



**MAGYARORSZÁG HOSSZÚ TÁVÚ TÁRSADALMI ÉS
GAZDASÁGI FEJLŐDÉSI PÁLYÁJÁNAK ELŐREJELZÉSE**

WP2 Szakirodalmi áttekintés

D2.1 A KLÍMAMODELLEZÉS NEMZETKÖZI EREDMÉNYEI



MTA Közgazdaság- és Regionális Tudományi Kutatóközpont

Regionális Kutatások Intézete

2015

Készítette:

Kovács András Donát

<http://nater.rkk.hu>

A jelen tanulmány kiadása Izland, Liechtenstein és Norvégia EGT-támogatásokon és a REC-n keresztül nyújtott anyagi hozzájárulásával valósult meg. A jelen dokumentum tartalmáért az MTA KRTK felelős.

A Projekt izlandi, liechtensteini és norvégiai támogatásból valósul meg.

A szerződés azonosítószáma: EEA-C12-11



REGIONAL ENVIRONMENTAL CENTER

Bevezetés

Problémafelvetés, a téma jelentősége

Napjaink egyik legfőbb kihívása a klímaváltozáshoz és az ahhoz kapcsolódó komplex hatásokhoz való alkalmazkodás. Az elmúlt évtizedben a témával kapcsolatos ismeretek kibővültek, így mára elfogadottá vált a tény, mely szerint az emberiségnek az éghajlati tényezők változásával és mindenre kiterjedő következményeivel szembe kell néznie. A tudományos konszenzuson alapuló előrejelzések szerint a földi átlaghőmérséklet – különböző természeti és antropogén hatások eredményeként – a jövőben emelkedni fog, így a XXI. században számos globális és regionális hatással kell majd számolni.

A klímaváltozásra vonatkozó kijelentések jelentős részükben olyan jövőre vonatkozó modell-projekciók alapján valószínűsíthetők, amelyek szimulálni képesek az egyes klimatikus elemek változását. A klímaváltozásra fókuszáló modellezési eljárásoknak óriási jelentősége lehet, hiszen a várható tendenciák előrejelzése elősegítheti a változásokra való felkészülést, a komplex környezeti kockázatkezelést és az energiafelhasználás optimalizálását. A klímamodellek segítségével megfogalmazható jövőszcenáriókat figyelembe vevő intézkedések révén az egyes közösségek felkészülhetnek a változásokra. Az ezek nagyságrendjét és irányát egyre pontosabban bemutató modell-szimulációk jelentősége tehát nem csupán a tudományos ismeretek végett, hanem a társadalmi paradigmák, a környezettudatosság szempontjából is nagyon nagy.

Célok

A fenti gondolatokat szem előtt tartva, a következőkben röviden összegezzük az éghajlati modellek legfőbb típusait és fontos eredményeit. Természetesen mindezt a teljesség igénye nélkül, hiszen az előzmények és források sokasága, ilyen terjedelem mellett nem teszi lehetővé a témakör mindenre kiterjedő és részletekbe bocsátkozó feldolgozását.

Jelen fejezet alapvető célkitűzése a nemzetközi klímamodellezés eddigi eredményeinek összefoglalása, a globális és regionális modellezés alapjainak bemutatása. Ezen túlmenően – közvetett módon – szeretnénk megerősíteni a változásokra való felkészülés fontosságát is. A klímamodellek által prognosztizált változásokra még időben reagáló társadalmi közösségek ugyanis hatékonyabban óvhatják és őrizhetik meg a településkörnyezeti rendszerek állapotát. A klímavédelmet szolgáló tevékenységek csökkenthetik az energiafüggőséget, adott esetben (akár a zöld-gazdaság révén) élénkítőleg hathatnak a helyi gazdaságra, végső soron pedig – a megfelelő kommunikáció, nevelés és tudatformálás mellett – szemléleti, magatartásbeli javulást generálhatnak.

Módszerek

A fejezetben ismertetett megállapításokat hazai és nemzetközi szakirodalmak alapján mutatjuk be. Az áttekintést elsősorban hazai szerzők (többek között az OMSZ és az ELTE munkatársainak: Bartholy, Bozó, Haszpra, Mika, Pieczka, Pongárcz, Práger, Szépszó) korábbi munkái alapján állítottuk össze, de a felhasznált források olyan nemzetközi hivatkozásokat is tartalmaznak, mint a Klímaváltozási Helyzetértékelő Program (U.S. Climate Change Assessment Program, CCSP - Synthesis and Assessment Product (SAP); a Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations (Bader et al., 2008) az IPCC által összeállított Helyzetértékelő Jelentések és egyéb nemzetközi online források, mint pl. a NCAR UCAR University Corporation for Atmospheric Research, NOAA National Atmospheric and Ocean Administration, NASA Goddard Institute for Space Studies, vagy a PRUDENCE és ENSEMBLES kutatások eredményei.

A témakör elméleti háttere

A globális éghajlati rendszer jövőbeni változásainak előrejelzésére különféle modell-megközelítéseket használnak. A várható klimatikus folyamatok legteljesebb szimulálására a kutatók többsége szerint elsősorban a numerikus-modellezés és az ezekre épülő kapcsolt globális modellek alkalmasak, amelyek alapvető fizikai törvényszerűségekre alapozva szimulálják a légkör és az óceánok mozgását, valamint becsléseket tesznek a hőmérsékleti- nyomásviszonyok és egyéb tényezők várható értékeire. Ezek a modellek egyszerre több komponensből – leggyakrabban légköri, óceáni és felszíni modellekből – állnak, melyek mindegyike az éghajlati rendszer adott alrendszerére és elemére érvényes törvényszerűségek alapján írnak le matematikai összefüggéseket és valószínűségeket. A modellezés során a térben folytonos fizikai állapotjelzők időbeli változását úgy kezelik, hogy a mezőkre egy rácshálózatot illesztenek. A különféle matematikai számításokat ezután már csak a hálózat csomópontjaira, az úgynevezett rácspontokra végzik el. Az összetett egyenletrendszerek megoldásán alapuló globális modellek többsége a Föld és az egyes kontinensek légkörére, valamint az óceánokra vonatkozik attól függően, hogy légkörfizikai, hidrológiai, vagy más megközelítéssel írhatók le. A nagy területekre készülő globális modellek hátránya, hogy a térbeli felbontásuk miatt a kisebb egységekben (tájakon, országokban) történő folyamatokat nem képesek vizsgálni. Használatuk ezért erősen korlátozott a változatosabb geomorfológiájú térségekben (Bartholy–Pongrácz 2013; Szépszó 2014).

Történeti áttekintés

A globális klímamodellek evolúciója

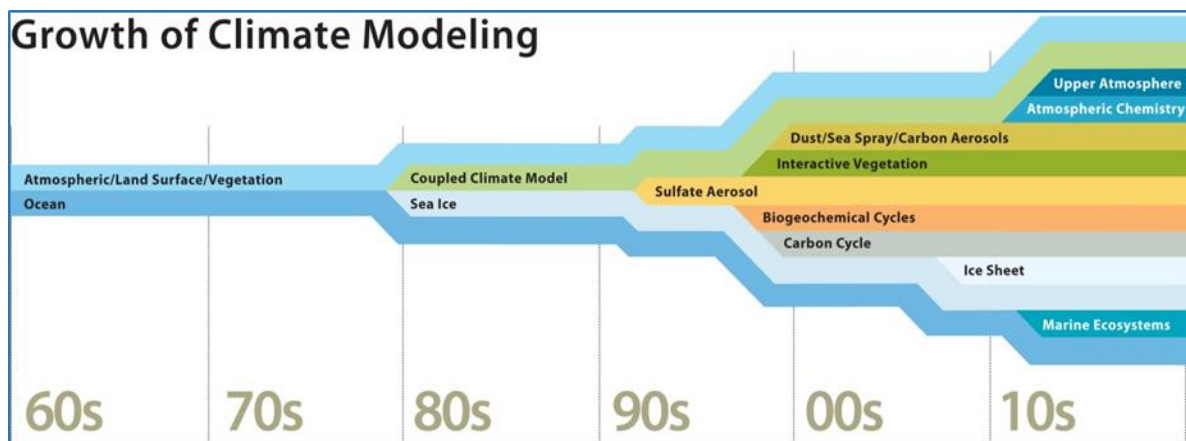
A 20. század során a földi légkörről alkotott ismeretek jelentősen kibővültek, így már a múlt század közepére kialakultak azok a légkörfizikai, meteorológiai elméletek és módszerek, amelyek segítségével lehetővé vált az éghajlati modellezés. A klímamodellezés atyjának sokan Richardsont (1922) tekintik, aki elsőként alkalmazott numerikus kalkulációkat a légköri folyamatok előrejelzésére (McGuffie–Henderson-Sellers 2005). A számítógépes előrejelzés története az amerikai Institute of Advanced Studies (IAS) keretei között indult el, olyan kutatók közreműködésével, mint J. Neumann, J. Charney, N. Phillips, P. Thompson, R. Fjortoft, A. Eliassen, E. Lorenz és J. Smagorinsky. Ebben a körben merült fel először, hogy a modelleket úgy kellene kialakítani, hogy a légkör kiindulási állapotának, „kezdeti feltételeinek” megadása helyett „pontos peremfeltételeket” jelenítsenek meg. Így egy bizonyos időtartamra vonatkozó integrálással a modell alkalmassá válhat bizonyos légköri folyamatok szimulációjára. Az ezt követő évtizedekben a modellezéssel kapcsolatos elképzeléseket fokozatosan tovább hangolták, a technológia pedig rohamléptekben fejlődött. Fontos mérföldkövet jelentett az ENSZ égisze alatt megalakult az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület IPCC globális éghajlatváltozást értékelő első jelentése (First Assessment Report FAR1990). A világ összes éghajlattal kapcsolatos kutatási eredményét szintetizálva az IPCC működése lendületet adott az éghajlatmodellezésnek is. A FAR szerint: „Az éghajlatváltozás előrejelzésének megbízhatóbbá válása az éghajlatmodellek fejlődésén alapszik, mely egyben a World Climate Research Program, Éghajlatkutatási Világprogram WCRP klímamodellezési alprogramjának célja.” Ezzel párhuzamosan indult az USA Globális Változás Kutatási Programja, (The United States Global Change Research Program, USGCRP) amely az éghajlati modellezést fő céljai közé emelte (Our Changing Planet, 1991) (Práger 2011).

A kilencvenes években már a többszörösen összetett légköri-óceáni modellek összekapcsolása során megkezdődött az AOGCM-ek (Atmosphere-Ocean General Circulation Model – Légkör-Óceán Általános Cirkulációs Modell) globális szintű átfogó összehasonlítása (Csatolt Modell Összehasonlítási Program Coupled Model Intercomparison Program, CMIP). A CMIP módszertanának felhasználásával lehetőség nyílt a különböző modellek összehasonlítására, validálására, valamint a klímaszcenáriók összevetésére is. Az általános légkörzést és a világóceán általános vízkörzését szimuláló modellek felbontása, pontossága, komplexitása egyre javult, míg a számtalan modellvariációs lehetőség végül az ún. kapcsolt modellek megvalósításához vezetett (Práger 2011).

A korszerű éghajlati modellek több fontos követelménynek is megfelelnek: egyrészt az éghajlat legfontosabb jellemzőit pontosan szimulálják, illetve a fizikai- kémiai- biológiai folyamatokat a légköri-éghajlati jellemzőket befolyásoló komplex környezeti rendszerben lezajló kölcsönhatásokat és visszacsatolásokat is beépítik. Széleskörű mechanizmusok leírására is képesek; nemcsak az éghajlati átlagértékeket, hanem az extrém értékeket és a változékonyság jellemzőit is visszaadják. Emellett a természetes hatások mellett a legátfogóbb klímamodellek tükrözik az antropogén kényszereket is (Práger 2011).

Miután az éghajlati rendszer folyamatai néhány órától több ezer évig terjedő időskálán, illetve néhány centimétertől több ezer kilométerig terjedő térskálán zajlanak, a modellkísérletek a legfejlettebb computer-technológiát igénylik. A rendelkezésre álló hardver- és szoftver kapacitás behatárolja a modellek részletességét. „A számítógépek teljesítőképességének fejlődése minden bizonnyal lehetővé teszi, hogy a modellekben alkalmazott közelítések, megszorítások egyre enyhüljenek, és helyüket az egyre egzaktabb fizikai leírások és matematikai formulák vegyék át (Práger 2011). Ma már a különböző modellgenerációk hibáival külön tudományterület foglalkozik, mely alapján egyértelmű, hogy az éghajlatmodellek evolúciója és teljesítménye egyenletesen javuló tendenciát mutat (1. ábra) (Reichler – Kim 2008).

1. ábra: A globális klímamodellek komplexitásának fejlődése az 1960-as évektől napjainkig Forrás: NCAR UCAR University Corporation for Atmospheric Research



(Forrás: <https://www2.ucar.edu/news/understanding-climate-change-multimedia-gallery>)

A modern globális éghajlatmodellek

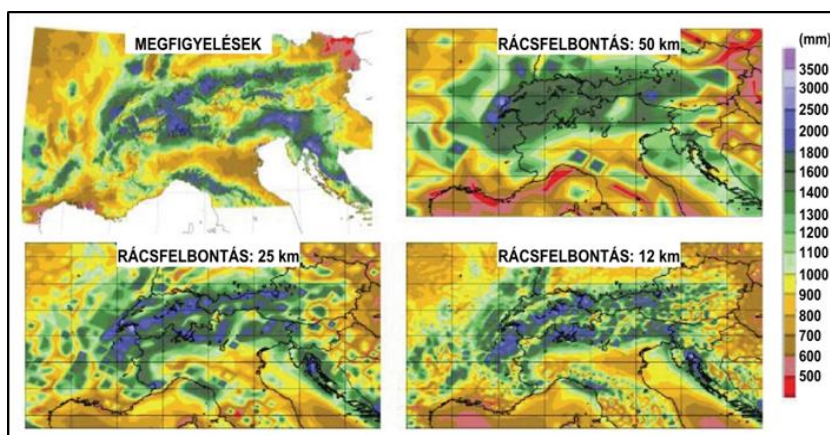
A korszerű klímamodellek általában részmodellekből állnak, amelyek az éghajlati rendszer egy-egy alrendszerét írják le. A légköri folyamatokat leíró általános cirkulációs modellek (Légköri Általános Cirkulációs Modellek Atmospheric Global Circulation Model, AGCM) a háromdimenziós térben zajló légköri mozgásokat

írják le a hőmérséklet, csapadék, légnyomás és egyéb éghajlati változók értékeire vonatkozóan. Horizontális felbontásuk átlagosan 100–300 km. Komplex modellek, melyek segítségével szimulálható a légkör állapotának (hőmérséklet, légnyomás, áramlási sebesség, és a víz különböző állapotainak sűrűsége) időbeli alakulása. Az AGCM-ek a folytonosnak tekintett állapotathatározó-mezőket többszintű rácshálózat pontjaiban adják meg. Mivel a teljes légkör csupán egy vékony rétegnek tekinthető, ezért a vertikális rácstávolság általában két nagyságrenddel kisebbek ($\sim 0,1\text{--}1$ km), mint a horizontális távok ($\sim 10\text{--}100$ km). A modellek általában a troposzférát és az alsó sztratoszférát (a légkör össztömegének 95%-át) magában foglaló 25–30 km vastagságú rétegeket veszik figyelembe, ahol gyakorlatilag minden fontos meteorológiai és levegőkémiai folyamat zajlik. Az egyes AGCM-ekben alkalmazott egyenletrendszerek alapvetően nem különböznek, de számítási algoritmusaik jelentősen eltérhetnek egymástól. További különbségek jelentkezhetnek a használt koordináta-rendszerben, valamint a rácshálózat geometriájában és felbontásában. Ma már minden modellben felszínkövető koordináta-rendszert alkalmaznak, amelyben a földfelszín koordinátafelület. (Schmidt et al., 2006). (McFarlane, 1987; Kim–Lee, 2003). A globálisan összehangolt modellezéssel párhuzamosan az elmúlt évtizedekben kiterjedt mérési programokat indítottak be a parametrizációk tesztelésére és javítására. Ide tartozik például a Mezokálájú Alpesi Program (Mesoscale Alpine Program, MAP, Bougeault et al. 2001) vagy a sugárzásátviteli és felhőparametrizációk tesztelését szolgáló Légköri Sugárzásmérési Program (Atmospheric Radiation Measurement Program, ARM, Ackerman–Stokes, 2003) (Práger 2011).

A globális légköri modellek közé tartoznak a változó felbontású modellek, amelyeknél a térbeli felbontás nem egységes: a kiemelt fontosságú területen vagy esetleg több területen is a felbontás finomabb (mint a regionális modellek esetében). A legfinomabb alkalmazott felbontások néhányszor 10 km-es nagyságrendűek, bár újabban arra is van példa, hogy 10 km alatti felbontású klímamodellt használnak (Hay et al., 2006).

A finomabb felbontású klímamodellek alkalmazása nem minden esetben ad pontosabb eredményeket egy adott térségre. Elsősorban azokban az esetekben várhatunk jelentős javulást a finomabb felbontású modellek alkalmazásától, amikor térben nagyon változékonny a csapadék, vagy erősen tagolt a domborzat. Ezeket a finom felbontású modelleket főként 20–30 éves időtávlatra végzik (2. ábra) (Christensen et al. 2007).

2. ábra: Az eltérő felbontások különbsége a becsült csapadékmezők és a megfigyelt évi csapadékösszegek összehasonlítása példáján



(Forrás: Christensen et al., 2005 nyomán Bartholy–Pongrácz szerk. 2013)

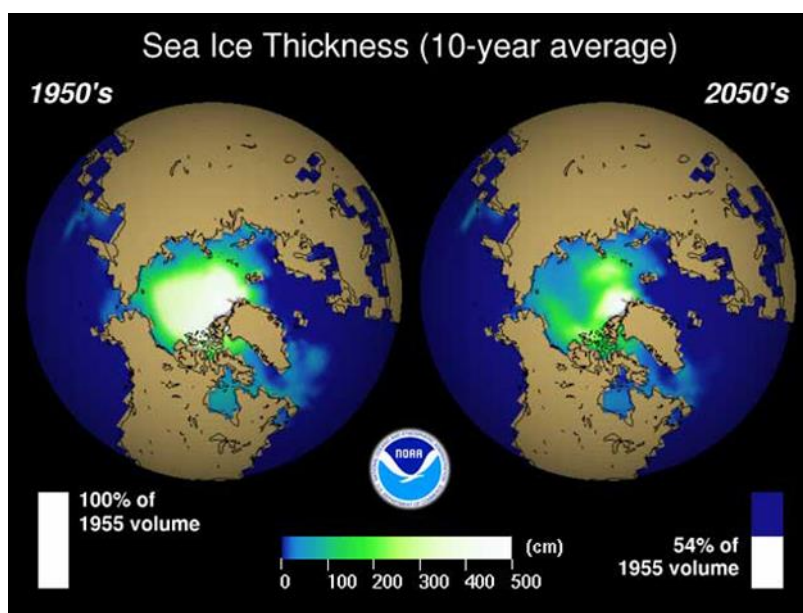
A világóceán vízkörzési modelljei (Óceáni Általános Cirkulációs Modellek - Oceanic General Circulation Model, OGCM) a légkörhöz hasonlóan a megmaradási törvények matematikai formuláinak közelítő megoldásán alapulnak. „Az óceáni modellek felbontása általában meglehetősen durva: 100-300 km. A vertikális irányban definiált koordináta-rendszer a leggyakrabban hagyományos felszínkövető rendszer, vagy izopiknikus (azonos sűrűségű) felületek által kijelölt koordináta-rendszer. A felső határfeltételeket a momentum, a látens és szenzibilis hő, valamint a csapadék fluxusai jelentik. Az óceáni modellek között a legnagyobb különbség a fizikai parametrizációs csomagokban található – leginkább a horizontális és vertikális diffúzió, valamint a keveredés leírásánál” (Szépszó 2014).

A csatolt éghajlati modellekben az OGCM-ek az AGCM-ekhez hasonlóan a teljes összezsátolt modellnek csak egy részmodulját alkotják. A csatolásokat a légkör és az óceán közötti impulzus-, hő- és vízgőzáramok, valamint az óceán és a tengeri jég közötti hőáramok és a sókoncentráció kiegyenlítődése jelentik. Az OGCM-ekben számos közelítés látott napvilágot (Large et al., 1994), amelyek hasonlóak a légkör felszínközeli rétegében alkalmazottakhoz. Komoly kérdést jelentenek a világóceán változásainak több évtizedes hatásai és az ebben rejlő pontatlanságok, amelyek nagymértékben növelik azt a bizonytalanságot, amelyet az óceán éghajlatalakító hatásával kapcsolatban a modelleredmények mutatnak (Schopf et al., 2003). A szállítórendszerek, az ár-apály, a napsugárzás és az óceánok édesvíz bevétele mellett számos olyan bizonytalansági tényező is van, amelyeket az eddigi modellek csak érintőlegesen tudtak bemutatni. Mára önálló modellezési részterületté vált a csatolt légkör- óceán- tengeri jég modellek létrehozása, amelyekben egyelőre még szintén számos bizonytalanság van (Práger 2011).

A Földfelszín és Felszíni Réteg Modellek – legyen szó akár szárazföldi, akár tengerfelszínről – az éghajlati rendszer kölcsönhatásainak valószínűleg legjelentősebb és legösszetettebb csoportját képviselik. Épp ezért a felszín modellezése az éghajlatmodellezés leginkább interdiszciplináris ága. E modellekben szétválaszthatatlanok az éghajlati, hidrológiai és bioszférikus hatások. A legelső globális éghajlatmodellekben a földfelszínt, energiaáramokat befogadó és kibocsátó kétdimenziós felületnek tekintették, mára viszont e modellekbe számos faktort beépítettek (pl. talajbeli szén ciklus Li et al., 2006; szenzibilis és látens hőáram Beringer et al., 2001. hórétegvastagság Liston, 2004. hófúvás, hótakaró Betts és Ball, 1997. Essery–Pomeroy, 2004. Oleson et al., 2004. Sturm et al., 2005. permafroszt modellezés Koren et al., 1999. Malevsky–Malevich et al., 1999. Boone et al., 2000. Warrach et al., 2001. Li–Koike, 200.; Boisserie et al., 2006. Yamaguchi et al., 2005. jégmodellek Rignot–Kanagaratnam, 2006. Velicogna–Wahr, 2006). Az elmúlt évtizedben a felszínmodellek összehangolását többen is megkísérelték (Gates et al., 1999. Henderson–Sellers et al. 1995. Henderson–Sellers 2006) de a meglehetősen bonyolult bioszféra-almodelleket a legtöbb modellbe még nem építették be, mert ezekhez nagyszámú bemenő paraméterre van szükség, s kalibrálásuk napjainkban még nem lehetséges (Práger 2011).

A globális modellek készítői fokozatosan ébredtek rá, hogy mennyire fontos tényező a tengeri jég. A Tengeri Jég Modellek tartalmazzák a tengeri jég dinamikájának és hőtanának elemeit: a jég mozgásának fizikáját, a jégen belüli, illetve a jég és a környező tengervíz közötti hő- és sótartalom átadási folyamatokat. Míg a valóságban a tengeri jég 10-10000 m nagyságú, de csak néhány méter vastagságú jégtáblákat alkot, a modellekben a tengeri jeget megszakítás nélküli jégtakaróként értelmezik. A jégmodellek nagy változatosságot mutatnak, de leírásukra többnyire a reológiát használják, amely a nyírási feszültségek és az általuk létrehozott mozgás és alakváltozás közötti kapcsolatot határozzák meg (Semtner 1976; Winton, 2000; Bitz–Lipscomb, 1999; Briegleb et al., 2002). A sarkvidékekre készült 2050-ig kitekintő becslések többsége a poláris jégsapkák drasztikus csökkenését prognosztizálja (3. ábra) (NOAA).

3. ábra: Az északi sarki tengeri jég csökkenése 100 év alatt



(Forrás: NOAA National Atmospheric and Ocean Administration
<http://www.noaa.gov/>)

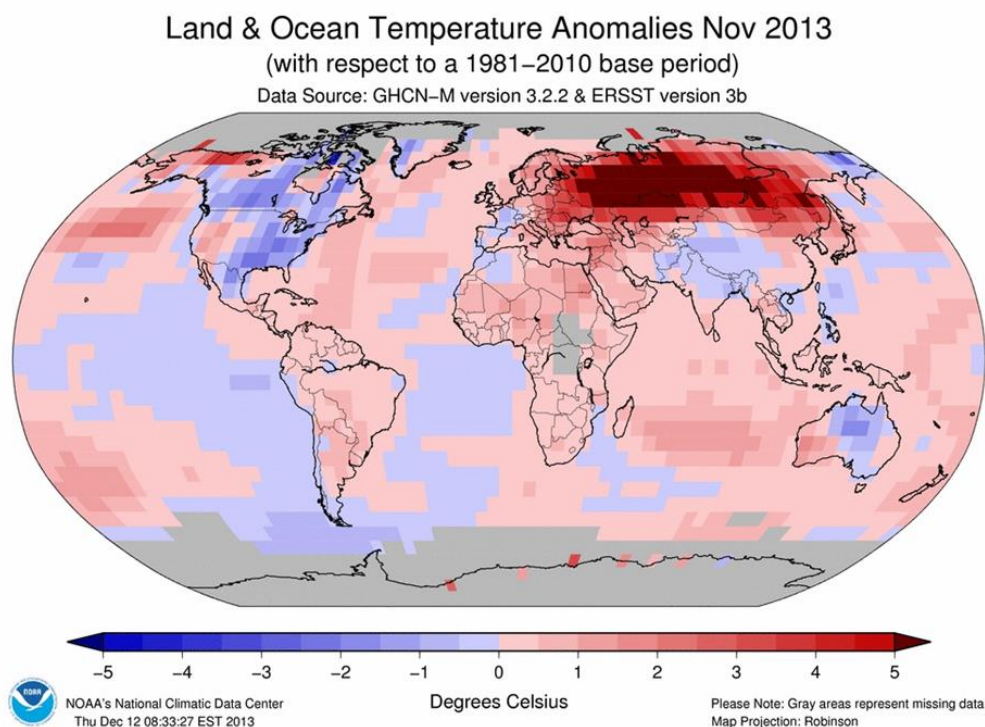
„Jelenleg a legösszetettebb éghajlatmodellek az AOGCM-ek. E modellek a mind több beépített éghajlati folyamat és modul révén az éghajlati rendszer dinamikájának egyre egzaktabb reprezentációját adják” (Práger 2011). A globális kapcsolt modellek képesek leírni azokat a hosszú időskálájú folyamatokat és kölcsönhatásokat, amelyek az egész Föld cirkulációjára és éghajlatára lassú kényszerítő hatással bírnak, és ezáltal segítségükkel meghatározhatók az éghajlati rendszer viselkedésének aszimptotikus jellemzői. Tehát az éghajlati rendszer leírására alkalmazott hosszabb időskálán a klímamodellek eredményeit mint statisztikai sokaságot kell tekintenünk, ahol nincs jelentősége annak, hogy adott előrejelzés melyik konkrét időpontra vonatkozik, s a modellek megbízhatóságát aszerint osztályozzuk, hogy a kiválasztott időszak átlagos éghajlati viszonyait milyen pontossággal képesek visszatükrözni. Ehhez persze a vizsgált időszak hosszának megválasztása is lényeges. A Meteorológiai Világszervezet ajánlása szerint az éghajlat csak hosszabb, több évtizedes időskálán értelmezhető, ezért a modellek eredményeit általában 30-éves időszakokra vizsgáljuk. Az AOGCM-ek használatának fő korlátja a számítógép-kapacitás igény. Ezért, ha nem a világ legnagyobb teljesítményű szuperszámítógépén futtatunk egy ilyen modellt, csak néhány, több évtizedes időtávú szimulációt végezhetünk. Ez hátráltatja a bizonytalanságok feltérképezését és az ennél hosszabb távú futtatásokat. Jóval kevésbé bonyolultak az „egyszerű éghajlati modellek, amelyek általában magas fokon parametrizált (erősen leegyszerűsített) modulokból állnak: - a jövőbeli emisszió-szenáriók, - a gázok és az aeroszol, - az aeroszol-prekurzor anyagok kibocsátásából származó sugárzási kényszer számítása, - a globális felszíni

átlaghőmérsékleti válasz számítása, - a hőtágulásból származó globális átlagos tengerszint-emelkedés, valamint a kontinentális és tengeri jégtakarók kiterjedésében mutatkozó válasz számítása (Harvey et al. 1997). Ezek a modellek nagyságrenddel kisebb hardver igényel bírnak, így számos különböző szcenárió kiszámítására alkalmasak. A bizonytalanságok a nagyszámú futtatás alapján jól számszerűsíthetők, mivel lehetőséget adnak az éghajlatváltozásnak valószínűségi eloszlásfüggvényekkel történő meghatározására, ami az AOGCM-ekkel lehetetlen. Az egyszerű klímamodellek és az AOGCM-ek közötti különbségek áthidalását az EMIC-ek segítségével oldhatók meg (Saltzman, 1978; Claussen et al., 2002). Az EMIC-ek általában leegyszerűsített légköri (AGCM) és/vagy OGCM) almodelleket használnak. Felbontásuk elég durva, a folyamatok leírásához pedig parametrizációkat alkalmaznak (Práger 2011).

A nemzetközi klímamodellek eredményei – szcenáriók, trendek és projekciók

Ugyan a globális modellek által kisebb térskálákon kevésbé megbízhatóak, térbeli felbontásuk fokozatosan javul, így egyre inkább alkalmassá válnak az éghajlatváltozás finomabb skálájú sajátosságainak, mint például az extrém időjárási jelenségekben bekövetkező változások elemzésére (4. ábra).

4. ábra: Szárazföldi és óceáni hőmérsékleti anomáliák



(Forrás: NOAA 2013 alapján <http://foldrajzmagazin.hu/globalis-problema/>)

A nemzetközi partnerséget igénylő összehangolt globális klíma-szimulációk elvégzésére jó példa a CMIP38 (Meehl et al., 2007) illetve a CMIP59 (Taylor et al., 2012) projekt, melyekben a legfontosabb (SRES illetve RCP) scenáriókkal és a lehető legtöbb globális modellel hajtottak végre kísérleteket (1. táblázat).

1. táblázat: Az IPCC jelentésekhez is használt SRES scenáriók főbb jellemzői

A1 – nagyon gyors gazdasági növekedés – népesség növekedése a XXI. sz. közepéig, utána csökkenés – új és hatékony technológiák gyors megjelenése – az egyes régiók közötti kiegyenlítődés – fokozott kulturális és társadalmi hatások – a regionális jövedelem különbségek csökkenése	B1 – kiegyenlítő világ felé fejlődés, az A1-hez hasonló népességváltozások – a gazdasági szerkezet gyors eltolódása a szolgáltatási és információs ágazatok felé – környezetbarát és energia hatékony technológiák bevezetése – a gazdasági, társadalmi és környezeti problémákra globális megoldások kidolgozása
A2 – heterogén világkép – helyi önkormányzatok, önszerveződések hangsúlyosabb működése – folyamatosan növekvő népesség – regionális gazdasági fejlődések – lassú és térben nem egyenletes technológiai változások	B2 – a gazdasági, társadalmi és környezeti problémák lokális szinten kezelése – folyamatosan növekvő globális népességváltozás – közepes mértékű gazdasági fejlődés – az A1, B1-hez képest lassabb és sokoldalúbb változások

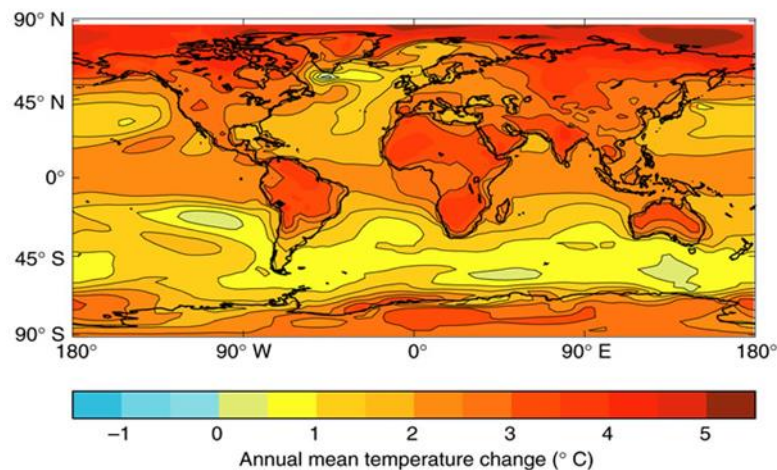
(Forrás: Nakicenovic et al., 2000 alapján ELTE 2006)

Ezek az eredmények szolgáltak alapul az IPCC helyzetértékelő jelentéseihez is. A modellek a nagy körületek és alapos munka ellenére továbbra sem mentesek a hibáktól és korlátoktól, ami komoly bizonytalansági tényezőt jelent az előrejelzett éghajlatváltozás mértékével, időbeli lefolyásával és regionális jellemzőivel kapcsolatban.

A Kibocsátási Forgatókönyvek Speciális Jelentésének (Special Report on Emission Scenarios, SRES) tervezése során különböző hatótényezőket és hozzájuk kapcsolódó kibocsátási forgatókönyveket állítottak fel. A kifejlesztett négy alapszenárió (A1, A2, B1, B2) eltérő demográfiai, társadalmi, gazdasági, technológiai és környezeti fejlettséget képvisel, amelyekhez különböző mértékű ÜHG- kibocsátás párosul. Az alapszenáriókat további hat modellezési eseményre bontották, hogy a különböző változók miatt eltérő eredményeket produkáló, de azonos feltételezéseken alapuló modelleket megvizsgálhassák. A hat reprezentatív SRES kibocsátási forgatókönyv a légköri széndioxid- koncentrációt 2100-ra 540 és 970 ppm közé becsüli, amely értékek az eltérő társadalmi-gazdasági feltételezésekből fakadnak. (-10 és +30% közti ingadozás miatt a teljes tartomány 490-1250 ppm) Ez az érték 2008-ban 386 ppm volt (IPCC 4.).

Az ÜHG kibocsátás mértékét befolyásoló forgatókönyvekre épülő éghajlati modellek előrejelzései szerint a globális földfelszíni átlaghőmérséklet 1,1-6,4 Celsius-fokkal fog növekedni az 1990-2100-ig tartó időszakban (5. ábra) (National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA).

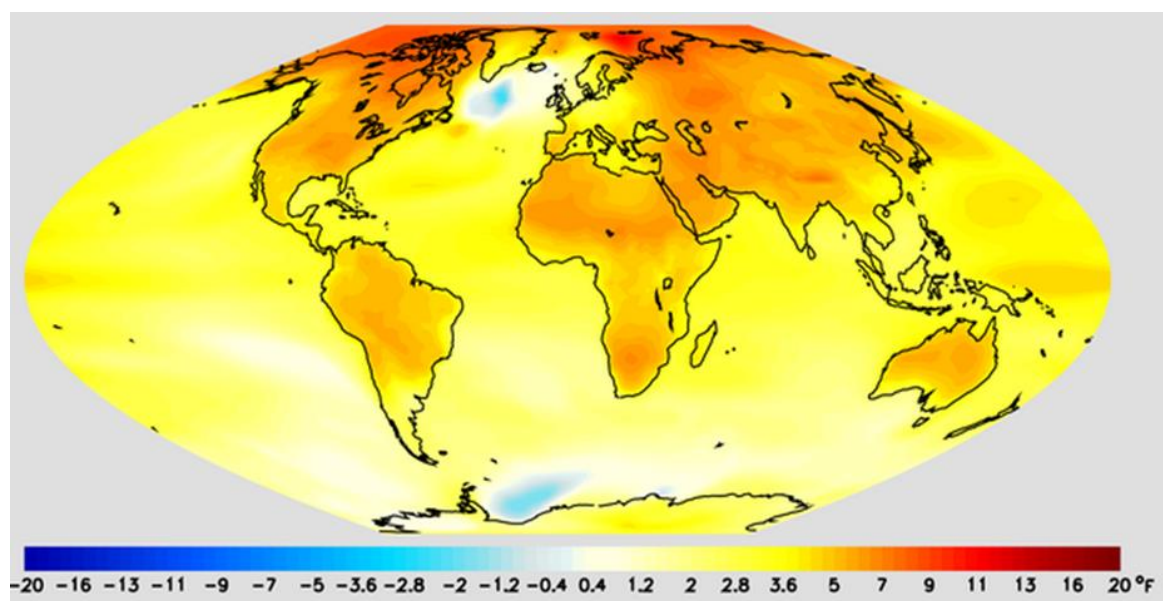
5. ábra: A CO₂ ~1%/év emelkedésével számolt globális évi középhőmérséklet változás 2050-re projektálva (°C)



(Forrás: NOAA <http://www.gfdl.noaa.gov/visualizations-climate>)

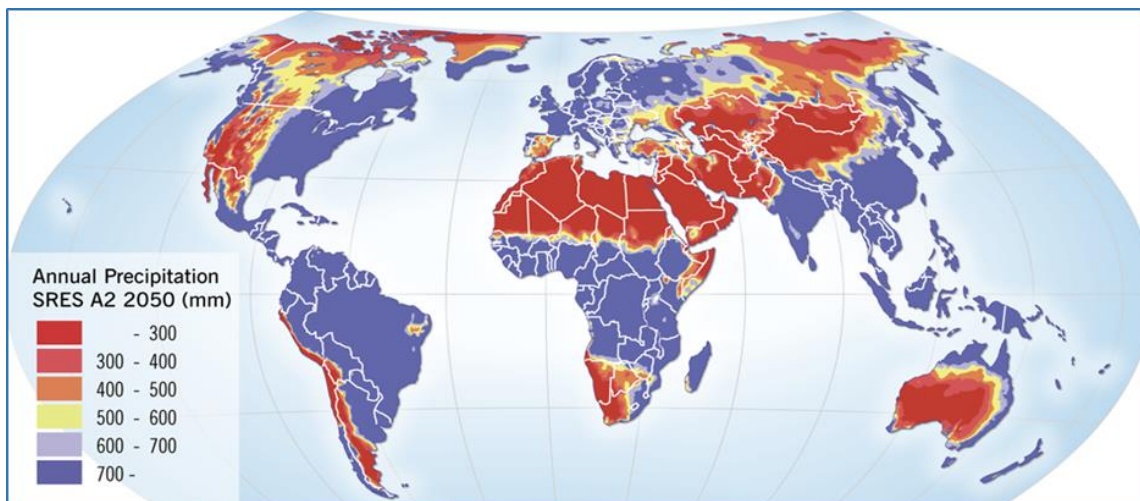
A globális modellek jelentős része 2050 – 2100 időszakra próbálnak jövőképeket vázolni. A hőmérséklet és csapadékváltozással összefüggő legfőbb eredmények az átlagos évi középhőmérséklet növekedését és a csapadékeloszlások megváltozását vetítik előre (6. 7. ábrák).

6. ábra: A léghőmérséklet változása (°F) a 2050-es projekció és az 1970-2000 közötti időszak átlagának különbségéből számolva: NOAA GDFL CM2.1 - SRES A1B



(Forrás: NOAA <http://www.gfdl.noaa.gov/visualizations-climate>)

7. ábra: Az évi csapadékmennyiség projekciója 2050-re SRES A2 alapján

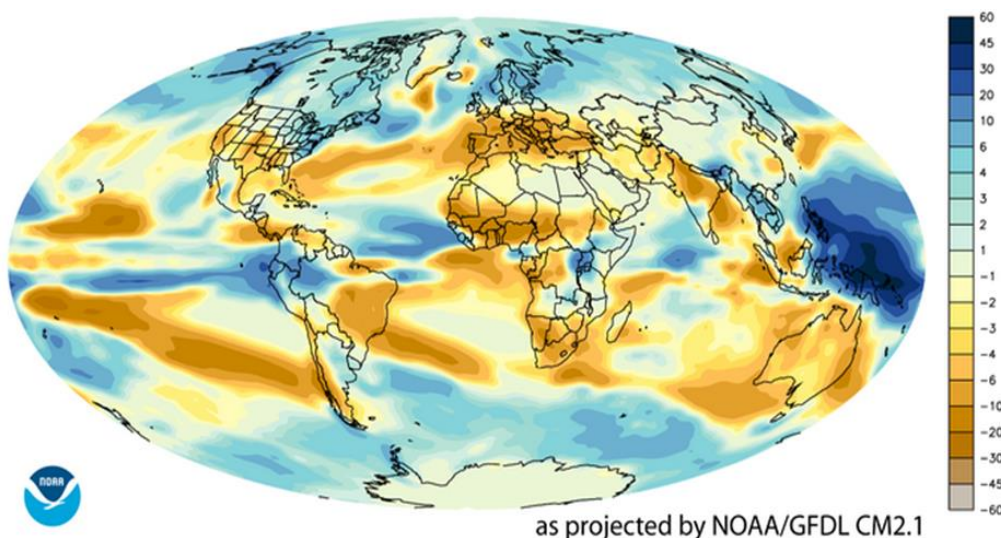


(Forrás: <https://nordpil.com/portfolio/mapsgraphics/precipitation-2050/>)

„A 21. századra előrevetített melegedés a forgatókönyvektől függetlenül, hasonló földrajzi eloszlást mutat, amelyek hasonlítanak az utóbbi évtizedekben megfigyelt mintázatokhoz is. A melegedés várhatóan a szárazföldeken és az északi félgömb magasabb földrajzi szélességein lesz a legerősebb, míg a déli óceánok és az észak-atlanti óceán egyes részein pedig a leggyengébb.” (Mika www.tankonyvtar.hu)

Miután a modellek egy része leképezhető korábbi földtörténeti időszakokba és a közelebbi múltba is, így akár hosszabb történeti szakaszok áttekintésére is lehetőség nyílik, amivel a jövőbeni változások intenzitása is megbecsülhető. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a jelenkori felmelegedés a korábbiaknál intenzívebb mértékben zajlik (8. 9.a.b. ábrák).

8. ábra: A csapadék mennyiségi változása a 21. sz. végéig (inch/év)

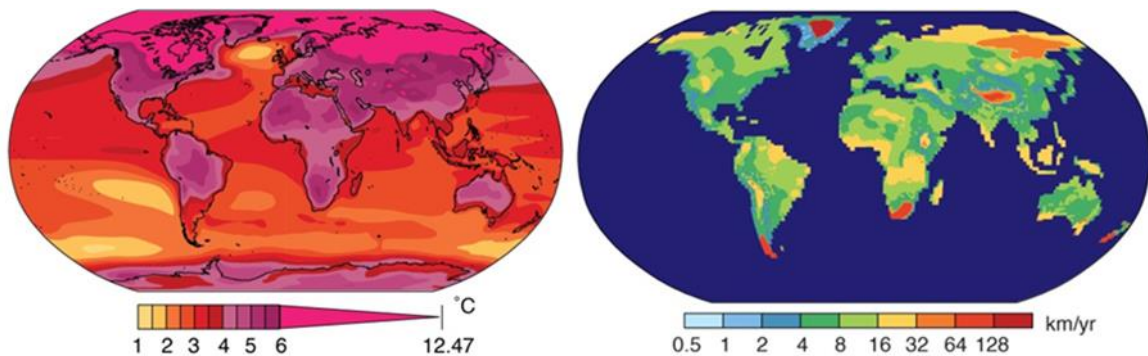


(Forrás: NOAA Magazine Feb. 2, 2007

<http://www.noaanews.noaa.gov/stories2007/s2787.htm>

9.a. ábra: Az évi középhőmérséklet növekedése a 21. sz. végi projektált értékek és a jelenlegi értékek különbségéből számolva 21 különböző modell összevetésével

9.b. ábra: az egyes fajok vándorlási igénye km/év-ben kifejezve, hogy elérjék a számunkra megfelelő élőhelyi körülményeket a 21.sz. végéig projektálva

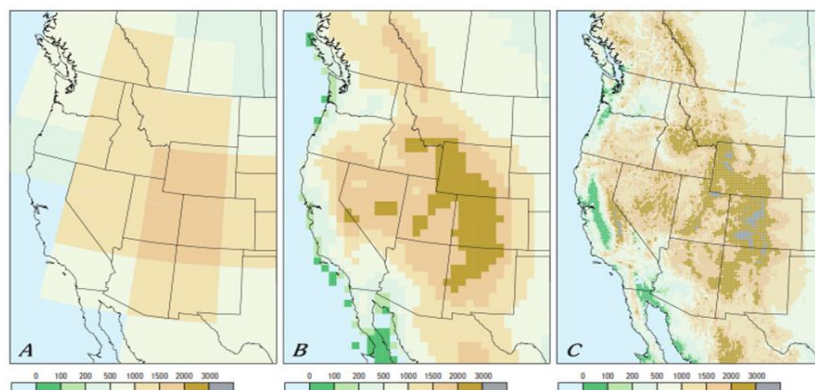


(Forrás: Diffenbaugh N. 2013)

A regionális klímamodellezés és legfőbb eredményei

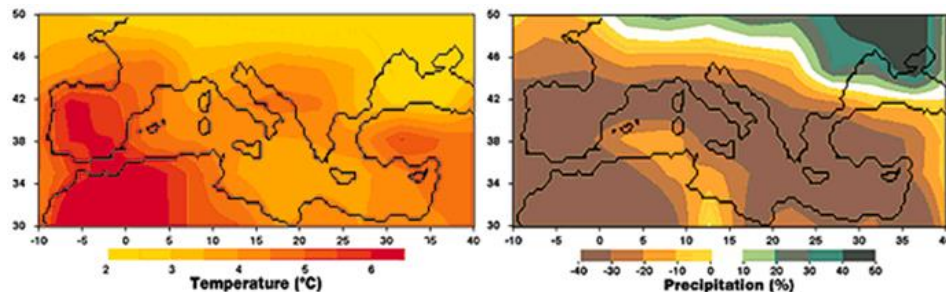
A jelenlegi globális modellekkel regionális térskálára is alkalmazható, megfelelő pontosságú becsléseket nem lehet készíteni. Egyrészt mert a globális modellek területi felbontása túl nagy (150–250 km-es rácspontokra alkalmazható), másrészt e megközelítés nem tartalmazza a felszín és a domborzat részletesebb adatait. A globális modellek eredményeit felhasználva azonban olyan korlátozott tartományú modelleket is futtathatók, melyek felbontása akár 10–25 km is lehet, s ez lehetővé teszi kisebb térségek pontosabb éghajlati változásainak leírását is (10. 11. ábrák).

10 ábra: A topografikus felbontás különbségei globális és regionális modellezéssel a Sziklás-hegység példáján (USA) A= GENESIS AGCM; B=RegCM; C=ETOPO 15km-es grides felbontás



(Forrás: R. S. Thompson et. al 1998)

11. ábra: A nyári középhőmérséklet és a lehulló csapadék változása 2050-ig a Mediterrán régióban a CO₂ kibocsátás megkettőződésével a GISS GCM alapján. A modell azt kívánja hangsúlyozni, hogy milyen gyors és erőteljes változások következhetnek be néhány évtized leforgása alatt.



(Rosenzweig et. al 2010 NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS))

A regionális klímamodellezés a meteorológia dinamikusan fejlődő részterülete. A korlátozott tartományú modellek klímamodellezési célokra való felhasználását az 1980-as évek végén kezdték meg a kutatók. Ekkorra a globális klímamodellezés már több évtizedes múltra tekintett vissza, azonban a földi, vagy kontinentális megközelítésű modellek meglehetősen nagy; közel 300–500 km-es felbontása nem tette lehetővé részletesebb, kisebb régiókra bontható előrejelzések készítését. A kutatók közül egyesek felvetették, hogy az időjárás előrejelzésében alkalmazott korlátozott tartományú modellek – melyeket addig csak néhány órá, néhány napos időszakokra készítettek – alkalmazhatók lennének komplexebb és hosszabb távú éghajlati változások vizsgálatára is (Dickinson et. al 1989; Giorgi et. al 1990). Az egymást követő ezirányú kutatások azt bizonyították, hogy a korlátozott tartományú modellek alkalmazásai – bizonyos módosításokat követően és a megfelelő peremfeltételek beépítésével – az éghajlati skálára is kiterjeszthetők. „A rövidtávú modellek átalakítása regionális klímamodellekké elsősorban a modellek fizikai parametrizációs eljárásainak módosítását követeli meg, mivel az éghajlati skálán egészen más fizikai folyamatok dominánsak, mint a néhány napos időskálán” (Piecza 2012).

A regionális klímamodellek (RCM-ek) alapját alapvetően globális klímamodellek finomításai, valamint reanalízisek adják. Ezek kidolgozása azonban a globális modelleknél is nehezebb. A különböző dimenzióban lévő modellek között rendszerint egyirányú csatolást alkalmaznak, vagyis elviekben a regionális modell által leírt éghajlati folyamatok nem hatnak vissza a globális modellre. A GCM-RCM csatolás alapvető feltételezése szerint; a GCM (bizonyos határokon belül) a földi méretű folyamatok mellett képes leírni a nagyskálájú globális éghajlati tényezők regionális vetületeinek egy részét, míg a regionális modell csak a GCM rácsfelbontásánál kisebb skálájú, lokális vetületeken alkalmazható. A hangsúly mindig azon van, hogy a regionális modelleknek le kell írniuk az éghajlati változók helyes eloszlását, azaz meghatározhatóvá kell tenniük a kisebb

téregységek még elfogadható hibával rendelkező klímaprojekcióit. A regionális klímamodellezés eredményei kapcsán számos folyamat részleteit is tisztázni lehetett (pl. sugárzási kényszer, felhő-konvekció, felszíni folyamatok). A regionális klímamodellezés eredményeit és problematikáját összegzik többek között az alábbi áttekintő tanulmányok: Chen et al., 2003; Christensen et al., 1998; Giorgi–Mearns, 1991; McGregor, 1997; Giorgi–Mearns, 1999; Giorgi et al., 2001; Leung et al., 2003; Wang et al., 2004, Giorgi, 2006; Takle et al., 1999. Az RCM-ek folyamatosan fejlődnek: egyrészt a horizontális és vertikális felbontás nő, a fizikai parametrizációk fejlődnek, és csatolt modell-rendszereket hoznak létre (Pieccka 2012).

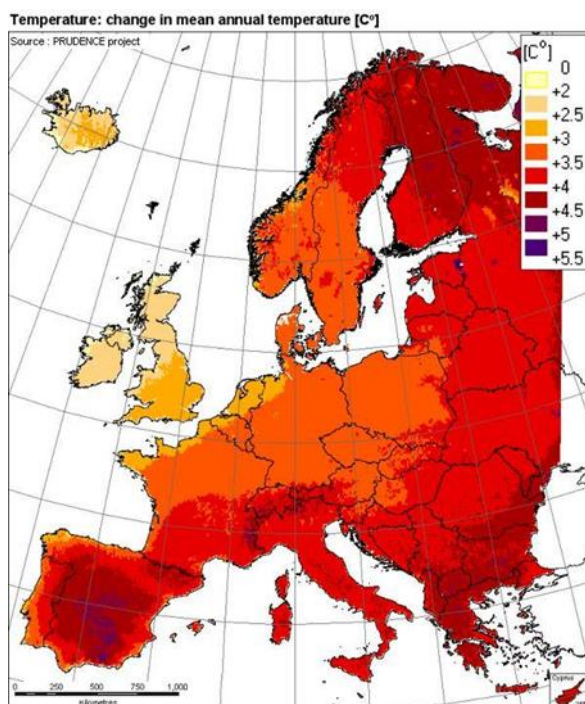
Az éghajlatváltozás regionális léptékű hatásainak körülírására a regionalizációs módszerek segítségével már jobban fel lehet készülni, mint a földi léptékű becslésekkel. A regionális éghajlati modellek segítségével lehetőség nyílik a korlátozott tartományú modellek futtatására, amelyek egy adott, körülhatárolható térségben zajló folyamatokat írnak le. Ezek a modellek kisebb területet képesek bemutatni és jóval finomabb felbontással futtathatók, mint a globális modellek. Az ismertebb európai regionális éghajlati modellek közé tartozik pl. az ARPEGE-Climate előrejelző modell és az ebből kifejlesztett ALADIN modell, a Német Meteorológiai Szolgálat időjárás-előrejelző modelljéből, az „Europa Modell”-ből, kifejlesztett REMO (Regional Modell), illetve a PRECIS, az ECMWF valamint a Special Report on Emissions Scenarios (SRES).

A nagyobb felbontás lehetővé teszi a felszíni, és kisebb léptékű folyamatok pontosabb leírását, amelyek lényeges szerepet játszanak a regionális éghajlati viszonyok alakításában. A regionális modellek bizonyos tekintetben tehát a globális tényezőket skálázzák le és egészítik ki új, lokális részletekkel a kiválasztott régióra, ugyanakkor 10-25 km-es felbontásukból adódóan egyszerűbb sémákat használnak a csapadékképződéssel és a felhőzettel kapcsolatos kölcsönhatások leírására. A kisebb léptékekben való gondolkodás esetében már az olyan egyszerűbben becsülhető adatok, mint az évi középhőmérséklet és a csapadék előrejelzése is egyre bonyolultabbá válik és erősen korlátozott reprezentációt tesz lehetővé, különösen az olyan heterogén régiókban, mint pl. a lánchegységek, vagy a Mediterraneum térsége. E bizonytalanságok csökkentése érdekében több olyan modellkísérlet zajlott és zajlik, amely az adott térségek szintjén megpróbálja pontosítani és még inkább számszerűsíteni a jövőbeli hatásokat. A regionális dimenzióra koncentráló projektek hasznosításának az is komoly korlátja, hogy a különböző regionális modellszimulációk eredményei egy-egy régióra esetenként számottevően eltérnek egymástól. Nagy jelentőséggel bírnak tehát azok a nemzetközi kutatások, amelyek során az egyes országok kutatócsoportjai hasonló módszertannal és közösen alakítják ki a klímamodelleket és azok projekcióit. Az eddigieket tekintve – a korábbi modellkísérleteket (PROVOST; ERA; EURRA;

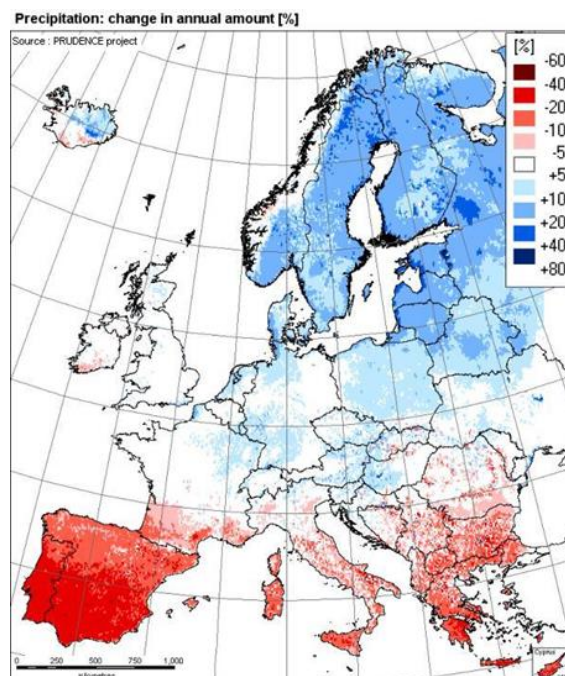
DEMETER; MICE; STARDEX) követően – a PRUDENCE és az ENSEMBLES voltak azok az első jelentősebb közös európai klímamodell-projektek, amelyek projekcióikat több eltérő területi szintű modell futtatásával, különböző kibocsátási forgatókönyvek és bizonytalansági tényezők figyelembevételével valósították meg.

A PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects; Christensen et al., 2007) során nagyfelbontású éghajlatváltozási forgatókönyveket dolgoztak ki, amely közel egy évszázadra előre írja le Európa különböző térségeinek előre jelezhető éghajlati változásait. A projekt a változási kockázatok figyelembe vételével megkísérelte a regionális időjárási és éghajlati viszonyok, egyes szélsőséges események, árvizek és szélviharok bekövetkezési valószínűségének kiszámítását. A különböző éghajlati forgatókönyvek kiértékelésével és a felmerülő bizonytalansági tényezők elemzésével, hatástanulmányok elvégzésével minden korábbinál jobb lehetőség nyílt Európa éghajlati jövőképeinek felvázolására. A több 50 km-es rácsfelbontással készült modellfuttatás tette lehetővé a bizonytalanságok vizsgálatát is, melyek számára a kezdeti és határfeltételeket általános cirkulációs modellek szolgáltatták. A sugárzási kényszert kapcsolt légkör-óceán általános cirkulációs modellekkel a pesszimistább A2 és az optimistább B2 kibocsátási forgatókönyvek alapján írták le (12. 13. ábrák) (Zsebeházi 2011).

12. ábra: Az évi átlagos középhőmérséklet lehetséges változása 2071-2100 között az 1961-1990-es periódushoz viszonyítva, az IPCC SRES A2. scenárió mentén, a HadCM3 globális cirkulációs modell és a HIRHAM 12km-es felbontású regionális modell felhasználásával EC JRC/IES (Forrás: PRUDENCE)



13. ábra: Az évi átlagos lehulló csapadékmennyiség lehetséges változása 2071-2100 között az 1961-1990-es periódushoz viszonyítva, az IPCC SRES A2. szcenárió mentén, a HadCM3 globális cirkulációs modell és a HIRHAM 12km-es felbontású regionális modell felhasználásával EC JRC/IES (Forrás: PRUDENCE)



A kutatás hangsúlyt helyezett az eredmények széles körű disszeminációjára, a közvélemény és a politikai döntéshozók objektív tájékoztatására is. Míg a 2001–2004 között lezajlott PRUDENCE projekt keretében célidőszakként 2071–2100 szerepelt (A2 és B2 szcenárióra), addig a 2004–2009 közötti ENSEMBLES (van der Linden–Mitchell, 2009) projekt keretében már 1951–2100 közötti tranziens futtatásokat is végeztek különböző szcenáriókra (14. ábra).

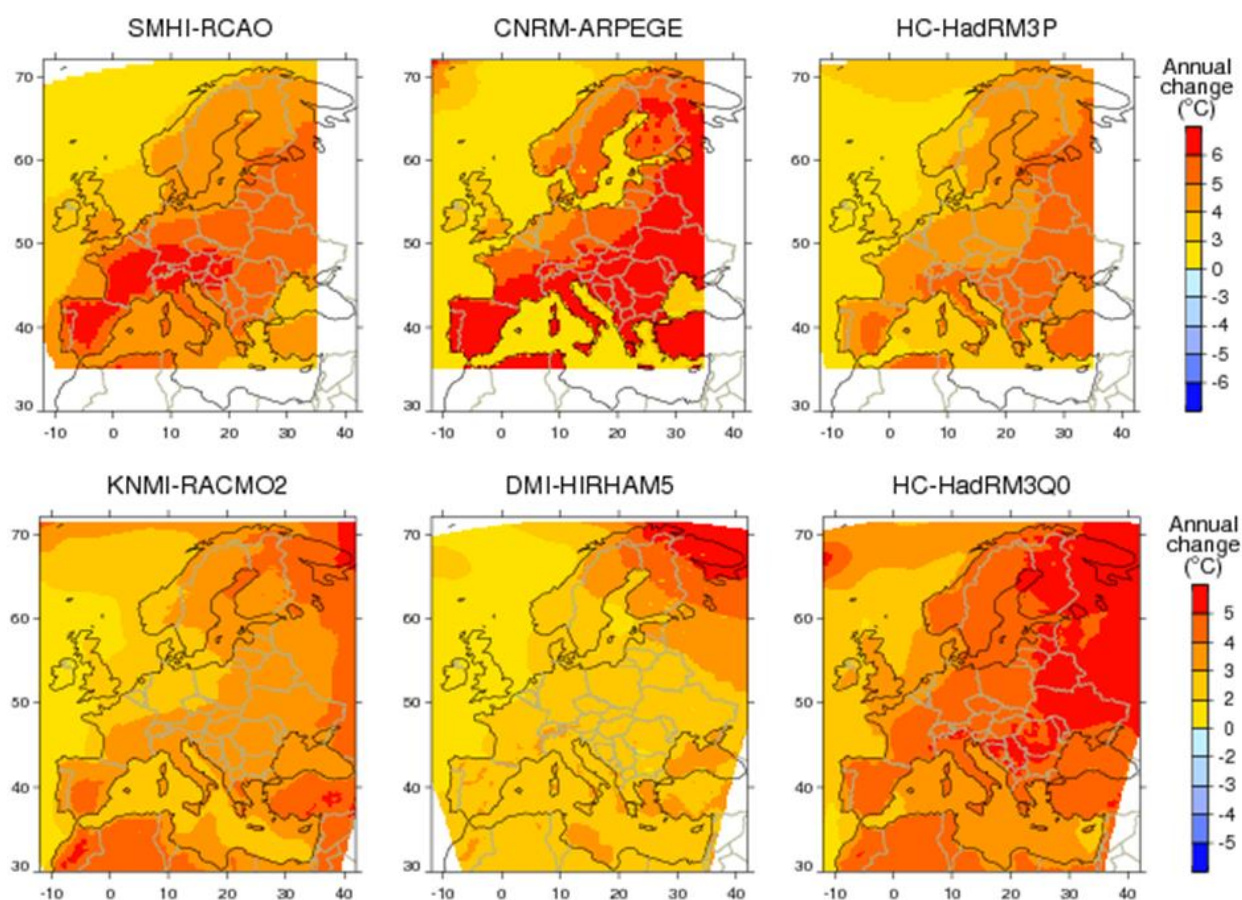
14. ábra: A referencia- és projekció időszakok 25km-es felbontásra kialakított ENSEMBLES szimulációk esetében

RCM	GCM	ERA40	METO-HC, Std	METO-HC, Low	METO-HC, High	MPIMET	IPSL	CNRM	NERSC	CGCM3	Total
METO-HC		1961–2002	1951–2100	1951–2100*	1951–2100*	1951–2100					4
HadRM											
MPIMET		1961–2002				1951–2100	1951–2050*				2
REMO											
CNRM		1961–2002						1951–2050			1
ALADIN											
DMI		1961–2002				1951–2100*		1951–2100	1951–2100*		3
HIRHAM											
ETH		1961–2002	1951–2100								1
CLM											
KNMI		1961–2002				1951–2100					1
RACMO											
ICTP		1961–2002				1951–2100					1
RegCM											
SMHI		1961–2002		1951–2100*		1951–2100*			1951–2100		3
RCA3											
UCLM		1961–2002	1951–2050	1951–2050							1
PROMES											
CAI		1961–2002			1951–2100*	1951–2050*					2
RCA3											
GKSS		1961–2002					1951–2050*				1
CLM											
Met.No		1961–2002	1951–2050						1951–2050*		1
HIRHAM											
CHMI		1961–2002						1951–2050*			1
ALADIN											
OURANOS*		1961–2002								1951–2050*	1
CRCM											
EC*		1961–2002									
GEMLAM											
VMGO*			1951–2050*								1
VMGO											
Total			3	3	2	7	2	3	3	1	25

(Forrás: ENSEMBLES)

Az ENSEMBLES során konkrét módszereket dolgoztak ki a modelleredmények együttes vizsgálatára. Sor került a nagyfelbontású, európai GCM- és RegCM-ek alkalmazására a modelleredmények validálására és az Európát lefedő rácsponti megfigyelési adatbázis létrehozására. 25 km-es horizontális felbontással, öt globális modell szolgáltatja a kezdeti és határfeltételeket. Összesen 25 RCM/GCM kombinációval végezték a XXI. századra projektált szimulációkat, mely során az átlagosnak tekinthető A1B scenáriót használták. Ezek közül az ALADIN; REMO; RegCM hazai adaptációjára is sor került (15. ábra).

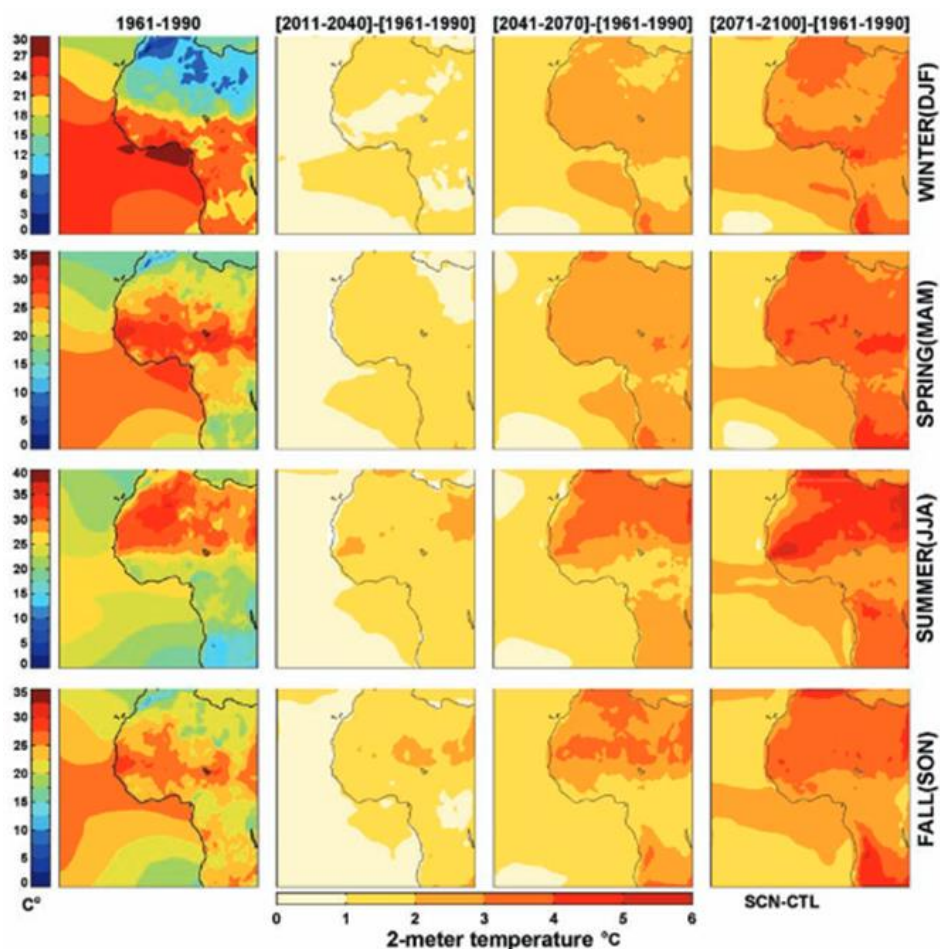
15. ábra: Az átlagos évi középhőmérséklet változása 2071-2100 között az 1961-1990-es periódushoz viszonyítva a PRUDENCE A2 (felső sor) és az ENSEMBLES A1B (alsó sor) 3-3 különböző RCM-en alapuló szimulációk alapján



(Forrás: <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/ecochange/climatedata/desc>)

Az egyes modellkísérletek eredménye ugyan más és más, ugyanakkor a tendenciák jól kiolvashatók. Ezek alapján „Európában a hőmérséklet várható emelkedése meghaladja majd a földi átlagos melegedést. Télen és évi átlagban a kontinens észak-keleti, míg nyáron a déli vidékei melegszenek gyorsabban. A csapadék változásának előjele északon pozitív, délen negatív. Az elválasztó vonal (zérus változás) télen tőlünk délebbre, nyáron tőlünk északabbra húzódik” (16. ábra) (Mika www.tankonyvtar.hu).

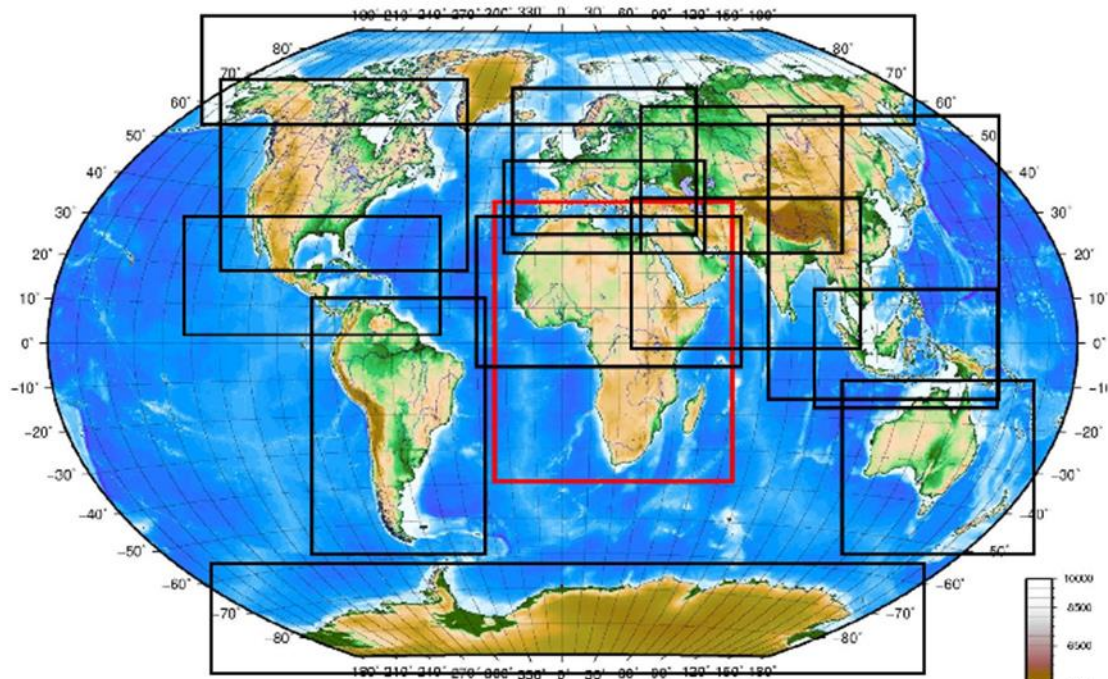
16. ábra: ENSEMBLES RCM projekciók az évi középhőmérsékleti változásokra Ny-Afrikában



(Forrás: ENSEMBLES Rummukainen et al., 2009 alapján)

A különböző kontinentális projekteket összefogó, 2009-ben induló CORDEX projekt az egész Földre (korábban kevésbé kutatott térségekre; pl. Afrika) kiterjedő koordinált regionális éghajlati leskalázást valósít meg, alapvetően 50 km-es gridek segítségével, de ennél kisebb, akár 10 km-es felbontásokkal is kísérletezve. A jelenleg is zajló, több nagyrégióra fókuszáló finomfelbontású modellezésben – megfelelő összehasonlítás érdekében – a tervezett szimulációk mindegyikére egységes követelmények vonatkoznak (17. ábra). A CORDEX12 együttműködés (Jones et al., 2011) Európára koncentráló ága, az Euro-CORDEX (Jacob et al., 2013; Teichmann 2015) valamint az RCP forgatókönyvekkel és a legújabb globális modellváltozatokkal készült szimulációk segítségével dinamikai leskalázását hajtottak végre 50 és 10 km-es felbontáson. A Euro-CORDEX eredmények a modell- és a forgatókönyv-választásból eredő bizonytalanságon kívül lehetőséget adnak a különböző forgatókönyv-családok hatásának tanulmányozására is.

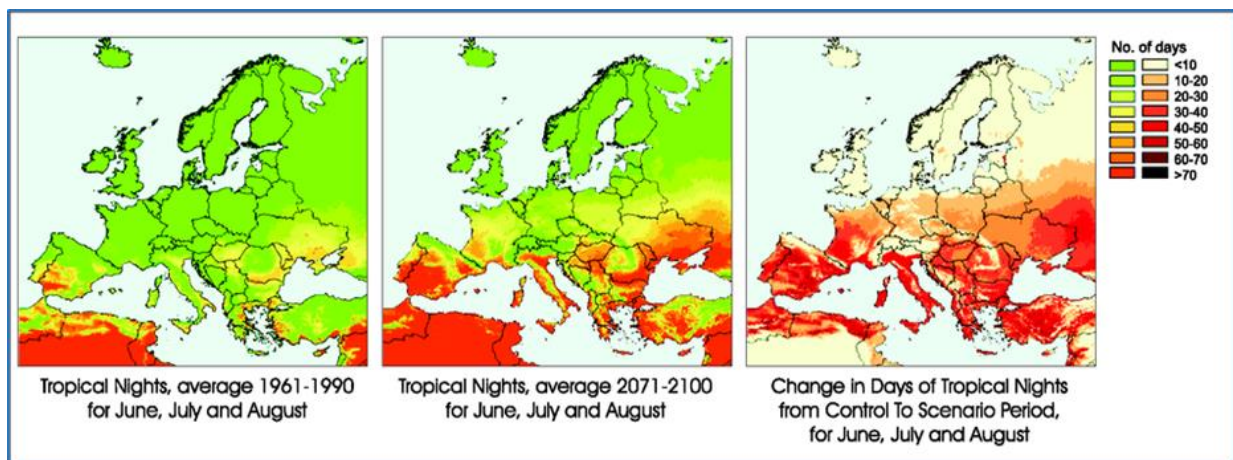
17. ábra: A CORDEX nagyrégiók Forrás: C. Teichmann 2015 Downscaling of CMIP6 for regional climate modeling: experiences from CORDEX



(Forrás: Scenario MIP Workshop, IIASA, Austria)

A nagy összefogással megvalósuló nemzetközi projektek mellett számos kutatóintézet és kutatócsoport végez regionális modellkísérleteket és vizsgálja a klímaváltozás lehetséges hatásait. Ennek eredményeként bővülnek azok a specifikus projekciók, amelyek alapján jobban körvonalazható a jövő (18. ábra).

18. ábra: A specifikus projekciók példája: A nyári „hőség-éjszakák”előfordulási arányának megnövekedése



(Forrás: Dankers, R. – Hiederer, R., 2008)

Konklúziók – a klímamodellezés legfőbb nehézségei

Az éghajlati szimulációk bizonytalanságai

A globális és regionális éghajlati modellek előrejelzései számos kérdéses faktort rejtenek magukban, ugyanakkor a bizonytalansági tényezők vizsgálata segít a modell-becslésekhez képest várható „kilengések” számszerűsítésében. A legfontosabb bizonytalansági tényezőt magában az éghajlati rendszerek evolúciójában kell keresnünk. Ebben az értelemben már az éghajlatváltozás fogalmának definiálása sem egyszerű, ugyanis az éghajlati rendszernek egyik fontos jellemzője, hogy minden külső kényszer nélkül is képes időről időre az átlagostól jelentősen megváltozni. A változás iránya előre be nem látható, és az sem tudható, hogy rövidebb, vagy hosszabb ideig tart. Mivel az éghajlati rendszerek mindig egy újabb egyensúlyi állapot felé tartanak, lényegében nincs átlagosnak tekinthető egyensúlyi állapotuk. Ezt a változékonyságot tapasztaljuk például akkor, amikor egy csapadék szempontjából rendkívülinek nem tekinthető időszakot néhány, a szokásosnál jóval szárazabb vagy nedvesebb év sorozata követ (Götz, 2005). Ez az éghajlati rendszerek természetes, belső tulajdonsága; a „szabad belső változékonyság”, amelyet a méréseken és a modellszimulációkon alapuló vizsgálatokban el kell különíteni az éghajlat tendenciózus változásától. Az elmúlt évszázadra vonatkozó modellfuttatásokból következtethetünk a múltban lezajlott éghajlatváltozások okaira, s ezen információkat felhasználhatjuk a jövőre vonatkozó éghajlati becslésekhez (Stott et al., 2006). A klimatikus modellek megalkotása azonban mégis nagy nehézségekbe ütközik, hiszen a közép- és hosszútávú alkalmazhatóság igénye miatt nincs „garancia” arra nézve, hogy a múlt éghajlatát jól leíró modell mennyire megbízható képet tud adni a jövő éghajlati változásainak leírására. Miután a modelleket a korábbi időszakok változásait figyelembe véve készítik és tesztelik, így tökéletesen pontos eredményekre senki nem számít. A modellek a valós folyamatokat közelítések útján írják le, ezért az eredmények szükségszerűen kisebb-nagyobb hibával terheltek, amelyek kiküszöbölésére a jövőbeli eredményeket nem önmagukban, hanem a modellek saját referencia-időszakához viszonyítva értelmezik (Bartholy-Pongrácz 2013).

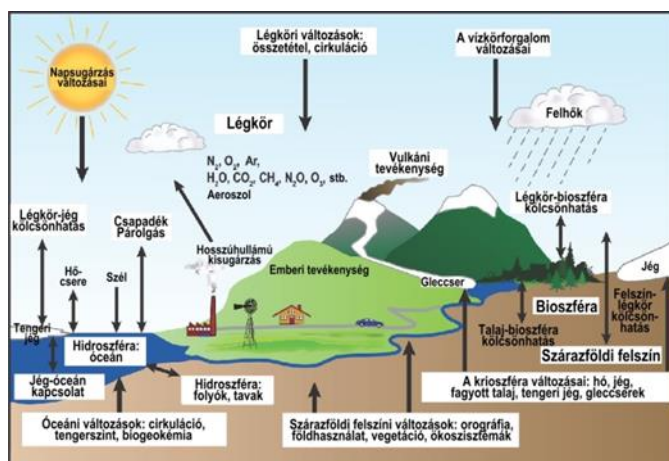
Az éghajlatra ható tényezők közül igen komoly bizonytalansági tényező maga az emberi civilizáció jelenléte. Miután az antropogén tevékenységek alakulásáról és pontos irányáról csak elképzelések vannak, ezáltal a jövőbeli hatásokról is csak feltételezések lehetnek. Az alternatívák ez esetben külső kényszerként számszerűsíthetők, így az adott modell az éghajlati rendszer egészének választ szimulálja a feltételezett külső kényszerre. Tehát az emberi tevékenységek változása és hatása éghajlati modellek segítségével is vizsgálható. Az elmúlt

évtized antropogén hatásokról tett tapasztalatai szükségessé tették a jelenleg használatban lévő SRES scenáriók felülvizsgálatát. Az IPCC ötödik helyzetértékelő jelentését megalapozó globális modellfuttatások során stabilizációs (RCP – Representative Concentration Pathways; Moss et al., 2010) scenáriókat alkalmaztak, melyeket a 2100-ra feltételezett sugárzási kényszerrel jellemeznek. A forgatókönyveken alapuló éghajlati szimulációkat éppen a külső kényszer hipotetikus volta miatt nem előrejelzéseknek, hanem projekcióknak, vagy másodfajú prognózisoknak nevezik (Szépszó 2013).

Összetettség és az ebből fakadó dilemmák

A tudományos és szakpolitikai diskurzusokban – mint ahogyan a közvélekedésben is – a klímaváltozást erőteljes dilemmák és nézetkülönbségek övezik. Ennek elsődleges oka, hogy a változások előrejelzése még kvantitatív módszerek alkalmazásával sem írhatók le tökéletesen, hiszen a globális környezeti rendszerben lezajló folyamatokat, az atmoszféra, hidroszféra, litoszféra, krioszféra és bioszféra egymással fennálló többszörösen összetett kölcsönhatásai jellemzik (19. ábra).

19. ábra: Az éghajlati rendszer teljes struktúrája és kölcsönhatás-rendszere



(Forrás: IPCC, Climate Change 2007: Cambridge U P alapján; Bartholy–Pongrácz 2013)

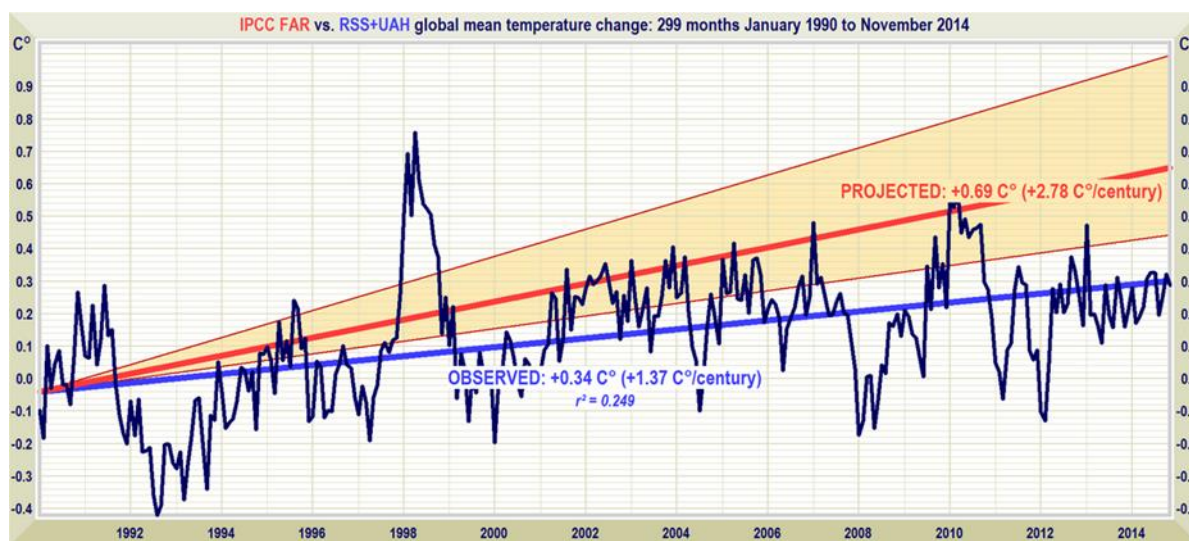
Az éghajlati rendszer tényezői és mozgatóerői – a teljes földi környezeti rendszerbe ágyazódva – rendkívül bonyolult kapcsolatban állnak egymással, ráadásul az egyes alrendszerekben olyan visszacsatolások működnek, amelyek iránya és eredménye csak közelítő jelleggel becsülhető meg. A természetben zajló hatásmechanizmusok már önmagukban óriási kihívást jelentenek a klímamodellek kialakításában és lefuttatásában. Erre példa egy folyamatban lévő kutatás, amely arra hívja fel a figyelmet, hogy a kelet-szibériai fagyott talaj olvadása miatt évente nyolc millió tonna metán kerül a légkörbe. Mivel a metán a szén-dioxidnál harmincszor hatékonyabban segíti elő a légkör hőmérsékletének növekedését, csak ez az egy tényező már jelentősen képes befolyásolni a

globális felmelegedést, illetve megváltoztathatja a klímamodellek korábbi becsléseit (Shakhova et al. 2014).

A természeti tényezők mellett az antropogén eredetű változások értelmezése és azok mértékének kiszámítása ugyancsak igen nehéz feladat. A mai álláspontok szerint az emberi tényezők által előidézett változások jelentősen befolyásolhatják a természetes ingadozások mértékét, így ezen faktorok vitás kérdéseket vetnek fel az előrebecslések során. Az antropogén hatások számszerűsítésekor a legtöbb modell a szén-dioxid koncentráció emelkedését mutatja be, azaz a jövőre vonatkozó scenáriók a légköri szén-dioxid koncentráció irányváltozásait írják le. Az így meghatározott antropogén szén-dioxid kibocsátás várhatóan monoton növekvő trendet követ, s ez a jelenlegi felfogás szerint tovább növelheti a felmelegedés mértékét és annak veszélyeit. A legtöbb kutató úgy véli, hogy a természetes és antropogén éghajlat-alakító folyamatok alakulását hosszabb távra csak feltételezni lehet, ezért különböző forgatókönyveket kell felállítani az eltérő jövőbeli irányok bemutatásához, melyeket időközönként felül kell vizsgálni, illetve az újabb adok felhasználásával időről időre frissíteni szükséges (Szépszó 2014).

A nemzetközi szakirodalomban a „klímamodellezés versus klímarealitás” kérdése rendszeresen felmerül. Medimorec és Pennycook 2015-ben megjelent „The language of denial: text analysis reveals differences in language use between climate change proponents and skeptics” c. cikkükben az IPCC és a NIPCC közötti sajátos vitát elemzik és annak hatását a klímaváltozással kapcsolatos felfogás alakulása szempontjából. Tény, hogy néhány éve a klímaszkeptikusok egyre inkább bekapcsolódnak a diskurzusba. Egyre többen azt vallják a globális hőmérséklet változásával kapcsolatos, 1970-es, 1980-as évekbeli modellszerű becslések többsége jóval magasabb hőmérsékletemelkedést jelzett előre, mint amekkora valójában bekövetkezett (20. ábra). Vagyis a visszaellenőrzések nyomán kiderül, hogy a modellek többsége jócskán felülbecsülte a 2000-es évektől várható változást. (A legtöbb klímamodell az 1961–1990 időszakot veszi alapul, mert leginkább így mutatható ki megfelelően szignifikáns változás a XXI. századra). Többen – így pl. az Alabamai Huntsville Egyetem klímakutatói is – úgy vélik, hogy a korábbi projekciók alapján egyértelmű a modellek kudarca, hiszen sem a troposzférikus, sem a felszíni hőmérsékleti adatok nem mutatják a korábban számított erőteljesebb változásokat (Spencer 2008; 2010; 2014; Monckton C. 2015). Ezek az észrevételek már megjelentek az IPCC 5. jelentésének második átdolgozásában is. A dokumentum első verziójában az 1986-2005-ös időszakon alapuló 2016-2035-re szóló globális hőmérséklet-növekedést 0.4-1.0 °C-ra becsülték, de a végső kiadványban már csak 0.3-0.7 °C-ban határozták meg.

20. ábra: A globális hőmérséklet-növekedés becsült (projected) és észlelt (observed) változása közötti eltérés 1992 – 2014 között



(Forrás: Forrás: Monckton 2015 www.climatedepot.com)

A környezeti alrendszerek mechanizmusainak spontaneitása és bizonytalan kimenetele alkalmat teremthet arra, hogy a klímaváltozás kapcsán számos pontatlanság, találgatás hangozhasson el a különböző fórumokon, médiafelületeken. A spekulatív megközelítések könnyen eltorzíthatják az alapvetően laikus közvéleményt, így esetenként nagyfokú társadalmi bizalmatlanság és bizonytalanság, esetleg pánikhangulat, vagy épp az ellenkezője; – érdektelenség alakulhat ki egyes csoportok körében. A modellek önmagukban nem tudják kiküszöbölni a tévhitek terjedését, a rémhírszerű, vagy szenzációhajhász találgatásokat, az „új” elméleteken alapuló túlzó és szélsőséges következtetéseket és általánosításokat, vagy épp az olyan pontatlan megállapításokat, mint amelyet a szélsőséges időjárási események kapcsán egyesek deklarálnak (pl. a sarki jégsapkák gyors elolvadása, a Golf áramlat leállása, a Kárpát-medence hirtelen bekövetkező mediterránizálódása, vagy az alföldi tájak „elsivatagosodása”).

A modellek és azok megalkotóinak felelőssége tehát több szempontból is igen nagy. Mindamelllett, hogy a scénáriók megannyi bizonytalanságot hordoznak, a számítógépes technológia fejlődésével egyre alaposabban, egyre objektívebb keretek között lehet bemutatni a várható módosulások mértékét. A modellek folyamatosan tökéletesednek és egyre körültekintőbb képet adnak a jövőbeli változásokról. Ezzel együtt egyre bővül azoknak a mérhető és adatszerűen is nyomon követhető természeti és társadalmi jelenségeknek, tényezőknek a köre, amelyekkel a modellek részletgazdagabban képesek felvázolni a klímaváltozással összefüggő mechanizmusokat.

A társadalmi közösségek – döntéshozók és civilek egyaránt – egyre több és alaposabb információt szeretnének kapni a jövőbeli éghajlati változások várható hatásaival kapcsolatban. Ez az igény jogos és értelemszerű, hiszen a mindenki számára fontos, hogy az egyes nemzetek, települések és csoportok képesek legyenek fokozatosan felkészülni a környezetet alapvetően befolyásoló klímaváltozásra és az azzal járó kockázatokra. Ebben nyújtanak segítséget a korszerű éghajlati modellek, amelyek egyre jobban képesek reprezentálni a környezeti alrendszeret és a bennük zajló kölcsönhatásokat. A globális klímamodellek elsősorban zonális és kontinentális méretekben („nagyvonalúan”) demonstrálják a várható módosulásokat, míg a kisebb léptékű – országos, vagy akár táji részletességű – regionális, modellek, főként a térségek szintjén (a lakosság számára is hasznosítható konkrét előrejelzések szintjén) próbálják leírni és megbecsülni az adott környezetben várható klíma-hatások mértékét. A klímamodellezéssel foglalkozó kutatócsoportok munkája mindinkább lehetővé teszi, hogy egyre kézzelfoghatóbbá váljon számos vitatott kérdés. Így ma a várható tendenciák nagyjából mindenki előtt ismertek, de ez az ismeret még mindig sok tekintetben hiányos és bizonytalan. Sokak szerint a bizonytalanság nagyobb részt az emberi tényező kiszámíthatatlanságából ered, s ez arra enged következtetni, hogy: „Nemcsak a légkör, óceán, krioszféra és növényzet együttesének viselkedését kellene modelleznünk, hanem a társadalmi és gazdasági folyamatokat is, melyeknek résztvevői vagyunk, és a tetteinkkel folyamatosan manipulálunk.” (Hartmut 2008 in Czelnai 2009). Ez a megállapítás vetíti előre azt a feladatot, amelyet munkánk további részeiben mutatunk be.

Irodalom

Bartholy et al. (2012): Regionális klímamodellek adaptációja parametrizációs kísérletei a Kárpát-medence térségére in: *Légkör* 57. évf. 2012

Bartholy J., Pongrácz R. (szerk) (2013): *Klímaváltozás ELTE*
<http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/Klimavaltozas/index.html>

Christensen, J.H., Christensen, O.B. (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*, 81, pp. 7–30.

Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M., Amanatidis, G. (2007): Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change*, 81, pp. 1–6.

Czelnai R. (2009): <http://www.matud.iif.hu/2009/09feb/15.htm>

Dankers, R. – Hiederer, R., (2008): Extreme Temperatures and Precipitation in Europe: Analysis of a High-Resolution Climate Change Scenario. EUR 23291 EN. Office for Official Publications of the European Communities Luxembourg. 66 pp.

Diffenbaugh N. (2013): Climate change occurring 10 times faster than at any time in past 65 million years August 1, 2013 <http://news.stanford.edu/news/2013/august/climate-change-speed-080113.html>

Hay, L.E., Clark, M.P., Pagowski, M., Leavesley, G.H., Gutowski, W.J. (2006): One-way coupling of an atmospheric and a hydrologic model in Colorado. J. Hydrometeorology, 7, pp. 569–589.

Horányi et al (2008): Regionális klímamodellek és eredményeik alkalmazhatósága éghajlati hatásvizsgálatokra OMSZ <http://www.met.hu/doc/tevekenyseg/klimamodellezes/Corvinus-2008.09.26.pdf>

Kling G. W. The Global Carbon Cycle

http://www.globalchange.umich.edu/globalchange1/current/lectures/kling/carbon_cycle/temperature_2050.jpg

McGuffie, K., Henderson-Sellers A., 2005: A Climate Modelling Primer, 3rd Edition. Jon Wiley and Sons, United Kingdom, 296 pp.

Mika J Éghajlatváltozás, hatások, válaszadás Kempelen Farkas Hallgatói Információs Központ http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0038_foldrajz_MikaJanos-eghajlat-HU/ch01s05.html

Monckton C. (2015): Global temperature update: no warming for 18 years 5 months

<http://www.climatedepot.com/2015/05/05/global-warming-pause-expands-to-new-record-length-no-warming-for-18-years-5-months/>

Pieczka I. (2012): A Kárpát-medence térségére vonatkozó éghajlati scénáriók elemzése a PRECIS finom felbontású regionális klímamodell felhasználásával Doktori Értekezés (PhD) ELTE http://teo.elte.hu/minosites/ertekezes2012/pieczka_i.pdf

Práger T. (2011): A globális éghajlatmodellezés közelmúltja és jelene (1990-2010) in: Klímaváltozás 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére. Bartholy, Bozó, Haszpra (szerk) Bp. 2011 <http://nimbus.elte.hu/~klimakonyv/Klimavaltozas-2011.pdf>

Richardson LF. (1922). Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge University Press: Cambridge.

Shakhova N. et al. (2010): Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf in Science vol. 327 <http://www.sciencemag.org/content/by/year/2010#327>

Shakhova N. et al. (2014): Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf in: Nature Geoscience 7, 64–70 pp.

Spencer R. (2008): "Climate Confusion" How Global Warming Hysteria Leads to Bad Science, Pandering Politicians and Misguided Policies That Hurt the Poor. Encounter Books New York

Spencer R. (2010): The Great Global Warming Blunder: How Mother Nature Fooled the World's Top Climate Scientists Encounter Books New York

Spencer R. (2014): Time to push back against the global warming Nazis. <http://www.drroyspencer.com/2014/02/time-to-push-back-against-the-global-warming-nazis/>

Teichmann C. (2015): Downscaling of CMIP6 for regional climate modeling: experiences from CORDEX, , ScenarioMIP Workshop, IIASA, Austria,

http://klima.kvvm.hu/documents/31/tudom_nyos_alapokAR4.pdf

Szépszó G, (2013): A numerikus időjárási modellek felépítése: tér- és időskála, adatasszimiláció, diszkretizáció, parametrizációk, valószínűségi előrejelzések, éghajlati modellezés in: Alkalmazott számszerű előrejelzés numerikus időjárási és csatolt modellek a gyakorlatban Szerk. Gyöngyösi A Z, Weidinger T, 2013 ELTE Bp.

Szépszó G, (2014): A REMO regionális éghajlati modellen alapuló klímadinamikai vizsgálatok a Kárpát-medence éghajlatának jellemzésére PhD értekezés ELTE Bp.

Medimorec S. – Pennycook G. (2015): The language of denial: text analysis reveals differences in language use between climate change proponents and skeptics Climatic Change pp 1-9 online: 30 August 2015

Zsebeházi G. (2011): Magyarország éghajlatának jellemzése az ENSEMBLES projektbeli és a hazai regionális modelleredmények együttes vizsgálatával Bp ELTE Földtudományi Intézet Meteorológiai Tanszék szakdolgozat 2011. http://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/BSc/2011/ZsebehaziGabriella_2011.pdf