E-OBS adatbázistól való eltéréseinek térképeit is. Mivel ezek ebben az esetben is nagyon hasonlóak voltak, így erre is csak azokat mutatom be a 6. ábrán, ahol a 32 modell együttes eltérése látható. Az évszakokat vizsgálva megállapítható, hogy az egy évszakhoz tartozó hónapok között általában nincs nagy különbség, kivéve az augusztust és a novembert. November esetében az északi és a keleti területeknél nagyobb a modellek felülbecslése, mint az évszak többi hónapjánál, míg augusztusban éppen ezeken a területeken kisebb. Főleg a tavaszi hónapokban – márciusban és áprilisban – az északabbra fekvő területeken az E-OBS adatbázis alapján nagyobb a havi

átlagos középhőmérséklet, mint a modellszimulációkból kapott havi átlagos eredmények, amit a kékebb színezés jelez. Az első két nyári hónapban viszont ezekre a területekre 2-3 °C-kal is nagyobb havi középhőmérséklet jelent meg a modellek esetében az E-OBS adatbázishoz viszonyítva. Az éves átlagos hibamezőhöz hasonlóan az orográfia itt is jól kirajzolódik minden évszakban: a hegyvidéki területeken jellemző a nagyobb, akár 2-3 °C-os felülbecslés. Láthatóan szinte egy olyan hónap sincs, amelyikben a modellszimulációk átlagos hibája a vizsgált terület nagy részén nem haladná meg a 0,5 °C-ot.



6. ábra: Az 1. táblázatban látható 32 modell átlagos havi középhőmérsékletének együttes átlagos eltérése az E-OBS adatbázistól az 1971-2000 referencia időszakban.

Az egyes modellszimulációkból kapott évi hibatérképek helyett – terjedelmi okokból – a rácspontonkénti hibák szignifikancia vizsgálatának eredményét összegezve mutatja be a 7.

ábra. A grafikon alapján a legtöbb modell esetében a célterület rácspontjainak többségében a Welch-féle statisztikai próba alapján jelentős mértékben eltért a becsült éves középhőmérsékleti érték az E-OBS adatbázisból meghatározott átlagértéktől. Összességében a legjobb modellbecsléseket zöld színnel kiemeltem, ezeknél a Welch-próba alapján az évi középhőmérséklet szignifikáns hibája a rácspontok kevesebb, mint 60%-ában jelentkezett.



7.ábra: A teljes területen az E-OBS adatbázishoz viszonyítva az 1971-2000 referencia időszakban szignifikáns eltérést mutató rácscellák aránya az évi középhőmérsékletre, az egyes modellszimulációk esetén. A grafikonon zöld szín jelöli azokat a modelleket, ahol az eltérés nem haladta meg a 60%-ot.

érdekében. Annak hogy a szignifikáns hibájú rácspontok térbeli eloszlását megvizsgálhassam, térképen is ábrázoltam minden egyes modell eredményét. A statisztikailag szignifikáns hibával rendelkező rácspontok földrajzi elhelyezkedésében több hasonlóság is fellépett, így az alábbiakban a 8. ábrán csak néhány kiválasztott modellre mutatom be ezekre vonatkozó eredményeimet. A felső három térképen három olyan klímamodell (MRI-CGCM3, IPSL-CM5A-MR, INMCM4) látható, melyeknél a szignifikáns hibájú rácspontok száma nem haladta meg a 60%-ot. Az alsó három térképen (IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, NCAR-CESM1-BGC) pedig néhány olyan, amelyeknél a hiba elérte a 95%-ot is. A térképeken megjelenő zöld rácspontok jelölik azokat a pontokat, ahol a klímamodell által adott évi középhőmérséklet nem tér el szignifikánsan az E-OBS adatbázisban lévőtől, a piros pedig azokat, ahol igen. A fehér területek azokat a rácspontokat jelzik, ahol nem állt rendelkezésre rácsponti referencia adat. A térképek alapján azt a következtetést lehet levonni, hogy azoknál a modelleknél, melyeknél kevesebb volt a szignifikáns hibát tartalmazó cellák száma, a kisebb hibájú területek - vagyis, ahol jól egyezett a modell által becsült érték az E-OBS adatbázisbelivel – a vizsgált kivágat északi területein találhatóak. Jól látható az is, hogy a délebbi, többnyire hegyvidéki területeken nagy az eltérés mind a hat esetben, s ugyanez elmondható a többi, itt be nem mutatott modell esetében is. Azokra a területekre, ahol nem volt szignifikáns eltérés, vagyis zölddel jelöltek, a rácsponti értékek eltérése a modell múltbeli értéke és az E-OBS között általában 1 °C-nál kisebb, vagy csak nem sokkal haladta azt meg.



8.ábra: Néhány kiválasztott modell és az E-BOS adatbázis évi középhőmérsékleti értékeinek eltérése rácspontonként az 1971-2000 referencia időszakban

Az évi középhőmérséklet mellett hasonló összegzést végeztem a havi adatokra is, melynek eredményét mutatja be a 9. ábra. Ezeken a grafikonokon az oszlopok piros színű része jelöli, hogy adott modellszimulációra, a rácspontok hány százalékában tér el szignifikánsan a referencia időszakra becsült érték az E-OBS adatoktól. A zöld színű oszloprész pedig azt jelöli, hogy mekkora hányadban nincs szignifikáns eltérés a havi középhőmérsékleti értékek között. Láthatóan minden modellre elég magas a szignifikáns hibájú rácspontok aránya a legtöbb hónapban. A téli hónapokat tekintve, a legkevesebb – 60% körüli – szignifikáns hibájú a BCC-CSM1-1, az MRI-CGCM3, a BNU-ESM, az IPSL-CM5A-MR, és a GFDL-ESM2G modell, de ezek is csak az évszak egyes hónapjaiban. A tavaszi hónapokban jellemzően nagyobb arányban becsültek a modellek az E-OBS-tól szignifikánsan eltérő átlagértékeket, csak márciusban és áprilisban voltak olyan modellszimulációk (a BCC-CSM1-1M, a CSIRO-ACCESS1-0, az INMCM4, vagy a CSIRO-ACCESS1-3), amelyeknél csak 60% körül adódott a szignifikáns hibájú rácspontok aránya. A nyári hónapokban egyáltalán nem volt olyan modell, melynél nem 80% feletti lett volna a szignifikáns eltérésű rácspontok

aránya. Ez egyértelműen jelzi, hogy a referencia időszakban nyárra a legpontatlanabb a klímamodellek becslése az E-OBS-hoz képest. Az őszi hónapokra is a többi évszakhoz hasonló eredmények születtek. Az összes hónapra összegezve a legpontosabb hőmérsékleti becsléseket adó klímamodellek: GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, GISS-E2-R, INMCM4, IPSL-CM5A-MR és MRI-CGCM3.



9.abra: A teljes teruleten az E-OBS adatbazisnoz viszonyitva az 1971-2000 referencia idoszakban szignifikáns eltérést mutató rácscellák aránya a havi középhőmérsékletre, az egyes modellszimulációk esetén, melyek neveinek rövidítése a grafikonokon szereplő sorrendben: B1, B2, BN, CA, CM, CN, CS1, CS2, CS3, E, F, GF1, GF2, GI, H1, H2, H3, I, IP1, IP2, IP3, MI1, MI2, MI3, MP1, MP2, MR, N1, N2, N3, NO1, NO2, (melyek kifejtése az 1. táblázatban található).

A fenti grafikonok összesítésére készített Box-Whiskers diagram (10. ábra) szemléletesen mutatja, hogy a nyári hónapokban általában magas a statisztikailag szignifikáns eltérésű rácspontok aránya. Még a legjobb egyezést adó modellek estében is 80% körüli ez az arány. A legkisebb hibaarány a havi középhőmérsékleti értékekben, februárban és novemberben tapasztalható, ugyanis ezekben a hónapokban adja a referencia időszakban a legtöbb modell a

legjobb egyezést az E-OBS adatokkal. A két említett hónapban vannak olyan modellek, amelyek esetében a szignifikáns eltérésű rácspontok száma mindössze 50% körüli.



10.ábra: Az összes modell szignifikáns eltérésű rácspontjainak száma az E-OBS adatbázishoz viszonyítva havi bontásban az 1971-2000 referencia időszakra

Annak érdekében, hogy a lehető legjobban meghatározzam azokat a klímamodelleket, amelyek jövőre adott eredményeinek beválása a legjobb lehet, további validációs vizsgálatokat végeztem. Ennek során kétféle vizsgálati módszert követtem. (1) Kiszámoltam minden egyes modellre a teljes vizsgált mezőre az átlagos évi és havi középhőmérsékleti eltérést az E-OBS adatbázishoz képest, majd az egyes rácspontokra kapott hibaértékeket átlagoltam, s így a vizsgált kivágat átlagos területi hibáját kaptam meg. (2) Mivel az előző mérőszámnál az eltérő előjelű rácsponti hibák kiejtik egymást, ezért meghatároztam az átlagos területi abszolút hibát: előbb az évi és havi középhőmérsékletek hibamezőinek abszolút értékét vettem, és csak ezután végeztem el a rácspontokban lévő értékek területi átlagolását. Az évi középhőmérsékletekre vonatkozó eredményeket a 11. ábra összesíti.



11.ábra: A teljes vizsgált területen az egyes modellszimulációk által adott évi középhőmérséklet átlagos és abszolút eltérése az E-OBS adatbázistól az 1971-2000 referencia időszakban

A vizsgálat alapján azoknak a klímamodelleknek a becslései a legpontosabbak, amelyeknél a kétféle átlagolás eredményei közel esnek egymáshoz és az értékük 0 °C közeli, hiszen ekkor a legkisebb az eltérés az E-OBS adatbázis évi középhőmérsékleti adataitól. Míg az abszolút hiba esetében a legjobb eredmények 1 °C körüli értékűek, addig az átlagos hibánál több 0 °C közeli érték is megjelenik. A két eredmény alapján a legjobb modellek: az MRI-CGCM3, a GFDL-ESM2M, az IPSL-CM5A-MR, a GISS-E2-R, az INMCM4, a CNRM-CM5, a HadGEM2-ES, a HadGEM2-AO és a HadGEM2-CC.

A havi középhőmérsékleti becslések összegző értékelésére Box-Whiskers diagramokat készítettem az átlagos és abszolút hibák bemutatására (12. ábra). Jól látszik mind a két diagramon, hogy a nyári és a téli időszakban volt a legnagyobb az eltérés a modellek között a havi középhőmérsékleti hibákban, a legkisebb különbségek pedig a tavaszi és az őszi hónapokban jelentkeztek. A legjobb egyezést mutató hónap mindkét esetben a szeptember volt, a legrosszabb pedig a június és a július. Az eredményeket klímamodellekre lebontva is megvizsgáltam, de a terjedelmi korlátok miatt itt külön bemutatásra nem kerülnek. A havi középhőmérsékleti becslések területi átlagos és abszolút hibáinak eredményei alapján a legjobb egyezés – azaz 0,5 °C-nál kisebb átlagos hiba és 1,5 °C-nál kisebb abszolút hiba – a következő klímamodellekből származik: GFDL-ESM2G, INMCM4, IPSL-CM5A-MR és MRI-CGCM3.



12.ábra: Az összes modellszimuláció által becsült havi középhőmérsékletek területi abszolút és átlagos hibája az E-OBS adatbázishoz képest az 1971-2000 referencia időszakban.

A fenti vizsgálatokból kitűnik, hogy az évi és a havi becsült középhőmérsékletek alapján azonosítható legpontosabb modellekben ugyan van némi eltérés, de a különböző karakterisztikák felhasználásával nagyjából ugyanazok a modellszimulációk közelítették legjobban az E-OBS adatbázisból kapott értékeket. Az évi középhőmérséklet esetén a legjobb eredményeket a referencia időszakra az MRI-CGCM3, a GFDL-ESM2M, az IPSL-CM5A-MR, az INMCM4, a CNRM-CM5, a HadGEM2-ES, a HadGEM2-AO és a HadGEM2-CC klímamodell adta. A havi középhőmérsékletek esetében pedig az összes évszakra relatíve

kisebb hibájú modellek: a GFDL-ESM2G, az INMCM4, az IPSL-CM5A-MR és az MRI-CGCM3.

### 4.2. A becsült hőmérsékletváltozás elemzése

A múltbeli értékek ellenőrzése után megvizsgáltam azt is, hogy szignifikánsan eltérőnek tekinthetők-e az egyes modellszimullációk jövőre adott becslései és a referencia időszakra kapott értékeik. Az elvégzett statisztikai próba alapján mind a 2021-2050, mind pedig a 2071-2100 időszakra vonatkozóan szinte minden modell esetében a vizsgált kivágat teljes területén szignifikáns változás várható az évi és a havi átlagos középhőmérsékletek alakulásában egyaránt. (Terjedelmi korlátok miatt a dolgozatban csak az évi középhőmérsékletre vonatkozó eredményeket mutatom be részletesen.)

A 2. táblázat összegzi, hogy az egyes modellek esetén a figyelembe vett forgatókönyvekre a vizsgált két időszakban a Welch-próba alapján mekkora volt azonak a rácspontoknak az aránya az összeshez viszonyatva, melyeknél szignifikáns eltérés adódott a múltbeli és a jövőbeli szimulált átlagos évi középhőmérsékletek között. A CMIP5 rendelkezésre álló modellszimulációiból mindössze öt modell esetén fordult elő, hogy nem 100% a szignifikáns hőmérsékleti változást jelző rácspontok aránya. Ez nagyrészt abból adódhat, hogy a modell által az adott szcenárióra becsült évi középhőmérséklet átlagos változása nem túl magas, az évek közötti változékonyságokkal összemérhető. Például a FIO-ESM klímamodell az RCP4.5 szcenáriót tekintve a XXI. század második felére csak legfeljebb 0,5-1 °C közötti évi középhőmérséklet változást prognosztizált, a vizsgált kivágat északi felében pedig kismértékű hőmérséklet csökkenést becsült. Ezek a rácsponti középhőmérsékleti változások a szimulált évi középhőmérsékleti idősorok szórásának nagyságrendjébe esnek a mező nagy részén, ezért a statisztikai próba csak a rácspontok 36%-ában jelez szignifikáns hőmérsékletváltozást. Azonos modell esetén egy-egy szcenáriót tekintve a század második felére már általában nagyobb arányú a szignifikáns hőmérsékletváltozást jelző rácspontok aránya, mivel a sugárzási kényszer is nő a XXI. század során. Ez alól csupán az RCP2.6 szcenárió kivétel, mely esetén két modellnél – GFDL-ESM2G-nél és GISS-E2-R-nél – a 2071-2100 időszakra a rácspontok kisebb hányadában valószínűsíthető szignifikáns változás, mint a 2021-2050 időszakra. Azonos modellel különböző szcenáriókat figyelembe véve ugyancsak igaz, hogy a nagyobb sugárzási kényszer változást feltételező forgatókönyvek esetén a szignifikáns melegedésű rácspontok aránya is nagyobb.

	2021-2050				2071-2100			
Modell	<b>RCP2.6</b>	<b>RCP4.5</b>	<b>RCP6.0</b>	<b>RCP8.5</b>	<b>RCP2.6</b>	<b>RCP4.5</b>	<b>RCP6.0</b>	<b>RCP8.5</b>
<b>B</b> 1	100	100	100	100	100	100	100	100
<b>B2</b>	-	100	-	100	-	100	-	100
BN	-	100	-	100	-	100	-	100
CA	100	100	-	100	100	100	-	100
CM	-	100	-	100	-	100	-	100
CN	100	100	-	100	100	100	-	100
CS1	-	100	-	100	-	100	-	100
CS2	-	100	-	100	-	100	-	100
CS3	-	100	-	100	-	100	-	100
E	-	90	-	92	-	94	-	100
F	-	39	-	96	-	36	-	100
GF1	79	100		100	34	100	-	100
GF2	-	100	-	100	-	100	-	100
GI	100	100	-	100	25	100	-	100
H1	-	100	-	100	-	100	-	100
H2	-	100	-	100	-	100	-	100
H3	100	100	100	100	100	100	100	100
Ι	-	81	-	100	-	100	-	100
IP1	-	100	-	100	-	100	-	100
IP2	-	100	-	100	-	100	-	100
IP3	-	100	-	100	-	100	-	100
MI1	-	100	-	100	-	100	-	100
MI2	-	100	-	100	-	100	-	100
MI3	-	100	-	100	-	100	-	100
MP1	-	100	-	100	-	100	-	100
MP2	-	100	-	100	-	100	-	100
MR	-	100	-	100	-	100	-	100
N1	-	100	-	100	-	100	-	100
N2	-	100	-	100	-	100	-	100
N3	-	100	-	100	-	100	-	100
NO1	100	100	100	100	100	100	100	100
NO2	-	100	-	100	-	100	-	100

2.táblázat: A vizsgált klímamodellek esetén a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra az 1971-2000 referencia időszakhoz képest az évi középhőmérsékletben becsült szignifikáns várható változást jelző rácspontok aránya (%) az összes rácspont számához viszonyítva. A táblázatban szereplő rövidítések jelentése az 1. táblázatban található.

# 4.2.1. Az egyes időszakokra kapott modelleredmények szcenáriónkénti összehasonlítása

Ebben a részfejezetben a klímamodellek által 2021-2050-re és 2071-2100-ra becsült évi és havi hőmérsékletváltozás mértékének elemzése következik, melyhez egységesített hőmérsékleti skálát alkalmazó térképeket készítettem. A kapott eredményeket a modelltípusok és forgatókönyvek szerint rendszereztem. A terjedelemi korlátok miatt, a mintegy ezer kirajzolt térkép közül csak néhány kiválasztott modellre mutatom be az

eredményeket a várható évi változásokra vonatkozó térképeken szemléltetve. A modellek kiválasztásának alapjául szolgáló egyik szempont az AOGCM és a komplex Föld-rendszer modellek elkülönítése és összehasonlítása volt.

Elsőként kiválasztottam egy olyan modellt, melyre mind a négy szcenárióra rendelkezésre álltak a futtatási eredmények (ilyenek csak komplex Föld-rendszer modellek voltak). Figyelembe véve, hogy közelítően mind a három vizsgált klímamodell hasonló mértékű évi középhőmérséklet változásokat prognosztizál, csak a NorESM1-M komplex Föld-rendszer modellre kapott eredményeket mutatom be a 13. ábrán.



13.ábra: Az évi középhőmérséklet átlagos változása a különböző szcenáriók esetén a NorESM1-M klímamodell becslései alapján a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra (referencia időszak: 1971-2000).

A térképek alapján a század első felében kisebb mértékű melegedés várható, (legfeljebb csak 2 °C), míg a második időszakra ez az érték már elérheti akár a 4,5-5 °C-ot is. A szcenáriók közötti különbségek főleg a századvégi időszakban jelennek meg. Így a legoptimistább RCP2.6 forgatókönyv szerint a melegedés legfeljebb 2 °C lehet a XXI. század végére is – hasonlóan a század közepéhez. A többi szcenáriónál viszont a század második felére egyértelműen nagyobb évi középhőmérséklet változás várható. Minél nagyobb a feltételezett változás a sugárzási kényszerben, annál nagyobb mértékű a valószínűsíthető hőmérséklet-emelkedés.

A következő részletesebben bemutatott három modell az RCP2.6, az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyv figyelembe vételével futtatott CNRM-CM5 AOGCM modell, a GFDL-ESM2G komplex Föld-rendszer modell, valamint a GISS-E2-R ugyancsak komplex Föld-rendszer

modell. Ezek szimulációi alapján a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra várható évi középhőmérséklet változásokat megjelenítő térképek rendre a 14. ábrán, a 15. ábrán és a 16. ábrán láthatók.





A CNRM-CM5 modellszimulációinál is érvényes az, hogy az első időszakban nincs nagy különbség a szcenáriók becsült változásai között (14. ábra). Az RCP2.6 forgatókönyv esetén a két vizsgált célidőszak között sem jeletkezik számottevő különbség – a várható melegedés mértéke mintegy 2 °C a vizsgált célterületen. Ebből arra lehet következtetni, hogy a feltételezett sugárzási kényszerbeli csökkenés (azaz az üvegházhatású gázok kibocsátásában tervezett jelentős csökkentés) eredménye képpen kisebb lesz a melegedés az évszázad végére, mint a közepére. A többi szcenárió esetében viszont már egyértelműen megjelenik a nagyobb mértékű évi középhőmérséklet növekedés, így akár 3,5-4,5 °C közötti hőmérséklet változást is prognosztizál a modell. A legnagyobb melegedést ebben az esetben is a legnagyobb feltételezett sugárzási kényszer változás esetére, azaz az RCP8.5 forgatókönyvre becsüli.

A GFDL-ESM2G komplex Föld-rendszer modellszimulációkból kapott eredmények jelentősen eltérnek a fenti két modelltől. A 15. ábra térképeiről jól látható, hogy mind a két időszakra és szinte mind a három vizsgált forgatókönyvre kisebb mértékű hőmérsékletváltozást prognosztizál. A legmagasabb becsült hőmérsékletváltozás értéke

csupán 1,5 °C. Ennél nagyobb (3,5-4 °C) melegedési mérték csak az RCP8.5 szcenárió esetén a század végére valószínűsíthető.



A 16. ábrán bemutatott GISS-E2-R komplex Föld-rendszer modell század első felére adott eredményei – főleg az RCP2.6 és az RCP4.5 esetében – nagy hasonlóságot mutatnak, mind szerkezeti mind a becsült hőmérsékletváltozás értékének szempontjából.



16.ábra: Az évi középhőmérséklet átlagos változása a különböző szcenáriók esetén a GISS-E2-R klímamodell becslései alapján a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra (referencia időszak: 1971-2000).

Az RCP8.5 szcenárió valószínűsíti a század első felére a legmagasabb – 2 °C-os – hőmérsékletemelkedést. A második időszakra vonatkozóan szembetűnő, hogy az RCP2.6 forgatókönyv a feltételezett csökkenő sugárzási kényszerből adódóan hőmérséklet csökkenést prognosztizál a vizsgált terület nagy részén, míg a többi szcenárió növekedést. A legnagyobb értékekre az RCP8.5 forgatókönyv esetében lehet számítani ebben az esetben is, ami a keleti és északi területekre vonatkozóan akár 3,5-4 °C körüli lehet.

A 17. ábra olyan modellek – az INMCM4, az IPSL-CM5A-MR, az MRI-CGCM3 és a HadGEM2-AO – becsléseit hasonlítja össze, melyek csak az RCP4.5 és az RCP8.5 szcenáriókra állnak rendelkezére a CMIP5 adatbzázison belül.



17.ábra: Az évi középhőmérséklet átlagos változása az RCP4.5 és az RCP8.5 szcenárió esetén az INMCM4, az IPSL-CM5A-MR, az MRI-CGCM3 és a HadGEM2-AO modellek becslései alapján a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra (referencia időszak: 1971-2000).

A század első felére feltűnőek az INMCM4 és az MRI-CGCM3 modellek által becsült alacsonyabb hőmérsékletváltozási értékek, melyek 0,5-1 °C-os hőmérsékletnövekedést jeleznek, hasonló térbeli szerkezettel. Ugyanakkor az IPSL-CM5-MR és még inkább a HadGEM2-AO modell, magasabb, akár 2-3 °C-os hőmérsékletemelkedést is prognosztizált a közép-európai területekre. A század második felére az INMCM4 és az MRI-CGCM3 az RCP4.5 forgatókönyvre becsült várható évi középhőmérséklet változásai alacsonyabbak, mint a többi modell esetében. Míg az előbbi két modell csak 1,5-2 °C-os hőmérsékletváltozást jelez, addig az IPSL-CM5A-MR és a HadGEM2-AO akár 4,5 °C-os növekedést is. Az RCP8.5 szcenárió esetében is ennek a két modellnek az eredményei becslik a nagyobb évi középhőmérséklet változást, ami a középső területeken akár a 7 °C-ot is elérheti.

A bemutatott modelleredmények alapján láthatóan nem lehet egyértelmű különbséget tenni az AOGCM és ESM modellek eredményei között. Általánosságban véve a század első felére kisebb mértékű az évi középhőmérsékletben várható változás, és a szcenáriók között is jóval kisebb a különbség, mint a század második felében. Fontos megemlíteni, hogy a legtöbb modellszimulációban az RCP2.6 forgatókönyvre feltételezett századvégi csökkenő sugárzási kényszer miatt a 2071-2100 időszakra becsült évi középhőmérséklet változásnak csökkenése valószínűsíthető a század közepéhez képest.

Az évi átlagokhoz hasonlóan a havi középhőmérsékletre is elkészítettem minden vizsgált klímamodellre a várható változásokat bemutató térképeket, melyeken a fentiekhez hasonló tendenciák rajzolódtak ki.

#### 4.2.2. Az egyes időszakokra kapott modelleredmények együttes összehasonlítása

Ebben az alfejezetben a két célidőszakra várható évi és havi középhőmérséklet változásának eredményeit úgy mutatom be, hogy az egyes szcenáriókra vonatkozó klímamodell szimulációkat egyszerre vettem figyelembe. Vizsgálataim során meghatároztam a modellenként kapott hőmérsékletváltozási becslések átlagát és szórását. Az előbbi azt jelzi, hogy a különböző szcenáriók esetén milyen mértékű átlagos hőmérsékleti módosulásra számíthatunk Közép-Európában, az utóbbi pedig a különböző modellek felhasználásából adódó becslési bizonytalanságot reprezentálja.

Az évi és havi középhőmérséklet változásokat a 18. ábra összegzi. A térképek alapján az évszázad közepére közel azonos eredményeket kaptam, függetlenül attól, hogy melyik szcenáriót tekintjük, s ezekhez hány modellt vettem figyelembe. A legmagasabb évi középhőmérséklet növekedés erre az időszakra várhatóan nem haladja meg a 1,5 °C-ot. Egyedül az RCP8.5 szcenárió esetében, és főleg a vizsgált terület középső és északkeleti

részein számíthatunk nagyobb mértékű – akár a 2 °C-ot is elérő – melegedésre. A század végére már jobban megjelennek a szcenáriók közötti különbségek. Általában nagyobb évi középhőmérséklet növekedés figyelhető meg a század első feléhez képest, kivéve az RCP2.6 forgatókönyv esetén. A sugárzási kényszerben feltételezett nagyobb változás egyértelműen nagyobb mértékű melegedést eredményez a vizsgált régióban. A legpesszimistább RCP8.5 forgatókönyv szerint akár 5 °C-os növekedés is lehetséges a vizsgált terület keleti felén.



18.ábra: Több modell együttes eredményei alapján becsült átlagos évi középhőmérséklet-változás a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakokban (referencia időszak: 1971-2000). A zárójelben a térképekhez felhasznált modellszimulációk száma látható, melyek részletesen az 1. táblázatban szerepelnek.

Annak érdekében, hogy az egyes modellszimulációk közötti eltéréseket illusztráljam, elkészítettem a szcenáriónkénti becsült évi átlagos hőmérsékletváltozások szórási térképeit is, (19. ábra). A magasabb – 1,5 °C körüli – szórás értékek, azaz a modellszimulációk közötti nagyobb különbségek a várakozásainknak megfelelően a század második felében jelentek meg leginkább. A legmagasabb értékű szórás az RCP6.0 szcenáriónál, a 2071-2100 időszak esetében fordult elő Magyarország északkeleti részein.



19.ábra: Több modell együttes eredményei alapján becsült évi középhőmérséklet-változás szórása a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakban (referencia időszak: 1971-2000). A zárójelben a térképekhez felhasznált modellszimulációk száma látható, melyek részletesen az 1. táblázatban szerepelnek.

Az évi középhőmérsékletben várható változások elemzéséhez hasonlóan a havi középhőmérsékletek várható változásaira is elkészítettem az együttes becslés átlagos mezőit és a szórási térképeket. A kapott eredményeket az alábbiakban mindkét időszakra ismertetem évszakonként csoportosítva. A terjedelmi korlátok miatt a szórástérképeket nem mutatom be, csak röviden összefoglalom az erre vonatkozó legfontosabb megállapításokat.

A 20. és a 21. ábra a 2021-2050, illetve a 2075-2100 időszakra vonatkozóan a téli hónapok középhőmérsékletének átlagos változásait összegzi. A térképeken jól látható ebben az esetben is, hogy a század második felére várható a jelentősebb melegedő tendencia mind a három hónap esetében. A legnagyobb melegedés januárban várható, a terület északkeleti felében. A forgatókönyvek közül az RCP4.5 és az RCP6.0 esetén csak kis különbségek jelennek meg a becsült eredményekben. Az RCP2.6 szcenáriónál pedig a sugárzási kényszer feltételezett menete miatt csak kismértékű változások várhatóak a vizsgált két időszak között.

A 22. ábra és a 23. ábra rendre a század első és második felében várható tavaszi havi középhőmérséklet-változásokra vonatkozó becsléseket mutatja be. A 2021-2050 időszakra nem látható nagyobb eltérés az egyes hónapok és szcenáriók között, mindegyik 1,5 °C és legfeljebb 2 °C-os havi középhőmérséklet emelkedést becsül. A 2071-2100 időszakra pedig kisebb mértékű melegedés várható, mint a téli hónapok esetében ugyanerre az időszakra. Továbbá megfigyelhető az is, hogy mind a három tavaszi hónapra körülbelül azonos mértékű hőmérsékletváltozások várhatóak.

A 24. ábra a 2021-2050 időszakra, a 25. ábra pedig a 2071-2100 időszakra a nyáron várható havi átlagos középhőmérséklet-változásokat összegzi. A térképek alapján egyértelműen kitűnik, hogy minden szcenáriónál már a század első felében nagyobb a várható havi középhőmérséklet-változás az évszak minden hónapjában a téli és a tavaszi hónapokhoz képest. Ez a prognosztizált melegedés a század második felére várhatóan még nagyobb mértékűvé válik. A várakozásoknak megfelelően a legnagyobb változásokat az RCP8.5 szcenárióra kapott eredmények becsülték a század második felére, júliusra és augusztusra, ami a vizsgált terület középső és déli részein akár a 7,5 °C-ot is elérheti majd.

Végül a 26. ábra és a 27. ábra a XXI. század közepére, illetve végére várható őszi hónapokra becsült átlagos középhőmérséklet-változásokat foglalja össze. Ezek alapján látható, hogy a télhez és a tavaszhoz hasonlóan a 2021-2050 időszakban nem várhatóak nagyobb különbségek az egyes hónapok és szcenáriók között. A legnagyobb mértékű melegedésre szeptemberben lehet számítani az eredmények alapján a század második felében, mely főleg a vizsgált terület délkeleti részeit érintheti, ahol a havi középhőmérséklet változás akár a 6 °C-os növekedést is elérheti.





21. ábra: Több modell együttes eredményei alapján becsült átlagos havi középhőmérséklet-változás télen a 2071-2100 időszakban (referencia időszak: 1971-2000). A zárójelben a térképekhez felhasznált modellszimulációk száma látható, melyek részletesen az 1. táblázatban szerepelnek.



22.ábra: Több modell együttes eredményei alapján becsült átlagos havi középhőmérséklet-változás tavasszal a 2021-2050 időszakban (referencia időszak: 1971-2000). A zárójelben a térképekhez felhasznált modellszimulációk száma látható, melyek részletesen az 1. táblázatban szerepelnek.



23.ábra: Több modell együttes eredményei alapján becsült átlagos havi középhőmérséklet-változás tavasszal a 2071-2100 időszakban (referencia időszak: 1971-2000). A zárójelben a térképekhez felhasznált modellszimulációk száma látható, melyek részletesen az 1. táblázatban szerepelnek.





2071-2100



25. ábra: Több modell együttes eredményei alapján becsült átlagos havi középhőmérséklet-változás nyáron a 2071-2100 időszakban (referencia időszak: 1971-2000). A zárójelben a térképekhez felhasznált modellszimulációk száma látható, melyek részletesen az 1. táblázatban szerepelnek.







27.ábra: Több modell együttes eredményei alapján becsült átlagos havi középhőmérséklet-változás ősszel a 2071-2100 időszakban (referencia időszak: 1971-2000). A zárójelben a térképekhez felhasznált modellszimulációk száma látható, melyek részletesen az 1. táblázatban szerepelnek.

A havi középhőmérsékletek jövőbeli változásait illetően összességében elmondható, hogy legnagyobb mértékben a nyarak fognak melegedni, leginkább a július és az augusztus. A század első felében kisebb mértékű, átlagosan 1,5-2 °C-os havi középhőmérséklet változásokra lehet számítani szinte az összes szcenárió esetén, míg a 2071-2100 időszakban a melegedés egyes területeken elérheti akár a 6-7 °C-ot is.

A várható havi középhőmérséklet-változások szórásmezői alapján levonható következtetések az alábbiakban foglalhatók össze: (i) Az RCP2.6 szcenárió esetén általában kis szórás értékek voltak jellemzőek mindkét időszakban, s csak a nyári hónapokban jelent meg 2,5 °C mértékű szórás a hőmérsékletváltozás modell-együttessel történő becslésében. (ii) A nyári hónapokra kapott becslések a többi szcenárió esetében is nagyobb szórást eredményeztek, mint akármelyik másik évszak hónapjaira kapott modellbecslések. (iii) A legmagasabb – 4,5 °C mértékű – szórást az RCP8.5 forgatókönyvre kaptam a vizsgált terület középső részein. (iv) A többi szcenárió és évszak esetében általánosságban 1,5-2 °C volt a szórás értéke a kivágat nagy részén.

### 4.2.3. Az egyes időszakokra országonként várható hőmérsékletváltozások

Ebben az alfejezetben azt mutatom be, hogy a vizsgált térségben található országokat reprezentáló rácspontokban milyen mértékű évi és havi középhőmérséklet-változások várhatók a négy szcenárió esetén, a felhasznált globális klímamodellek eredményei alapján. Ennek vizsgálatához a kiválasztott terület minden országára rácsponti maszkokat készítettem, és az ezek által megjelölt rácspontok átlagos várható változási értékeit átlagoltam, majd az egyes szcenáriók szerint grafikonon ábrázoltam az így kapott eredményeket minden országra. A terjedelmi korlátok miatt a várható évi középhőmérséklet változások esetén a 21 ország közül csak az Olaszországra, Magyarországra és Lengyelországra kapott eredményeket mutatom be a dolgozatban. A választás Magyarországon kívül azért erre a két országra esett, mert így a vizsgált kivágaton belül az észak-déli tengely mentén várható változásokat egyértelműen szemléltetik a grafikonok. Ezt követően a várható havi középhőmérséklet-változások esetén a magyarországi rácspontokra kirajzolt grafikonokat ismertetem forgatókönyvenként haladva.

A 28. ábra összegzi a legdélebbi országban, Olaszországban várható évi középhőmérséklet-változásra kapott eredményeket. A diagram alapján az átlagos hőmérsékletváltozás értéke az RCP2.6 szcenárió alapján 0,5-3,5 °C között várható a XXI.század közepére, majd a század második felében a legtöbb modell alapján többnyire csökkenő évi középhőmérsékletek várhatók a század első feléhez képest. Az RCP4.5 és az
RCP6.0 szcenárió esetében már magasabb értékekre lehet számítani, így a század végére akár a 4,5 °C-ot is elérheti az évi középhőmérséklet-változás. A legnagyobb sugárzási kényszer változást feltételező RCP8.5 szcenárió még nagyobb, 2,8-7 °C-os mértékű hőmérsékletemelkedést prognosztizál a század végére.



28. ábra: Olaszországban várható évi középhőmérséklet-változás a 2021-2050 (a-val jelölve) és a 2071-2100 (b-vel jelölve) időszakra az 1971-2000 referencia időszakhoz képest. A háromszögek, illetve a keresztek jelölik rendre a komplex Föld-rendszer modelleket, illetve az AOGCM modelleket.

A 29. ábrán a Magyarországon várható évi középhőmérséklet-változás tendenciái láthatók. Az RCP2.6 forgatókönyv esetében az Olaszországra kapott eredményekhez hasonló a hazai rácspontokra várható változás, az RCP4.5 szcenáriónál viszont már szélesebb az évi középhőmérséklet-változás intervalluma, hiszen a század második felére, akár 5,5 °C-os növekedés is bekövetkezhet. Hasonló különbség jelentkezik Olaszország és Magyarország között a másik két forgatókönyv esetében is. Az RCP8.5 szcenárióra egyes modellek szerint hazánkban akár a 7-8 °C-ot is elérheti az évi középhőmérséklet emelkedés mértéke.



29. ábra: Magyarországon várható évi középhőmérséklet-változás a 2021-2050 (a-val jelölve) és a 2071-2100 (b-vel jelölve) időszakra az 1971-2000 referencia időszakhoz képest. A háromszögek, illetve a keresztek jelölik rendre a komplex Föld-rendszer modelleket, illetve az AOGCM modelleket.

A 30. ábra összegzi a Lengyelországban várható évi középhőmérséklet változás mértékét. Az RCP2.6 forgatókönyvre, az előző két országra vonatkozó tendenciákhoz hasonlóan a 2071-2100 időszakra mérséklődő évi középhőmérséklet növekedés várható, melynek maximális értéke a magyarországihoz hasonló eredményeket mutat. A többi szcenárió esetén a század során egyértelműen erősödő melegedési tendencia valószínűsíthető. A 2071-2100 időszakra a legpesszimistább becslést adó RCP8.5 forgatókönyv szerint akár a 7,5 °C-ot is elérheti a becsült hőmérséklet emelkedés.



30.ábra: Lengyelországban várható évi középhőmérséklet-változás a 2021-2050 (a-val jelölve) és a 2071-2100 (b-vel jelölve) időszakra az 1971-2000 referencia időszakhoz képest. A háromszögek, illetve a keresztek jelölik rendre a komplex Föld-rendszer modelleket, illetve az AOGCM modelleket.

Összefoglalóan elmondható, hogy a sugárzási kényszer nagyobb feltételezett változása egyértelműen nagyobb hőmérséklet emelkedést valószínűsít a vizsgált régió országaiban, így a legmagasabb becsült változások az RCP8.5 szcenárió esetén várhatók. Az egyes szcenáriók esetén várható regionális hőmérsékletváltozások között minimális a különbség az évszázad közepén, viszont a század végén már egyértelmű eltérés jelentkezik. A vizsgált kivágaton belül északabbra haladva nagyobb évi középhőmérséklet növekedésre lehet számítani.

A továbbiakban a magyarországi havi középhőmérséklet változásra kapott eredményeket ismertetem szcenáriónkénti bontásban. Mivel az átlagos évi várható változásokhoz hasonlóan az egyes szcenáriók esetén a 2021-2050 időszakra kapott eredmények között nem volt jelentősebb különbség, így csak a 2071-2100 időszak eredményeit ismertetem részletesebben.

A 31. ábra összegzi az RCP2.6 forgatókönyvre kapott modellbecsléseket. A grafikon alapján látható, hogy az egyes modellek becslései között viszonylag nagy különbségek vannak. Habár a modellek többsége minden hónapra melegedést prognosztizál hazánk térségére, egyes modellszimulációk (GISS-E2-R és GFDL-ESM2G) kismértékű hőmérsékletcsökkenést jeleznek a téli félév néhány hónapjára. A modellek együttes becslése alapján megállapítható, hogy a téli és a nyári hónapokban várható a legnagyobb mértékű havi középhőmérséklet-változás, ami a legpesszimistább modell alapján (HadGEM2-ES) akár 5 °C is lehet. A legkisebb hőmérséklet emelkedés novemberben várható, melynek mértéke legfeljebb 2 °C körüli.



31.ábra: Magyarországon az 1971-2000 referencia időszakhoz képest a 2071-2100 időszakra várható havi középhőmérséklet-változás az RCP2.6 szcenárió esetén. A háromszögek, illetve a keresztek jelölik rendre a komplex Föld-rendszer modelleket, illetve az AOGCM modelleket.

A 32. ábrán az RCP2.6 szcenáriónál pesszimistább RCP4.5 szcenárió esetén kapott eredmények láthatóak. Itt már összességében jóval nagyobb havi középhőmérséklet-

változásra lehet számítani minden hónapban. A legnagyobb növekedések nyáron várhatók, akár 7 °C növekedéssel. Kismértékű hűlést csak egyetlen modell (FIO-ESM) jelez. Megfigyelhető a grafikonon, hogy az RCP2.6 szcenárióhoz hasonlóan itt is tavasszal és ősszel kisebb mértékű melegedést prognosztizálnak a klímamodellek, mint a másik két évszak esetében.



32.ábra: Magyarországon az 1971-2000 referencia időszakhoz képest a 2071-2100 időszakra várható havi középhőmérséklet-változás az RCP4.5 szcenárió esetén. A háromszögek, illetve a keresztek jelölik rendre a komplex Föld-rendszer modelleket, illetve az AOGCM modelleket.

A 33. ábra összegzi az RCP6.0 forgatókönyvre kapott eredményeket, mely csak három klímamodellből áll rendelkezésre. Ezek megközelítően hasonló becsléseket adnak, mint amit az RCP4.5 szcenárió. Mindhárom modellszimuláció egyértelműen melegedést jelez a század végére, a legnagyobb mértékűt augusztusra. Az RCP2.6 és az RCP4.5 szcenárió esetén kapott eredményekhez hasonlóan a tavaszi és őszi hónapok várható melegedése a legkisebb az év során.



33.ábra: Magyarországon az 1971-2000 referencia időszakhoz képest a 2071-2100 időszakra várható havi középhőmérséklet-változás az RCP6.0 szcenárió esetén. A háromszögek, illetve a keresztek jelölik rendre a komplex Föld-rendszer modelleket, illetve az AOGCM modelleket.

Végül a 34. ábrán az RCP8.5 forgatókönyvre kapott modelleredmények szerepelnek, melynél az előzőekhez képest még nagyobb havi középhőmérséklet-változás értékek valószínűsíthetők hazánk területén. A nyári hónapokban várható ebben az esetben is a legnagyobb mértékű melegedés, mely egyes modellszimulációk alapján (HadGEM2-CC és HadGEM2-AO) a legszélsőségesebb esetben akár a 10 °C-ot is meghaladhatja. A többi szcenárióhoz hasonlóan itt is kisebb mértékű hőmérséklet növekedés prognosztizálható a tavaszi és őszi hónapokban.



34.ábra: Magyarországon az 1971-2000 referencia időszakhoz képest a 2071-2100 időszakra várható havi középhőmérséklet-változás az RCP8.5 szcenárió esetén. A háromszögek, illetve a keresztek jelölik rendre a komplex Föld-rendszer modelleket, illetve az AOGCM modelleket.

Összességében tehát a nagyobb feltételezett sugárzási kényszerbeli változás várhatóan nagyobb mértékű havi átlagos melegedéseket eredményez hazánk térségében. Mind a négy forgatókönyv esetén a nyári és téli hónapokban átlagosan nagyobb hőmérséklet növekedésre lehet számítani, mint a tavaszi és őszi hónapokban.

## 5. Összefoglalás

Diplomamunkámban az új, sugárzási kényszer változásán alapuló forgatókönyvekkel, a CMIP5 keretében is vizsgált globális klímamodellek hőmérsékleti eredményeit dolgoztam fel. Vizsgálataim során egy egységes, 1,25°-os rácshálózatra interpoláltam a modelleredményeket a Közép-Európát lefedő kivágatra, azaz az 5°-30° keleti hosszúsági körök és az 54,18°-40,05° északi szélességi körök közötti területre. Az elemzés fő célja a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra várható átlagos évi és havi középhőmérséklet változás becslése volt.

Annak érdekében, hogy a modellek jövőbeli időszakokra becsült eredményeinek realitását értékelni lehessen, legelőször validációs vizsgálatot végeztem, mely során a modellek 1971-2000 referencia időszakra becsült értékeit hasonlítottam össze az E-OBS referencia adatbázissal. A statisztikai elemzéshez Welch-próbát alkalmaztam. A kapott eredmények alapján a rácspontok legalább 60%-ában jó egyezést mutató klímamodellek az évi középhőmérséklet esetében az MRI-CGCM3, az INMCM4, az IPSL-CM5A-MR, a CNRM-CM5, és a GFDL-ESM2M voltak. A havi középhőmérsékletnél a nyári hónapokban szinte az összes vizsgált modellnél a rácspontok 80-90%-ában szignifikáns eltérés jelentkezett az E-OBS adatbázishoz képest. A többi évszaknál előfordultak olyan klímamodellek is, melyeknél a rácspontoknak csak 60-70%-ában lépett fel szignifikáns eltérés a becsült érték és a mérés között. Ilyenek voltak a GFDL-ESM2M, a GISS-E2-R, az INMCM4, az IPSL-CM5A-MR és az MRI-CGCM3 modellek. Ezek alapján tehát néhány klímamodell (MRI-CGCM3, INMCM4, IPSL-CM5A-MR, GFDL-ESM2M) a referencia időszakra vonatkozóan az évi és a havi középhőmérsékletet egyaránt jól közelítette.

A validációs vizsgálat után a jövőre vonatkozó becsléseket elemeztem. Az eredmények egyértelműen azt jelzik, hogy néhány kivételtől eltekintve a vizsgált térség teljes területén szignifikáns melegedés várható mind a 2021-2050, mind a 2071-2100 időszakra a XX. század végi referencia időszakhoz képest.

A jövőben várható átlagos évi és havi középhőmérséklet-változás vizsgálatánál különkülön klímamodellekre bontva és több modell eredményeit együttesen figyelembe véve elemeztem a változásokat. A kapott eredmények alapján összességében elmondható, hogy a század közepén még nincs jelentősebb különbség az egyes szcenáriók becslései között. A század végére viszont a becsült hőmérsékletváltozásokban nagyobb különbségek jelentkeznek. A sugárzási kényszerben feltételezett nagyobb változás egyértelműen nagyobb mértékű melegedést eredményez a vizsgált régióban – csakúgy, mint globálisan (IPCC, 2013). Az RCP2.6 forgatókönyv esetén a 2021-2050 és a 2071-2100 időszak között a közép-európai kivágatra hőmérsékletcsökkenés valószínűsíthető a klímamodellek döntő többsége alapján, ami összességében az 1971-2000 referencia időszakhoz képest hozzávetőlegesen 1,5-2 °C-os évi középhőmérséklet-változást jelent az évszázad végére. Az RCP4.5 és az RCP6.0 forgatókönyvek esetén a század végére, 3,5-4 °C az évi középhőmérséklet növekedés, míg a legpesszimistább RCP8.5 szcenárió esetén akár 5-6 °C-os évi középhőmérséklet emelkedés is prognosztizálható. A területi eloszlás tekintetében a nagyobb változások a vizsgált kivágat középső területein valószínűsíthetők.

A havi középhőmérséklet-változásban egyértelműen melegedő tendenciát jeleznek a klímamodellek minden évszakban. A kapott eredmények alapján a legnagyobb mértékben a nyarak fognak melegedni, leginkább a július és az augusztus. A legkisebb mértékű melegedésre pedig a tavaszi és őszi hónapokban számíthatunk. A század végére a nyári legnagyobb várható melegedés, az RCP8.5 szcenárió esetén akár a 7,5 °C-ot is elérheti a középső területeken. A nyár mellett a téli hónapokban is nagyobb mértékű melegedés várható a század végére. Az RCP4.5 és az RCP6.0 forgatókönyvekre vonatkozó modellszimulációk alapján valamennyi évszakban a század végére 3-4,5 °C közötti havi középhőmérséklet-változásra lehet számítani. A Magyarországra várható évi és havi középhőmérséklet változások a fentiekben összegzett tendenciákat követik.

Végezetül meg kell jegyezni, hogy a vizsgálatok eredményét lényegesen befolyásolta, hogy globális klímamodellek outputjait dolgoztam fel, melyek relatíve durva felbontásúak, így ezektől jobb és pontosabb eredmények érhetők el a finomabb felbontású regionális klímamodellek alkalmazásával. Az elemzésbe bevont klímamodellek nagy számából és a terjedelmi korlátokból adódóan sok eredmény – főleg a havi átlagos középhőmérséklet változások – országonkénti részletes bemutatására itt nem kerülhetett sor, de az általános tendenciákról így is képet alkothatunk.

## Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék témavezetőmnek, *Dr. Pongrácz Rita* adjunktusnak köszönetet mondani, aki hasznos tanácsaival és útmutatásával segítette munkámat, hogy diplomamunkám elkészülhessen.

A dolgozat keretében végzett vizsgálatokat az alábbi pályázatok támogatták: az AGRÁRKLÍMA2 projekt (VKSZ\_12-1-2013-0001), valamint az Európai Gazdasági Térség Finanszírozási Mechanizmus 2009-2014 program végrehajtása céljából indított *Alkalmazkodás az éghajlatváltozáshoz Magyarországon* program (EEA-C13-10) keretén belül *A sugárzási kényszer változásán alapuló új éghajlati szcenáriók a Kárpát-medence térségére* című RCMTéR projekt (ELN-234-1/2015).

## Felhasznált irodalom

- Abdella, K., McFarlane, N. (1996): Parameterization of the Surface-Layer Exchange Coefficients for Atmospheric Models. *Boundary Layer Meteorology*, 80. 223-248.
- Abdul-Razzak, H., Ghan, S. J. (2000): A parameterization of aerosol activation 2. Multiple aerosol types. *Journal of Geophysical Research*, 105. 6837-6844. doi:10.1029/1999JD901161.
- Adcroft, A. and Campin, J.-M. (2004): Rescaled height coordinates for accurate representation of free-surface flows in ocean circulation models. *Ocean Modelling*, 7. 269-284.
- Alessandri, A. (2006): Effects of Land Surface and Vegetation Processes on the Climate Simulated by an Atmospheric General Circulation Model. PhD Thesis in Geophysics, Bologna University Alma Mater Studiorum, 114 p.
- Aumont, O., Bopp, L. (2006): Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Global Biogeochem Cycles*, 20(2). GB2017. doi:10.1029/2005GB002591
- Balsamo, G., Pappenberger, F., Dutra, E., Viterbo, P., van den Hurk, B. (2010): A revised land hydrology in the ECMWF model: A step towards daily water flux prediction in a fully-closed water cycle. *Special issue on large scale hydrology of Hydrological Processes*, 25 (7). 1046-1054. doi:10.1002/hyp.7808.
- Barnier, B., Madec, G., Penduff, T., Molines, JM., Treguier, AM., Le Sommer, J., Beckmann, A., Biastoch, A., Böning, C., Dengg, J., Derval, C., Durand, E., Gulev, S., Remy, E., Talandier, C., Theetten, S., Maltrud, M., McClean, J., De Cuevas, B., (2006): Impact of partial steps and momentum advection schemes in a global ocean circulation model at eddy-permitting resolution. *Ocean Dynamics*, 56. 543-567.
- Bellouin, N., Rae, J., Jones, A., Johnson, C., Haywood, J., Boucher, O. (2011): Aerosol forcing in the Climate Model Intercomparison Project (CMIP5) simulations by HadGEM2-ES and the role of ammonium nitrate. *Journal of Geophysical Research*, 116. Issue D20. doi: 10.1029/2011JD016074
- Bentsen, M., Evensen, G., Drange, H., Jenkins, D. (1999): Coordinate transformation on a sphere using conformal mapping. *Monthly Weather Review*, 127. 2733-2740.
- Bentsen, M., Bethke, I., Debernard, J.B., Iversen, T., Kirkevåg, A., Seland, O., Drange, H, Roelandt, C., Seierstad, I.A., Hoose, C., Kristjánsson, J.E. (2013): The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. *Geoscientific Model Development*, 6. 687-720.
- Bao, Y., Qiao, F., Song, Z. (2012): Historical simulation and twenty-first century prediction of oceanic CO2 sink and pH change. Acta Oceanologica Sinica, 31 (5). 87-97.
- Bonan, G., Drewniak, B., Huang, M., Koven, C.D., Levis, S., Li, F., Riley, W.J., Subin, Z.M., Swenson, S.C., Thornton, E. (2013): *Technical Description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM)*. NCAR Technical Note. 434 p.
- Bretherton, C. S., és Park, S. (2009): A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere model, *Journal of Climate*, 22. 3422-3448.
- Briegleb, B. P., Light, B. (2007): A Delta-Eddington Mutiple Scattering Parameterization for Solar Radiation in the Sea Ice Component of the Community Climate System Model, Technical Report NCAR/TN-472+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- Bryan, K. (1969): Climate and the ocean circulation. III: The ocean model. *Monthly Weather Review*, 97. 806-827.
- Collins, W.D., Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M.D., Sun, Y., Portmann, R.W., Fu, Q., Casanova, S.E.B., Dufresne, J.L., Fillmore, D.W., Forster, P.M.D., Galin, W.Y., Gohar, L.K., Ingram, W.J., Kratz, D.P., Lefebvre, M.P., Li, J., Marquet, P., Oinas, V., Tsushima, Y., Uchiyama, T., Zhong, W.Y. (2006a): Radiative forcing by well-mixed greenhouse gases: Estimates from climate models in the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report (AR4). *Journal of Geophyical. Research*, 111. D14317, doi:10.1029/2005JD006713.
- Collins, W. D., Rasch, P. J., Boville, B. A., Hack, J. J., McCaa, J. R., Williamson, D. L., Briegleb, B. P., Bitz, C. M., Lin, S. J., Zhang, M. (2006b): The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model version 3 (CAM3). *Journal of Climate*, 19 (11). 2144-2161.
- Collins, W.J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Hinton, T., Jones, C. D, Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Totterdell, I., Woodward, S., Reichler, T., Kim, J. (2008): *Evaluation of the HadGEM2 model*. Met Office Hadley Centre Technical Note, 74. 47 p.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C.

D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., Woodward, S. (2011): Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4. 997-1062.

- Craig, P.D., Banner, M.L. (1994): Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer. *Journal of Physical Oceanography*, 24. 2513-2529.
- Dai, Y., Zeng, Q. (1997): A land surface model (IAP94) for climate studies. Part I: formulation and validation in off-line experiments. *Advances in Atmospheric Sciences*, 14. 433-460.
- Deardorff, J. W. (1978): Ecient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83C. 1889-1903.
- Del Genio, A. D., Yao M.S., (1993): Efficient cumulus parameterization for long-term climate studies: The GISS scheme, in The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models. *American Meteorological Society Meteorological Monographs*, 46.181-184.
- Del Grosso, S. J., Parton, W.J., Mosier, A.R., Holland, E.A., Pendall, E., Schimel, D.S., Ojima, D.S. (2005): Modeling soil CO<sub>2</sub> emissions from ecosystems. *Biogeochemistry*, 73. 71-91.
- Delworth, T.L., Broccoli, A.J., Rosati, A., Stouffer, R.J., Balaji, V., Beesley, J.A., Cooke, W.F., Dixon, K.W., Dunne, J., Dunne, K.A., Durachta, J.W., Findell, K.L., Ginoux, P., Gnanadesikan, A., Gordon, C.T., Griffies, S.M., Gudgel, R., Harrison, M.J., Held, I.M., Hemler, R.S., Horowitz, L.W., Klein, S.A., Knutson, T.R., Kushner, P.J., Langenhorst, A.R., Lee, H.C., Lin, S-J., Lu, J., Malyshev, S.L., Ramaswamy, M., Russell, J., Schwarzkopf, M.D., Shevliakova, E., Sirutis, J.J., Spelman, M.J., Stern, W.F., Winton, M., Wittenberg, A.T., Wyman, B., Zeng, F., Zhang, R. (2006): GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part I: Formulation and Simulation Characteristics. *Journal of Climate*, 19. 643-674.
- Dewar, W., Hsueh, Y., McDougall, T.Y., Yuan, D. (1998): Calculation of pressure in ocean simulations. *Journal* of Physical Oceanography, 28. 577-588.
- Dévényi, D., Gulyás, O. (1988): Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. Tankönyvkiadó, Budapest. 443 p.
- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., and Kennedy, P. J. (1993): *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (*BATS*) version le as coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Technical Note NCAR/TN-387+STR. 80 p. doi: 10.5065/D67W6959.
- Donner, L.J., Basu, C., McKinstry, A., Asif, M., Porter, A., Maisonnave, E., Valcke, S., Fladrich, U., (2012): Performance Analysis of EC-EARTH 3.1. *PRACE Whitepaper* (http://www.praceri.eu/IMG/pdf/Performance\_Analysis\_of\_EC-EARTH\_3-1-2.pdf)
- Donner, L.J., Wyman, B.L., Hemler, R.S., Horowitz, L.W., Ming, Y., Zhao, M., Golaz, J.C., Ginoux, P., Lin, S.J., Schwarzkopf, M.D., Austin, J., Alaka, G., Cooke, W.F., Delworth, T.L., Freidenreich, S.M., Gordon, C.T., Griffies, S.M., Held, I.M., Hurlin, W.J., Klein, S.A., Knutson, T.R., Langenhorst, A.R., Lee, H.C., Lin, Y., Magi, B.I., Malyshev, S.L., Milly, P.C., Naik, V., Nath, M.J., Pincus, R., Ploshay, J., Ramaswamy, V., Seman, C.J., Shevliakova, E., Sirutis, J.J., Stern, W.F., Stouffer, R.J., Wilson, R.J., Winton, M., Wittenberg, A.T., Zeng, F. (2011): The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL global coupled model CM3. *Journal of Climate*, 24. 3484-3519. doi: 10.1175/2011JCLI3955.1.
- Dufresne, J. L., Foujols M. A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont,O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., De Noblet, N., Duvel, J. P., Ethe, Fairhead, L., Fichefet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J. Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M., Lefevre, F., Levy, C., Li Zhanbin, Lloyd ,J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, Claude., Terray, P., Viovy, N., Vuichard, N. (2013): Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 40. 2123-2165.
- Dunne, J.P., John, J.G., Adcroft, A.J., Griffies, S.M., Hallberg, R.W., Shevliakova, E., Stouffer, R.J., Cooke, W., Dunne, K.A., Harrison, M.J., Krasting, J.P., Malyshev, S.L., Milly, D., Phillipps, P.J., Sentman, L.T., Samuels, B.L., Spelman, M.J., Winton, M., Wittenberg, A.T., Zadeh, N. (2012): GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *Journal of Climate*, 25. 6646–6665. doi: http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1
- Dunne, J.P., John, J.G., Shevliakova, E., Stouffer, R.J., Krasting, J.P., Malyshev, S.L., Milly, D., Sentman, L.T., Adcroft, A.J., Cooke, W., Dunne, K.A., Griffies, S.M., Hallberg, R.W., Harrison, M.J., Levy, H., Wittenberg, A.T., Phillips, P.J., Zadeh, N. (2013): GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–

Carbon Earth System Models. Part II: Carbon System Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *Journal of Climate*, 26. 2247-2267.

- Edwards, J.M., Slingo, A. (1996): Studies with a new flexible radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model.Q. J. R. *Meteorological Society*, 122. 689-720.
- Flanner, M. G., Zender, C. S. (2006): Linking snowpack microphysics and albedo evolution. Journal of Geophysical Research, 111. D12208, doi:10.1029/2005JD006834.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., Rummukainen, M. (2013): Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M.]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Folland, C.K., Rayner, N.A., Brown, S.J., Smith, T. M., Shen, S. S. P., Parker, D. E., Macadam, I., Jones, P.D., Jones, R.N., Nicholls, N., Sexton, D.M.H. (2001): Global temperature change and its uncertainties since 1861. *Geophyical Research Letters*, 28. 2621-2624. doi:10.1029/2001GL012877.
- Fox-Kemper, B., Ferrari, R. (2008): Parameterization of mixed layer eddies. Part II: Prognosis and impact. *Journal of Physical Oceanography*, 38. 1166-1179. doi:10.1175/2007JPO3788.1
- Gao F., Xin X., Wu T. (2012): Study on the prediction of regional and global temperature in decadal time scale with BCC\_CSM1.1. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1-26.
- Gaspar, P. (1988): Modeling the seasonal cycle of the upper ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 18. 161-180.
- Gordon, H., O'Farrell, S., Collier, M., Dix, M., Rotstayn, L., Kowalczyk, E., Hirst, T., Watterson, I., (2010): The CSIRO Mk3.5 Climate Model. *CAWCR Technical Report*, 21. 1-74.
- Gregory, D., Rowntree, P.R. (1990): A mass-flux convection scheme with representation of cloud ensemble characteristics and stability dependent closure. *Monthly Weather Review*, 118. 1483-1506.
- Griffies, S. M. (2009): Elements of MOM4p1: *GFDL Ocean Group Technical Report*. NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, 6. 444 p.
- Gröger, M., Mikolajewicz, U. (2011): Note on the CO<sub>2</sub> air-sea gas exchange at high temperatures. *Ocean Modelling*, 39. 284-290.
- Guan, C., Xie, L. (2004): On the linear parameterization of drag coefficient over sea surface. *Journal of Physical Oceanography*, 34. 2847-2851, doi:10.1175/JPO2664.1
- Hansen, J., Nazarenko, L. (2004): Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101. 423-428.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Kharecha, P., Lacis, A., Miller, R.L., Nazarenko, L., Lo, K., Schmidt, G.A., Russell, G., Aleinov, I., Bauer, S., Baum, E., Cairns, B., Canuto, V., Chandler, M., Cheng, Y., Cohen, A., Del Genio, A., Faluvegi, G., Fleming, E., Friend, A., Hall, T., Jackman, C., Jonas, J., Kelley, M., Kiang, N.Y., Koch, D., Labow, G., Lerner, L., Menon, S., Novakov, T., Oinas, V., Perlwitz, J.P., Perlwitz, J., Rind, D., Romanou, A., Schmunk, R., Shindell, D., Stone, P., Sun, S., Streets, D., Tausnev, N., Thresher, D., Unger, N., Yao, M., Zhang, S. (2007): Climate simulations for 1880-2003 with GISS modelE. *Climate Dynamics*, 29. 661-696. doi:10.1007/s00382-007-0255-8.
- Hanson, D., Mauersberger, K. (1988): Laboratory studies of the nitric acid tridydrate: Implications for the south polar stratosphere. *Geophysical Research Letters*, 15. 855-858.
- Hara, T. (2007): Update of the operational JMA mesoscale model and implementation of improved Mellor-Yamada level 3 scheme. Extended Abstracts, 22nd Conference on Weather Analysis and Forecasting/18th Conference on Numerical Weather Prediction, Utah, USA, J3.5.
- Hasumi, H., Emori, S. (2004): K-1 Coupled GCM (MIROC) Description. Center for Climate System Research, University of Tokyo, 34 p.
- Hasumi, H. (2006): CCSR Ocean Component Model (COCO) Version 4.0. Center for Climate System Research, CCSR Report, 25. 103 p.
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D., New M. (2008): A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research*, 113. D20119, doi:10.1029/2008JD010201.
- Hazeleger, W.,(2010): EC-EARTH: A Seamless Earth-System Prediction Approach is Action. Bulletin of the<br/>American Meteorological Society, 91. 1357-1363.<br/>http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2010BAMS2877.1

- Hewitt, H.T., Copsey, D., Culverwell, I.D., Harris, C.M., Hill, R.S.R., Keen, A.B., McLaren, A.J., and Hunke, E.C. (2011): Design and implementation of the infrastructure of HadGEM3: the next-generation Met Office climate modelling system. *Geoscientific Model Development*, 4. 223-253.
- Hibler, W. D. (1979): A dynamic thermodynamic sea ice model. *Journal of Physical Oceanography*, 9(4). 815-846.
- Holland, M. M., Bailey, D. A., Briegleb, B. P., Light, B., Hunke, E.(2012): Improved sea ice shortwave radiation physics in CCSM4: the impact of melt ponds and aerosols on arctic sea ice. *Journal of Climate*, 25. 1413-1430. doi:10.1175/JCLI-D-11-00078.1.
- Hourdin, F., Grandpeix, J. Y., Rio, C., Bony, S., Jam, A., Cheruy, F., Rochetin, N., Fairhead, L., Idelkadi, A., Musat, I., Dufresne, J. L., Lefebvre, M. P., Lahellec, A., Roehrig, R. (2013): From LMDZ5A to LMDZ5B: revisiting the parameterizations of clouds and convection in theatmosperic component of the IPSL-CM5 climate model. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-012-1343-y.
- Huang, C. J., Qiao, F., Shu, Q., Song, Z. (2012): Evaluating austral summer mixed-layer response to surface wave-induced mixing in the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 117. C00J18, doi:10.1029/2012JC007892
- Hunke, E.C., Dukowicz, J.K. 1997. An Elastic–Viscous–Plastic Model for Sea ice Dynamics. *Journal of Physical Oceanography*, 27. 1849-1867.
- Hunke, E.C., Lipscomb, W.H. (2010): CICE: The Los Alamos sea ice model documentation and software user's manual, Version 4.1. LACC-06-012. Los Alamos National Laboratory, 76 p.
- Hurrel, J., Visbeck, M., Pirani, A. (2011):WCRP Coupled Model Intercomparison Project Phase 5. CLIVAR Exchanges, 56. 1-2.
- Iacono, M., Delamere, J., Mlawer, E., Shephard, M., Clough, S., Collins D. (2008): Radiative forcing by longlived greenhouse gases: Calculations with the aer radiative transfer models, *Journal of Geophysical Research*, 113. D13103. doi: 10.1029/2008JD009944
- Ilyina, T., Six, K. D., Segschneider, J., Maier-Reimer, E., Li, H., Núñez-Riboni, I. (2013): Global ocean biogeochemistry model HAMOCC: Model architecture and performance as component of the MPI-Earth system model in different CMIP5 experimental realizations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5. 287-315.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- Ji, J. (1995): A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface. *Journal of Biogeography*, 22. 2063-2069.
- Ji, D., Wang, L., Feng, J., Wu, Q., Cheng, H., Zhang, Q., Yang, J., Dong, W., Dai, Y., Gong, D., Zhang, R.-H., Wang, X., Liu, J., Moore, J. C., Chen, D., Zhou, M. (2014): Description and basic evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) version1. *Geoscientific Model Development*, 7 (2). 1601-1647.
- Jungclaus, J. H., Fischer, N., Haak, H., Lohmann, K., Marotzke, J., Matei, D., Mikolajewicz, U., Notz, D., von Storch, J. S. (2013): Characteristics of the ocean simulations in the Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) the ocean component of the MPI-Earth system model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5. 422-446.
- Kawamiya, M., Kishi, M. J., Suginohara, N. (2000): An ecosystem model for the North Pacific embedded in a general circulation model Part II: Mechanisms forming seasonal variations of chlorophyll, *Journal of Marine Systems*, 25. 159-178.
- Kirkevag, A., Iversen, T., Seland, Ø., Hoose, C., Kristjansson, J. E., Struthers, H., Ekman, A. M. L., Ghan, S., Griesfeller, J., Nilsson, E. D., and Schulz, M. (2013): Aerosol-climate interactions in the Norwegian Earth System Model – NorESM1-M. *Geoscientific Model Development* 6. 207-244. doi:10.5194/gmd-6-207-2013, 2013.
- Knorr, W. (1998): Satellite Remote Sensing and Modelling of the global CO<sub>2</sub> exchange of land vegetation: A synnthesis study. Max-Planck-Institut fur Meteorologie Examensarbeit, 49. 185 p.
- Komuro Y., Suzuki T., Sakamoto T., Hasumi H., Ishii M., Watanabe M, Nozawa T., Yokohata T., Nishimura T., Ogochi K., Emori S., Kimoto M. (2012): Sea-Ice in Twentieth-Century Simulations by New MIROC Coupled Models: A Comparison between Models with High Resolution and with Ice Thickness Distribution. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, 213-232.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudre', N., Oge'e, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., Prentice, I.C. (2005): A dynamic global vegetation model for studies of the coupled

atmospherebiosphere system. Global Biogeochem Cycles, 19. 1-44.

- Kowalczyk, E.A., Wang, Y.P., Law, R.M., Davies, H.L., McGregor, J.L., and Abramowitz, G. (2006): The CSIRO Atmosphere Biosphere Land Exchange (CABLE) model for use in climate models and as an offline model. *CSIRO Marine and Atmospheric Research Papers* 013. 43.
- Kowalczyk, E.A., Stevens, L., Law, R.M., Dix, M., Wang, Y.P., Harman, I.N., Hayens, K., Srbinovsky, J., Pak, B., and Zhien, T. (2013): The land surface model component of ACCESS: description and impact on the simulated surface climatology. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 63. 65-82.
- Kraus, E. B. Turner, J. S. (1967): A one-dimensional model of the seasonal thermocline –II. The general theory and its consequences. *Tellus*, 19, 98-105.
- Kurihara, K., Ishihara, K., Sasaki, H., Fukuyama, Y., Saitou, H., Takayabu, I., Murazaki, K., Sato, Y., Yukimoto, S., Noda, A. (2005): Projection of climatic change over Japan due to global warming by high-resolution regional climate model. *MRI.SOLA*, 1. 97-100.
- Lamarque, J.-F., Bond, T. C., Eyring, V., Granier, C., Heil, A., Klimont, Z., Lee, D., Liousse, C., Mieville, A., Owen, B., Schultz, M. G., Shindell, D., Smith, S. J., Stehfest, E., Van Aardenne, J., Cooper, O. R., Kainuma, M., Mahowald, N., McConnell, J. R., Naik, V., Riahi, K., van Vuuren, D. P. (2010): Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmospheric Chemistry Physics*, 10. 7017-7039. doi:10.5194/acp-10-7017-2010.
- Li, M., Ma, Z.G., Niu, G.Y. (2011): Modeling spatial and temporal variations in soil moisture in China. *Chinese Science Bulletin*, 56(17). 1809-1820.
- Long, M.C., Lindsay, K., Peacock, S., Moore, J.K., Doney, S.C. (2013): Twentieth-Century Oceanic Carbon Uptake and Storage in CESM1(BGC). *Journal of Climate*, 26. 6775-6800.
- Ludwig, W., Probst, J., Kempe, S. (1996): Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles*, 10 (1). 23-41.
- Madec, G., Delecluse, P., Imbard, M., Lévy, C. (1998): *OPA 8.1 Ocean general circulation model reference manual*. Note du Pole de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace, 11. 91p.
- Madec, G. (2008): NEMO ocean engine. Note du Pole de modélisation, *Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)*, 27. 1288-1619.
- Maier-Reimer, E., Kriest, I., Segschneider, J., Wetze, P. (2005): The HAMburg Ocean Carbon Cycle Model HAMOCC 5.1-Technical Description Release 1.1. Tech. Report 14, Reports on Earth System Science, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, 50 p.
- Manabe, S. (1969): Climate and the ocean circulation. II: The atmospheric circulation and the effect of heat transfer by ocean currents. *Monthly Weather Review*, 97. 806-827.
- Marsland, S.J., Bi, D., Uotila, P., Fiedler, R., Griffies, S.M., Lorbacher, K., O'Farrell, S., Sullivan, A., Uhe, P., Zhou, X., Hirst, A.C. (2013): Evaluation of ACCESS Climate Model ocean diagnostics in CMIP5 simulations. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 63. 101-119.
- Marti, O., Braconnot, P., Dufresne, J.L., Bellier, J., Benshila, R., Bony, S., Brockmann, P., Cadule, P., Caubel, A., Codron, F., de Noblet, N., Denvil, S., Fairhead, L., Fichefet, T., Foujols, M. A., Friedlingstein, P., Goosse, H., Grandpeix, J Y., Guilyardi, E., Hourdin, F., Krinner, G., Le'vy, C., Madec, G., Mignot, J, Musat, I., Swingedouw, D.J., Talandier, C. (2010): Key features of the IPSL ocean atmosphere model and its sensitivity to atmospheric resolution. *Climate Dynamics*, 34. 1-26.
- Meehl, G.A., Bony, S., (2011): Introduction to CMIP5. CLIVAR Exchanges, 56. 4-5.
- Menon, S., Koch, D., Beig, G., Sahu, S., Fasullo, J., Orlikowski, D. (2010): Black carbon aerosols and the third polar ice cap. *Atmospheric Chemistry Physics*, 10. 4559-4571.
- Merryfield, W.J., Lee, W.S., Boer, G.J., Kharin, V.V., Scinocca, J.F., Flato, G.M., Ajayamohan, R.S., Fyfe, J.C., Tang, Y., Polavarapu, S. (2013): The Canadian Seasonal to Interannual Prediction System. Part I: Models and Initialization. *Monthly Weather Review*, 141. 2910-2945.
- Moss, R.H., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463. 747-756.
- Murray, R. J., (1996): Explicit generation of orthogonal grids for ocean models. Journal Computational Physics, 126. 251-273.
- Najjar, R. G., Jin, X., Louanchi, F., Aumont, O., Caldeira, K., Doney, S. C., Dutay, J. C., Follows, M., Gruber, N., Joos, F., Lindsay, K., Maier Reimer, E., Matear, R. J., Matsumoto, K., Monfray, P., Mouchet, A., Orr, J.C., Plattner, G. K., Sarmiento, J. L., Schlitzer, R., Slater, R. D., Weirig, M. F., Yamanaka, Y., Yool, A. (2007): Impact of circulation on export production, dissolved organic matter, and dissolved

oxygen in the ocean: results from phase II of the Ocean carbon-cycle model intercomparison project (OCMIP-2). *Global Biogeochem Cycles* 21 (3). GB3007. doi:10.1029/2006GB002857.

- Nakano, H., Suginohara, N. (2002): Effects of bottom boundary layer parameterization on reproducing deep and bottom waters in a world ocean model. *Journal of Physical Oceanography*, 32. 1209-1227.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (2000): *Emissions Scenarios. A special report of IPCC Working Group III*. Cambridge University Press, UK, 570 p.
- Neale, R.B., Gettelman, A., Park, S., Chen, C.C., Collins, W.D., Conley, A.J., Lauritzen, P.H., Williamson, D.L., Kinninson, D., Marsh, D., Smith, A.K., Vitt, F., Garcia, R., Lamarque, J.F., Mills, M., Tilmes, S., Morrison, H., Smith, P.C., Iacono, M.J., Easter, R.C., Liu, X., Ghan, S.J., Rasch, P.J., Taylor, M.A. (2012): Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5.0). NCAR Technical Note. 289 p.
- Niu, G.Y., Yang, Z.L., Dickinson, R. E. (2007): Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with gravity recovery and climate experiment data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112. doi: 07110.01029/02006jd007522
- Noilhan J., Planton, S. (1989): A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117. 536-549.
- Noilhan, J., Mahfouf, J.F. (1996): The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global Planet Change*, 13. 145-159.
- O'Farrell, S.P., (1998): Investigation of the dynamic sea-ice component of a coupled atmosphere sea-ice general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 103 (C8). 15751-15782.
- Oleson, K., Yongjiu D.W., G. Bonan G. (2004): *Technical description of the Community Land Model*. NCAR Technical Note NCAR/TN-461+STR, 174 p.
- Pappenberger, F., Cloke, H., Balsamo, G., Ngo-Duc, T., Oki, T. (2009): Global runoff routing with the hydrological component of the ECMWF NWP system. *International Journal of Climatology*, 30. 2155-2174. doi:10.1002/joc.2028
- Parker, D. E., Horton, E.B. (2005): Uncertainties in central England temperature 1878-2003 and some improvements to the maximum and minimum series. *International Journal of Climatology*, 25. 1173 -1188. doi:10.1002/joc.1190.
- Penduff, T., Le Sommer, J., Barnier, B., Treguier, A.M., Molines, J.M., Madec, G. (2007): Influence of numerical schemes on current-topography interactions in <sup>1</sup>/<sub>4</sub>° global ocean simulations. *Ocean Science Journal*, 3. 491-528.
- Qiao, F., Yuan, Y., Ezer, T., Xia, C., Yang, J., Lv, X., Song, Z. (2010): A three-dimensional surface wave circulation coupled model and its initialtesting. *Ocean Dynamics*, 60. 1339-1355. doi:10.1007/s10236-010-0326-y
- Qiao, F., Song, Z., Bao, Song, Y., Shu, Q., Huang, C., Zhao, W. (2013):Development and evaluation of an Earth System Model with surface gravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118. 4514-4524.
- Richter, J. H., Rasch, P.J. (2008): Effects of convective momentum transport on the atmospheric circulation in the Community Atmosphere Model, version 3. *Journal of Climate*, 21. 1487-1499.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U. Schulzweida, U., Tompkins, A. (2003): *The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I.* Model description, MPI Report, 349 p.
- Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornblueh, L., Manzini, E., Schlese, U., Schulzweida, U. (2006): Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *Journal of Climate*, 19. 3771-3791.
- Rothman, L. S., Barbe, A., Benner, D.C., Brown, L.R., Camy-Peyret, C., Carleer, M.R., Chance, K., Clerbaux, C., Dana, V., Devi, V.M., Fayt, A., Flaud, J.M., Gamache, R.M., Goldman, A., Jacquemart, D., Jucks, K.W., Lafferty, W.J., Mandin, J.Y., Massie, S.T., Nemtchinov, V., Newnham, D.A., Perrin, A., Rinsland, C.P., Schroeder, J., Smith, K.M., Smith, A.H., Tang, K., Toth, R.A., Auwera, J.V., Varanasi, P., Yoshino, K. (2003): The HITRAN molecular spectroscopic database: Edition of 2000 including updates of 2001. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 82. 5-44.
- von Salzen, K., Scinocca, J.F., McFarlane, N.A., Li, J., Cole, J., Plummer, D., Verseghy, D., Reader, M.C., Ma, X., Lazare, M., Solheim, L. (2013): The Canadian Fourth Generation Atmospheric Global Climate Model (CanAM4). Part I: Representation of Physical Processes. *Atmosphere-Ocean*, 51. 104-125.
- Shindell, D.T., Pechony, O., Voulgarakis, A., Faluvegi, G., Nazarenko, L., Lamarque, J.F., Bowman, Milly, K., Kovari, B., Ruedy, R., Schmidt, G. (2013): Interactive ozone and methane chemistry in GISS-E2 historical and future climate simulations. *Atmospheric Chemistry Physics*, 13. 2653-2689,

doi:10.5194/acp-13-2653-2013.

- Schmidt, G.A., Kelley, M., Nazarenko, L., Ruedy, R., Russell, G.L., Aleinov, I., Bauer, M., Bauer, S.E., Bhat, M.K., Bleck, R., Canuto, V., Chen, H.Y., Cheng, Y., Clune, T.L., Del Genio, A., de Fainchtein, R., Faluvegi, G., Hansen, J.E., Healy, R.J., Kiang, N.Y., Koch, D., Lacis, A.A., LeGrande, A.N., Lerner, J., Lo, K.K., Matthews, E.E., Menon, S., Miller, R.L., Oinas, V., Oloso, A.O., Perlwitz, J.P., Puma, M.J., Putman, W.M., Rind, D., Romanou, A., Sato, M., Shindell, D.T., Sun, S., Syed, R.A., Tausnev, N., Tsigaridis, K., Unger, N., Voulgarakis, A., Yao, M.S., Zhang, J. (2014): Configuration and assessment of the GISS ModelE2 contributions to the CMIP5 archive. *Journal of Advences in Modeing. Earth Systems*, 6 (1). 141-184. doi:10.1002/2013MS000265.
- Semtner, A. J.(1976): A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate. *Journal of Physical Oceanography*, 6. 379-389.
- Shonk, J.K.P., Hogan, R.J. (2008): Tripleclouds: an efficient method for representing cloud inhomogeneity in 1D radiation schemes by using three regions at each height. *Journal of Climate*, 21. 2352-2370.
- Sitch, S., Smith, B., Prentice, I. C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J. O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M. T., Thonicke, K., Venevsky, S. (2003): Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 9. 161-185. doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00569.
- Smith, R., Jones, P., Briegleb, B., Bryan, F., Danabasoglu, G., Dennis, J., Dukowicz, J., Eden, C., Fox-Kemper, B., Gent, P., Hect, M., Jayne, S., Jochum, M., Large, W., Lindsay, K., Maltrud, M., Norton, N., Peacock, S., Vertenstein, M., Yeager, S. (2010): Ocean Component of the Community Climate System Model (CCSM) and Community Earth System Model (CESM). The Parallel Ocean Program (POP) Reference Manual. 141 p.
- Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S., Salzmann, M., Schmidt, H., Bader, J., Block, K., Brokopf, R., Fast, I., Kinne, S., Kornblueh, L., Lohmann, U., Pincus, R., Reichler, T., Roeckner, E. (2013): The Atmospheric Component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 5. 146-172.
- Stouffer, R.J., Taylor, K.E., Meehl, G.A. (2011): CMIP5 Long-term experimental Design. *CLIVAR Exchanges*, 56. 5-7.
- Su, H.B., Paw, K.T., Shaw, R.H. (1996): Development of a coupled leaf and canopy model for the simulation of plant-atmosphere interaction. *Journal of Applied Meteorology*, 35 (5). 733-748.
- Sudo, K., Takahashi, M., Kurokawa, J., Akimoto, H. (2002): CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description, *Journal of Geophysical Research*, 107. 4339. doi:10.1029/2001JD001113.
- Sun, S., Bleck, R., Rooth, C., Dukowicz, J., Chassignet, E., Killworth, P. (1999): Inclusion of thermobaricity in isopycnic-coordinate ocean models, *Journal of Physical Oceanography*, 29. 2719-2729.
- Takata, K., Emori, S., Watanabe, T. (2003): Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and Planetary Change*, 38. 209-222.
- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., and Kawamiya, M. (2011): MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4. 845-872. doi:10.5194/gmd-4-845-2011, 2011.
- Takemura, T., Nozawa, T., Emori, S., Nakajima, T.Y., Nakajima, T. (2005): Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport- radiation model. *Journal of Geophysical Research*, 110. D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- Thornton, P. E., Lamarque, J.F., Rosenbloom, N. A., Mahowald, N. M.(2007): Influence of carbon-nitrogen cycle coupling on land model response to CO2 fertilization and climate variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 21. GB4018. doi:10.1029/2006GB002868.
- Tiedtke, M. (1993): Representation of clouds in large scale models. Monthly Weather Review, 121. 3040-3061.
- Timmermann, R., Goosse, H., Madec, G., Fichefet, T., Ethe, C., Duliere, V. (2005): On the representation of high latitude processes in the ORCA-LIM global coupled sea ice-ocean model. *Ocean Modelling*, 8. 175-201.
- Tsigaridis, K., Kanakidou, M. (2007): Secondary organic aerosol importance in the future atmosphere. *Atmospheric Environment*, 41. 4682-4692.
- Valcke, S. (2006): OASIS3 User Guide (prism 2-5). PRISM- Support Initiative, 3, 68 p.
- Verseghy, D. L. (1991): CLASS A Canadian Land Surface Scheme for GCMS. I. Soil Model. International Journal of Climatology, 11. 111-113.

- Vichi, M., Pinardi, N., Masina, S. (2007): A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem: Part I. Theory. *Journal of Marine System*, 64. 89-109.
- Visbeck, M., Marshall, J., Haine, T., Spall, M. (1997): Specification of eddy transfer coefficients in coarse resolution ocean circulation models. *Journal of Physical Oceanography*, 27. 381-402.
- Viterbo, P., Beljaars, A.C.M., Mahfouf, J.F., Teixeira, J. (1999): The representation of soil moisture freezing and its impact on the stable boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125. 2401-2426.
- Vodolin, E.M., Dianskii, N.A., Gusev, A.V. (2010): Simulating Present<sub>7</sub> Day Climate with the INMCM4.0 Coupled Model of the Atmospheric and Oceanic General Circulations. *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 46 (4). 414-431.
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, MP., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A.,. Coquart, L, Chauvin, F. (2011): The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, 40. 2091-2121.
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K. (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109. 5-31.
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., Kimoto, M. (2010): Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23. 6312-6335. DOI: 10.1175/2010JCLI3679.1
- Wu T., Wu G. (2004): An empirical formula to compute snow cover fraction in GCMs. *Advences in Atmospheric Sciences*, 21. 529-535.
- Wu, T. (2012): A mass-flux cumulus parameterization scheme for large-scale models: description and test with observations. *Climate Dynamics*, 38. 725-744.
- Wunsch, C., Ferrari, R. (2004): Vertical mixing, energy and the general circulation of the oceans. *Annual Review* of *Fluid Mechanics*, 36, 281-314. doi:10.1146/annurev.fluid.36.050802.122121.
- Xu, K-M. (1993): Cumulus ensemble simulation, the representation of cumulus convection in numerical models. *Meteorological Monographs*, 24. 221-235.
- Xu, R., Prentice, I.C. (2008).: Terrestrial nitrogen cycle simulation with a dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 14, 1745-1764, doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01625.x, 2008
- Yu, W., Li, Z., Yuan, Y. (2005): Improvement of the SLP simulation in the coupled AGCM-ocean surface wave model. *Chinese Science Bulletin*, 50(20). 2397-2400.
- Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., Tanaka, T Y., Shindo, E., Tsujino, H., Deushi, M., Mizuta, R., Yabu, S., Obata, A., Nakano, H., Koshiro, T., OSE, T., Kitoh A. (2012): A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3-Model Description and Basic Performance. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90. 23-64.
- Zahariev, K., Christian, J.R., Denman, K.L. (2006): *The Canadian Model of Ocean Carbon (CMOC) v1.0*, CMOC manual. 58 p.
- Zhang, G. J., és McFarlane, N. A. (1995): Role of convective scale momentum transport in climate simulation. *Jornal of GeophysicResearch*, 100. 1417-1426.
- Zhang, M., Lin, W., Bretherton, C.S., Hack, J.J., Rasch, P.J (2003): A modified formulation of fractional stratiform condensation rate in the NCAR community atmospheric model CAM2. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D1).
- Zhang, J., Rothrock, D. (2000): Modeling Arctic sea ice with an efficient plastic solution. *Journal of Geophyical Research*, 105. 3325-3338.