A klímamodellezés nemzetközi eredményei

Kovács András Donát

Bevezetés

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 21. században számos globális és regionális hatással kell majd számolni.

A klímaváltozásra vonatkozó kijelentések jelentős részükben olyan, jövőre vonatkozó modellprojekciók alapján valószínűsíthetők, amelyek szimulálják a 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 modellszimulációk jelentősége tehát nem csupán a tudományos ismeretek végett, hanem a társadalmi paradigmák, a környezettudatosság szempontjából is nagy.

Jelen fejezetben röviden összegezzük az éghajlati modellek legfőbb típusait és eredményeit. Természetesen mindezt a teljesség igénye nélkül, hiszen az előzmények és források sokasága nem teszi lehetővé a témakör mindenre kiterjedő és részletekbe bocsátkozó feldolgozását.

Alapvető célkitűzésünk 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 csökkent-

hetik 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.

Áttekintésünket elsősorban hazai szerzők (többek között Bartholy, Bozó, Haszpra, Mika, Pieczka, Pongárcz, Práger, Szépszó) korábbi munkái alapján állítottuk össze, így a külföldi szakirodalom egy részét is közvetett módon hivatkozzuk. Emellett 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 történeti áttekintése

A globális klímamodellek evolúciója

A 20. század során a földi légkörről alkotott ismeretek jelentősen kibővültek, így a 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 továbbhangolták, a technológia pedig rohamléptekben fejlődött. Fontos mérföldkövet jelentett az ENSZ égisze alatt megalakult 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, az 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 a többszörösen összetett légköri-óceáni modellek összekapcsolása során megkezdődött a légkör-óceán általános cirkulációs modellek (Atmosphere-Ocean General Circulation Model) globális szintű átfogó összehasonlítása (Coupled Model Intercomparison Program, CMIP). A CMIP módszertanával lehetőség nyílt a modellek validálására, a klímaszcenáriók összevetésére. Az általános légkörzést és a világóceán általános vízkörzését szimuláló modellek felbontása, pontossága, komplexitása egyre javult, míg a számtalan modellvariációs lehetőség végül a 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. Széles körű mechanizmusok leírására 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 számítógépes technológiát igénylik. A rendelkezésre álló hardver- és szoftverkapacitás 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 (Reichler, Kim 2008).

A modern globális éghajlatmodellek

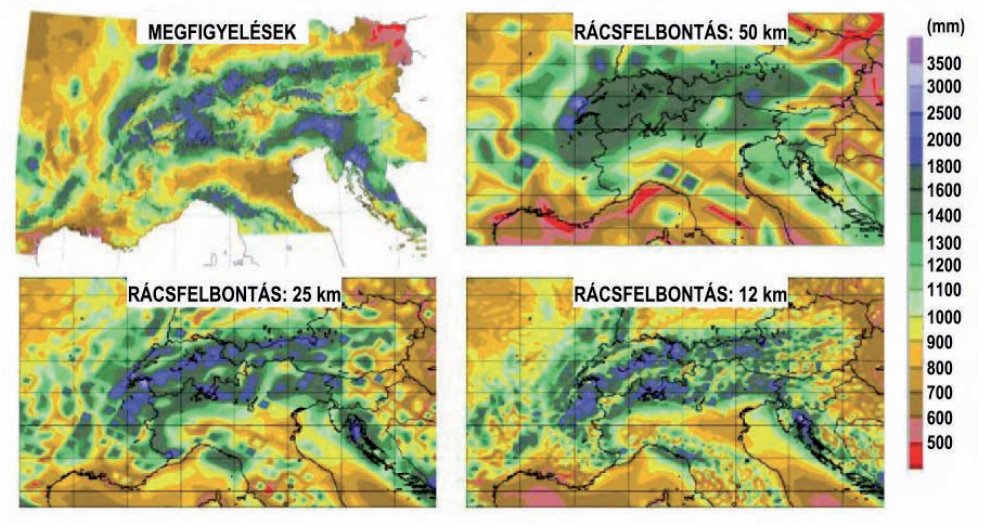
A korszerű klímamodellek általában részmodellekből állnak, amelyek az éghajlati rendszer egy-egy alrendszerét írják le. A légköri folyamatokat leíró általános cirkulációs modellek (Atmospheric Global Circulation Model, AGCM) a háromdimenziós térben zajló légköri mozgásokat írják le a hőmérséklet, csapadék, 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 állapothatározó-mezőket többszintű rácshálózat pontjaiban adják meg. Mivel a teljes légkör csupán vékony rétegnek tekinthető, ezért a vertikális rácstávolságok általában két nagyságrenddel kisebbek (~0,1–1 km), mint a horizontális távok (~10–100 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 koordinátarendszerben, a rácshálózat geometriájában és felbontásában. Ma már minden modellben felszínkövető koordinátarendszert alkalmaznak, amelyben a földfelszín koordinátafelület (Kim, Lee 2003). A globálisan összehangolt modellezéssel párhuzamosan az elmúlt évtizedekben kiterjedt mérési programokat indítottak a parametrizációk tesztelésére és javítására. Ide tartozik a mezoskálájú alpesi program (Mesoscale Alpine Program, MAP) 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 területe(ke)n 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, amikor térben nagyon változékony a csapadék vagy erősen tagolt a domborzat. Ilyen finom felbontású modelleket főként 20-30 éves időtávlatra készítenek (1. ábra) (Christensen et al. 2007).

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



Forrás: Christensen et al. 2005 nyomán Bartholy, Pongrácz 2013.

A világóceán vízkörzési modelljei (óceáni általános cirkulációs modell – 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 koordinátarendszer a leggyakrabban hagyományos felszínkövető rendszer, vagy izopiknikus (azonos sűrűségű) felületek által kijelölt koordinátarendszer. 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).

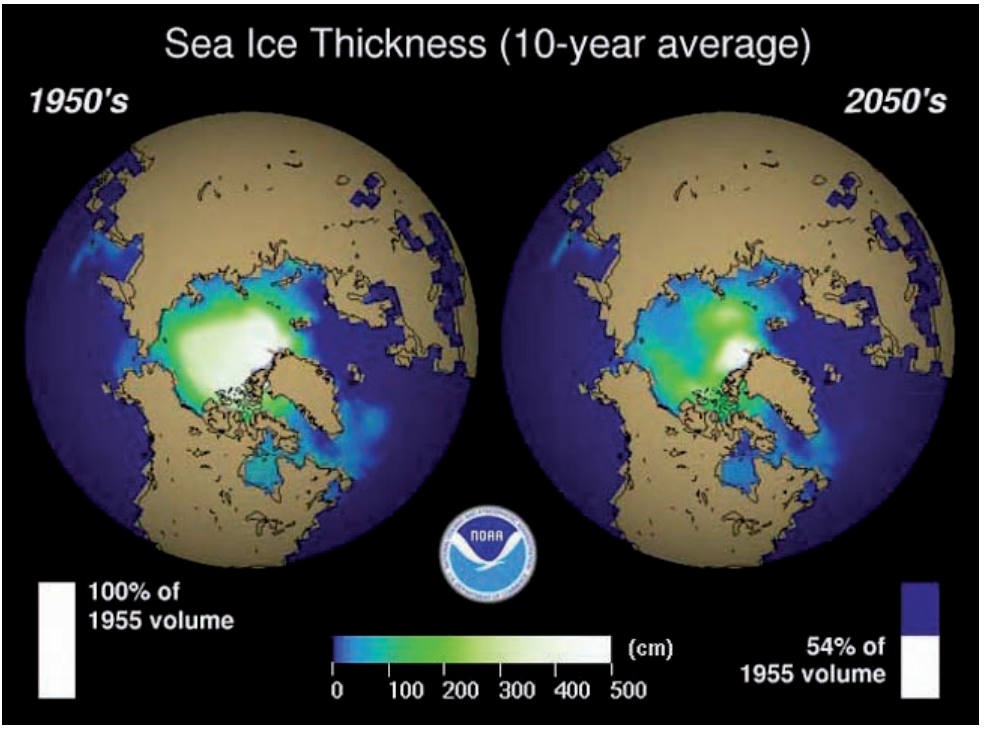
A csatolt éghajlati modellekben az OGCM-ek az AGCM-ekhez hasonlóan a teljes összecsatolt modellnek csak egy részmodulját alkotják. A csatolásokat a légkör és az óceán közötti impulzus-, hő- és vízgőzáramok, valamint az óceán és a tengeri jég közötti hőáramok és a sókoncentráció kiegyenlítődése jelentik. Az OGCM-ekben számos közelítés látott napvilágot, 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 hatásáról a modelleredmények mutatnak. A szállítórendszerek, az árapály, a napsugárzás és az óceánok édesvízbevétele mellett számos olyan bizonytalansági tényező is van, amelyeket az eddigi modellek csak érintőlegesen tudtak bemutatni. Mára önálló modellezési részterületté vált a csatolt légkör-óceán-tengerijég-modellek létrehozása, amelyekben egyelőre szintén számos bizonytalanság van (Práger 2011).

A földfelszín- és felszínréteg-modellek – legyen szó akár szárazföldi, akár tengerfelszínről – az éghajlati rendszer kölcsönhatásainak valószínűleg legjelentősebb és legösszetettebb csoportját képviselik; 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 szénciklus; szenzibilis és látens hőáram; hórétegvastagság; hófúvás, hótakaró; permafroszt-modellezés; jégmodellek). Az elmúlt évtizedben a felszínmodellek összehangolását többen is megkísérelték, de a meglehetősen bonyolult bioszféra-almodelleket a legtöbb modellbe még nem építették be, mert ezekhez nagy számú 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 tengerijégmodellek 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 10–10 000 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 határozza meg. A sarkvidékekre készült 2050-ig kitekintő becslések többsége a poláris jégsapkák drasztikus csökkenését prognosztizálja (2. ábra).

2. ábra: Az északi sarki tengeri jég csökkenése 100 év alatt (cm)



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, így 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. 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 emissziószcenáriók, 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. Ezek a modellek nagyságrenddel kisebb hardverigénnyel bírnak, így számos különböző szcenárió kiszámítására alkalmasak. A bizonytalanságok a nagyszámú futtatás alapján jól számszerűsíthetők, mivel lehetőséget adnak az éghajlatváltozás 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. 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 kisebb térskálákon kevésbé megbízhatóak, térbeli felbontásuk fokozatosan javul, így egyre inkább alkalmassá válnak az éghajlatváltozás finomabb sajátosságainak, mint például az extrém időjárási jelenségekben bekövetkező változásoknak az elemzésére.

A klímamodell-alapú szcenáriókban az emberi tevékenységekkel összefüggő fizikai törvényszerűségek be vannak építve az alkalmazott modellbe, ahol a legfontosabb input az üvegházhatású gázok koncentrációjának jövőbeli változása. Az 1990-es évek végén több mint 400 forgatókönyv létezett, de ezek lényegében négy lehetséges fejlődési jövőkép felvázolására épültek. Az IPCC-jelentések (pl. 2001-es, 2007-es) ajánlásai alapján ezeket a forgatókönyveket továbbfejlesztették. A négy jövőkép, illetve szcenáriópár (A1, B1 és A2, B2) közös nevezője, hogy mindegyik a 2100-ig tartó folyamatos gazdasági növekedésre épül. Az A1 szcenárión belül 3 alszcenárió létezik. Az IPCC ún. SRES-forgatókönyvei és forgatókönyv-családjai (Special Report on Emission Scenarios) az antropogén kibocsátás következtében várható CO_2-koncentrációváltozásokat adja meg a globális klímamodellekben (IPCC 2001, 2007).

Az A1 és A2 forgatókönyv a gyors gazdasági növekedést, míg a B1 és B2 forgatókönyv a lassúbb, környezettudatosabb növekedést prognosztizálja. Az egyes szcenáriók jellemzőik a következők (Haszpra 2011):

- A1 (legpesszimistább forgatókönyv): nagyon gyors gazdasági növekedés, a népesség növekedése a 21. század közepéig tart, majd utána csökken, az új és hatékony technológiák gyorsan elterjednek, az egyes régiók között csökkennek a fejlettségi és jövedelmi különbségek, a társadalmi és kulturális hatások fokozottan érvényesülnek majd. Alszcenáriói:
  - A1FI: a fosszilis energiahordozók intenzív felhasználása jellemzi,
  - A1T: a megújuló energiaforrások elterjedése jellemzi,
  - A1B: a fosszilis és megújuló energiaforrások kiegyenlített használata jellemzi.
- A2 forgatókönyv: folyamatosan növekvő népesség, lassúbb gazdasági növekedés, a gazdasági növekedés térben differenciált, a technológiai változások lassabban jelennek meg és a térben nem egyenletesen, jelentős különbségek a régiók között, heterogén világkép, helyi önkormányzatok és önszerveződések hangsúlyosabb működése.
- B1 (legoptimistább forgatókönyv): a népesség növekedése a 21. század közepéig tart, majd csökken, a globális egyenlőtlenségek kiegyenlítődnek, a szolgáltatási és információs ágazatok túlsúlya a gazdasági szerkezetben, környezetbarát és energiahatékony technológiák bevezetése, globális megoldások a társadalmi, gazdasági és környezeti problémákra.
- B2 forgatókönyv: társadalmi, gazdasági és környezeti problémák lokális szintű kezelése, folyamatosan lassuló globális népességnövekedés, közepes mértékű gazdasági fejlődés, lassúbb folyamatok térben differenciált megjelenése.

A kibocsátási forgatókönyvek legnagyobb korlátja, hogy 50-100 évre előre nem ismerik az üvegházhatású gázok emissziójának és -koncentrációjának pontos értékeit. A regionális klímamodellek (pl. a hazánkban is futtatott ALADIN, PRECIS, RegCM, REMO) általában három forgatókönyvet vesznek figyelembe: B2 optimista; A2 peszszimista; A1B középértékes (Nakicenovic et al. 2000).

Az IPCC 2012-es ajánlásában a jövőbeli forgatókönyvek az üvegházhatású gázok koncentrációjának időbeli menetét veszik alapnak. Ezek az RCP-típusú forgatókönyvek (RCP = Representative Concentration Pathways), amelyek a koncentrációnövekedésből eredő sugárzási kényszer változására utalnak, egyben alkalmasak 2100-ig, illetve 2300-ig projekciók létrehozására (IPCC 2012): RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 szcenáriók. Az egyes RCP-forgatókönyvek megadják, hogy adott forgatókönyv szerint 2100-ra milyen mértékű sugárzási kényszerbeli változás várható W/m^2 egységben kifejezve. Ebből kiindulva a SRES-szcenáriókat kiterjesztették: SRES B1 = RCP4.5; SRES A2 = RCP8.5. Az IPCC legutóbbi jelentése (IPCC 5th Report, 2014) már csak az RCP forgatókönyveket használja: RCP 8.5; RCP 6.0; RCP 4.5; RCP 2.6 (ipcc.ch/report/ar5/wg2/).

Részben a klímaváltozás következményeire, részben a környezeti állapot alakulására vonatkozó előrejelzések meghatározó csoportját alkotják az UNEP-kiadványok (GEO-1, GEO-2, GEO-3, GEO-4 jelentések) (unep.org/geo/geo5.asp). Ezek a jelentések

lényegében globális és regionális társadalmi-gazdasági forgatókönyvek, amelyek a termelés, fogyasztás, erőforrás-gazdálkodás környezeti szempontú hatáselemzésére épülnek, és általában 2020-ig, 2050-ig, részben 2100-ig adnak meg lehetséges forgatókönyveket (Pomázi, Szabó 2006). A legutóbbi 2012-es GEO-4 jelentés négy forgatókönyvet adott meg 2050-ig terjedő kitekintéssel, lényegében a GEO-3 és GEO-4 jelentésekben használt forgatókönyveket alapul véve (Vág 2011):

1. forgatókönyv: a piac prioritására épülő szcenárió – a piac mindenható globális szerepét hangsúlyozza, és kiemeli, hogy a fejlődő országok is az iparilag fejlett országok fejlődési pályáját járják be a jövőben.
2. forgatókönyv: a politika prioritására épülő szcenárió – lényege, hogy a szociális és környezeti célok elérése érdekében a nemzeti kormányok hozzák meg a legfőbb döntéseket.
3. forgatókönyv: a biztonság prioritására épülő szcenárió – azzal számol, hogy a jövőben a problémák fokozódásával párhuzamosan a hatalmon lévők és a gazdasági elit biztonságuk és önvédelmük érdekében fokozotosan elszigetelődnek.
4. forgatókönyv: a fenntarthatóság prioritására épülő szcenárió – a fenntarthatóság kihívásaira környezeti és fejlesztési paradigmaváltás a válasz, amely megteremti a lehetőséget új értékrendszer és intézmények létrehozásához.

A négyféle forgatókönyvet a következő mozgatóerők változására építette a jelentés: intézményi és társadalmi-politikai keretek, demográfia, gazdasági kereslet, piacok és kereskedelem, tudományos és technológiai innovációk, értékrendszerek (Vág 2011).

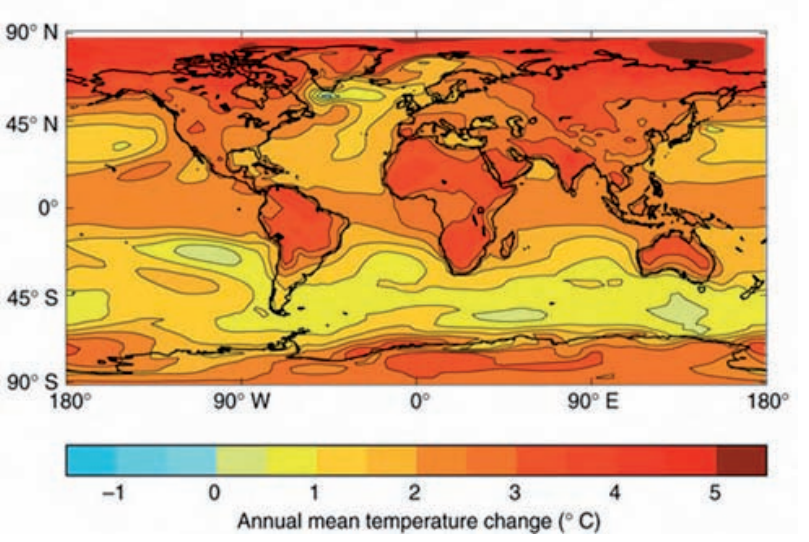
A GEO-4 jelentés módszertanának és tapasztalatainak felhasználásával szubregionális forgatókönyvek születtek 2007-ben. Ezek közül az egyik a Kárpátok térségére vázol fel három lehetséges forgatókönyvet 2020-ig (Pomázi, Szabó 2008; Vág 2011):az UNEP GEO-4 és GEO-5 jelentésből a politikai, a piaci és a fenntarthatósági prioritásokra épülő forgatókönyvek kárpáti térségre vonatkoztatható elemeit tartalmazza.

A nemzetközi partnerséget igénylő összehangolt globális klímaszimulációk elvégzésére jó példa a CMIP38 (Meehl et al. 2007) illetve a CMIP59 projekt, melyekben a legfontosabb (SRES illetve RCP) szcenáriókkal és a lehető legtöbb globális modellel hajtottak végre kísérleteket.

Az üvegházhatású gázok kibocsátásának mértékét befolyásoló forgatókönyvekre épülő éghajlati modellek előrejelzései szerint a globális földfelszíni átlaghőmérséklet 1,1-6,4 Celsius-fokkal fog növekedni az 1990-től 2100-ig tartó időszakban (3. ábra).

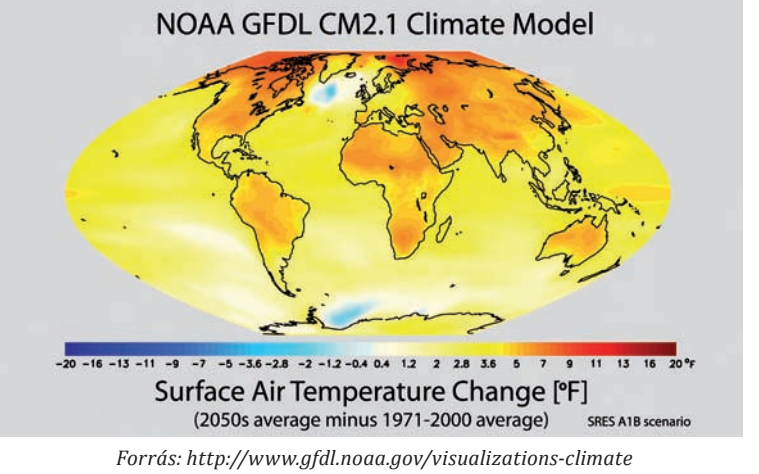
A globális modellek jelentős része a 2050–2100 időszakra próbál jövőképeket felvázolni. A hőmérséklet- és csapadékváltozással összefüggő legfőbb eredmények az átlagos évi középhőmérséklet növekedését és a csapadékeloszlások megváltozását vetítik előre (4. és 5. ábra).

3. ábra: A CO_2 ~1%/év emelkedésével számolt globális évi középhőmérséklet-változás 2050-re (°C)



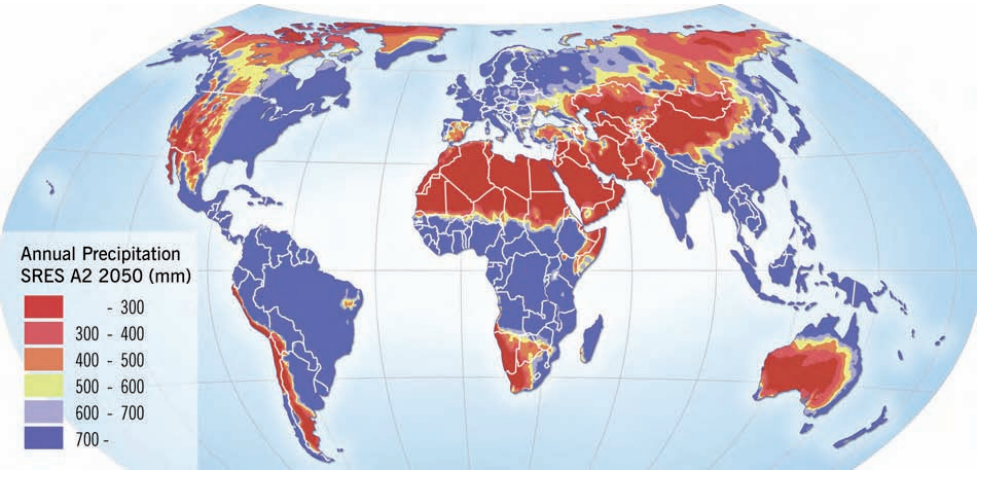
Forrás: http://www.gfdl.noaa.gov/visualizations-climate

4. 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: http://www.gfdl.noaa.gov/visualizations-climate

5. ábra: Az évi csapadékmennyiség projekciója 2050-re (SRES A2)

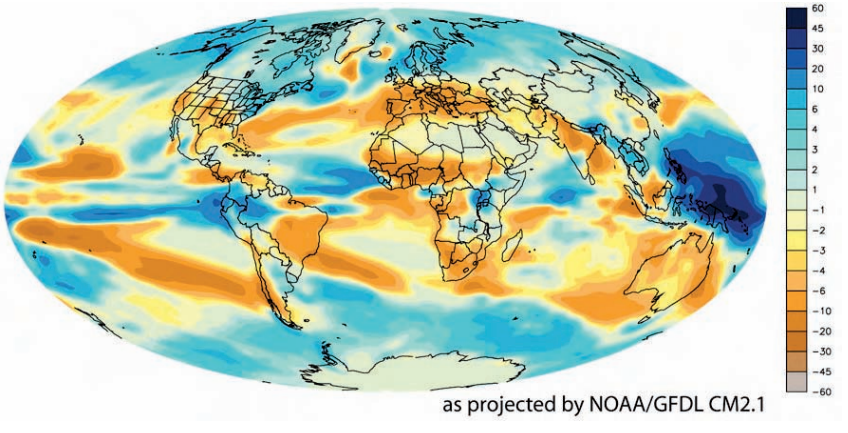


Forrás: https://nordpil.com/portfolio/mapsgraphics/precipitation-2050/

„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 é.n.).

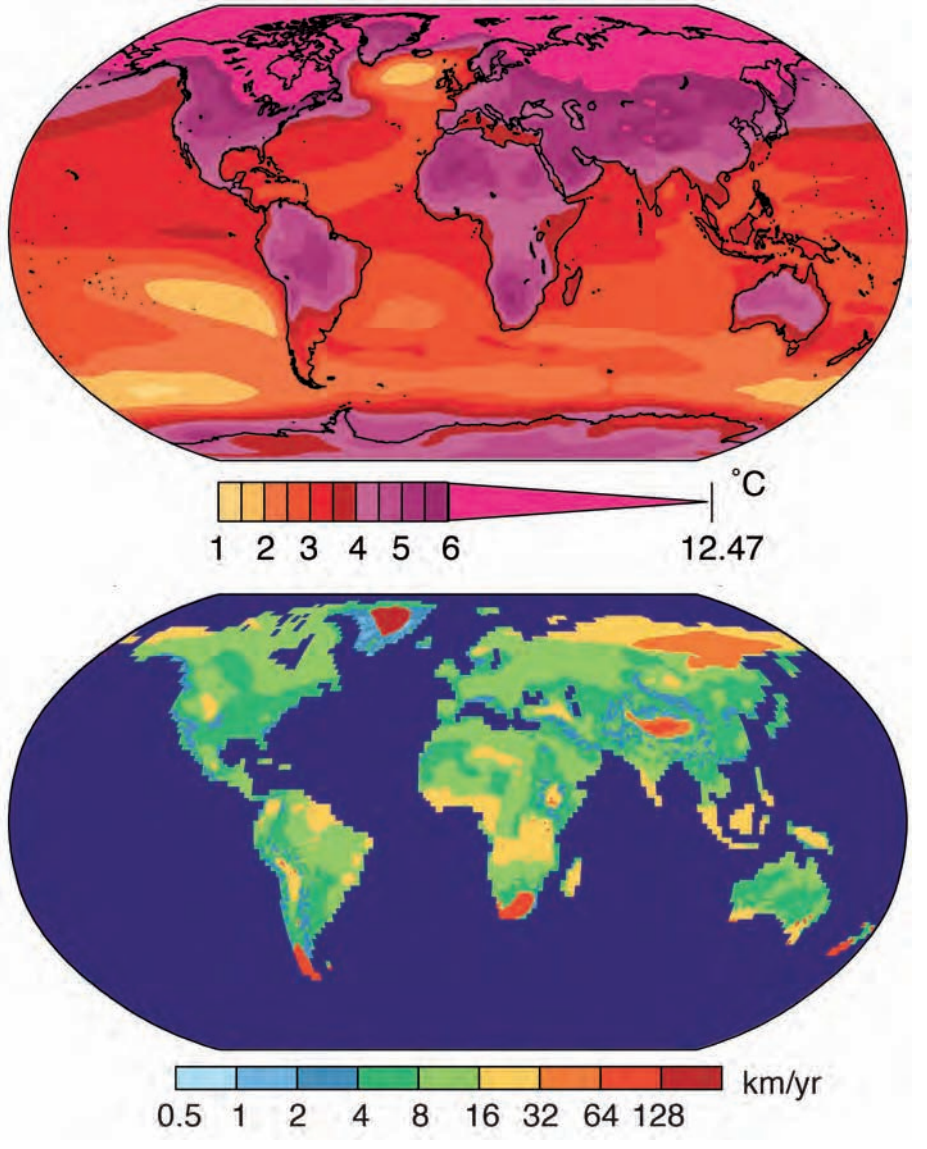
Miután a modellek egy része leképezhető korábbi földtörténeti időszakokra és a közelebbi múltra is, így hosszabb történeti szakaszok áttekintésére is lehetőség nyílik, amivel a jövőbeni változások intenzitása megbecsülhető. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a mostani felmelegedés a korábbiaknál intenzívebb mértékben zajlik (6. és 7. ábrák).

6. ábra: A csapadék mennyiségi változása a 21. század végéig (inch/év)



Forrás: http://www.noaanews.noaa.gov/stories2007/s2787.htm

7. ábra: Az évi középhőmérséklet növekedése a 21. század végi projektált értékek és a jelenlegi értékek különbségéből számolva, 21 különböző modell összevetésével (fent); az egyes fajok vándorlási igénye km/év-ben kifejezve, hogy elérjék a számukra megfelelő élőhelyi körülményeket a 21.század végéig (lent)



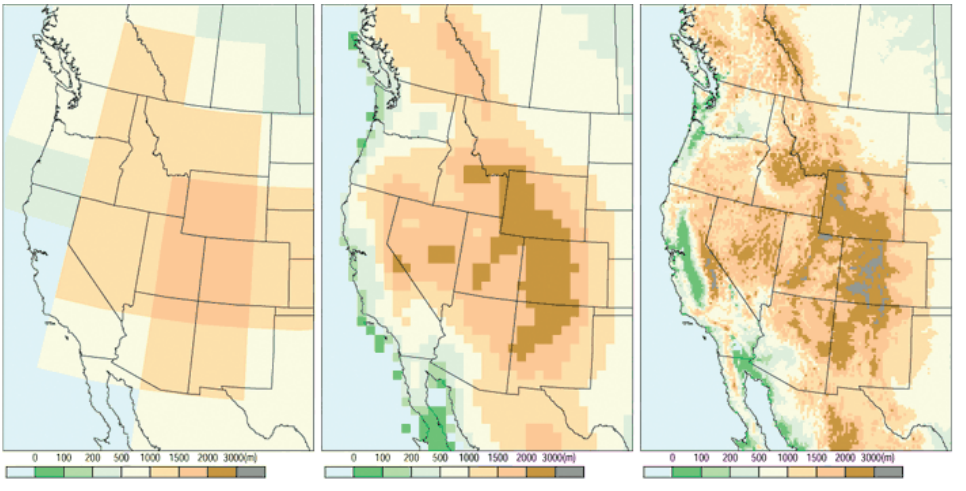
Forrás: Diffenbaugh, Field 2013.

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 korlátos tartományú modellek is futtathatók, melyek felbontása akár 10-15 km is lehet, s ez lehetővé teszi kisebb térségek pontosabb éghajlati változásainak leírását (8. ábra).

8. ábra: A topografikus felbontás különbségei globális és regionális modellezéssel a Sziklás-hegység példáján



Megjegyzés: A= GENESIS AGCM; B=RegCM; C=ETOPO 15 km-es felbontás. Forrás: Thompson et al. 1998.

A regionális klímamodellezés a meteorológia dinamikusan fejlődő részterülete. A korlátos tartományú modellek klímamodellezési célokra való felhasználását az 1980-as évek végén kezdték meg. Ekkorra a globális klímamodellezés már több évtizedes múltra tekintett vissza, azonban a földi vagy kontinentális megközelítésű modellek 300-500 km-es felbontása nem tette lehetővé részletesebb előrejelzések készítését. A kutatók közül egyesek felvetették, hogy az időjárás előrejelzésében alkalmazott korlátos tartományú modellek – melyeket addig csak néhány órás, néhány napos időszakra készítettek – alkalmazhatók lennének komplexebb és hosszabb távú éghajlati változások vizsgálatára. A kutatások azt bizonyították, hogy a korlátos tartományú modellek alkalmazásai – bizonyos módosításokat követően és a megfelelő peremfeltételek beépítésével – az éghajlati skálára is kiterjeszthetők. „A rövid távú 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" (Pieczka 2012).

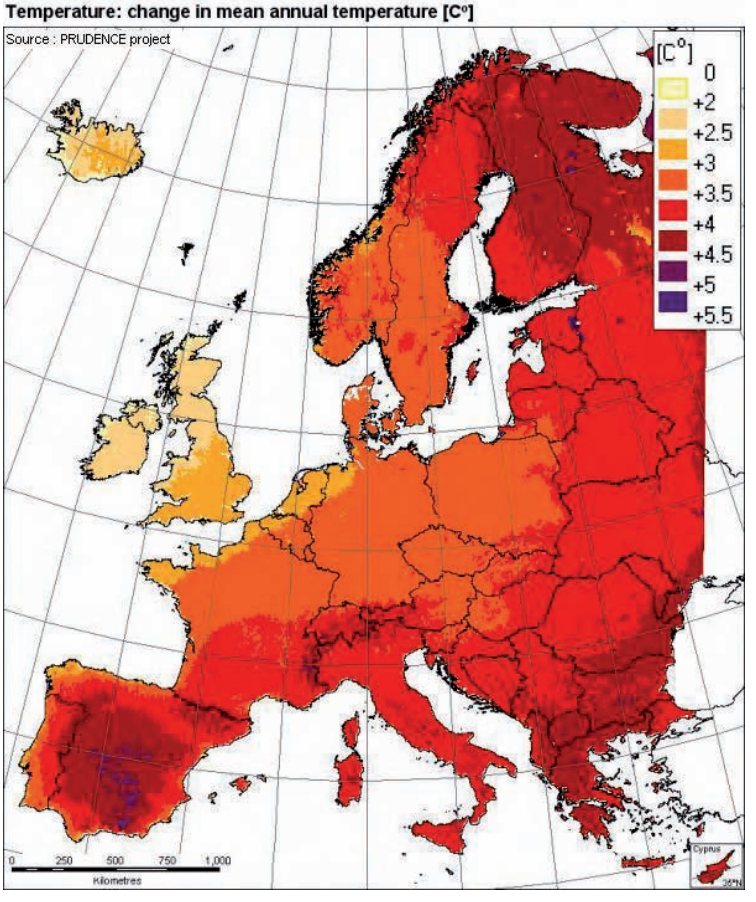
A regionális klímamodellek (RCM-ek) alapját globális klímamodellek finomításai, valamint elemzései adják. Ezek kidolgozása a globális modelleknél is nehezebb. A különböző dimenzióban lévő modellek között rendszerint egyirányú csatolást al-

kalmaznak, vagyis elviekben a regionális modell által leírt éghajlati folyamatok nem hatnak vissza a globális modellre. A csatolás alapvető feltételezése szerint a globális modell (bizonyos határokon belül) a földi méretű folyamatok mellett képes leírni a nagy skálájú globális éghajlati tényezők regionális vetületeinek egy részét, míg a regionális modell csak a globális modell 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, felhőkonvekció, felszíni folyamatok). A regionális klímamodellek folyamatosan fejlődnek: a horizontális és vertikális felbontás nő, a fizikai parametrizációk fejlődnek és csatolt modellrendszereket hoznak létre (Pieczka 2012).

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 értelemben 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 az 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 Mediterráneum térsége. E bizonytalanságok csökkentése érdekében több olyan modellkísérlet zajlott és zajlik, amely az adott térségek szintjén megpróbálja pontosítani a jövőbeli hatásokat. A regionális dimenzióra koncentráló projektek hasznosításának komoly korlátja, hogy a regionális modellszimulációk eredményei számottevően eltérhetnek 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 a jelentősebb európai klímamodellprojektek, amelyek projekcióikat több eltérő területi szintű modell futtatásával, különböző kibocsátási forgatókönyvek és bizonytalansági tényezők figyelembevételével valósították meg.

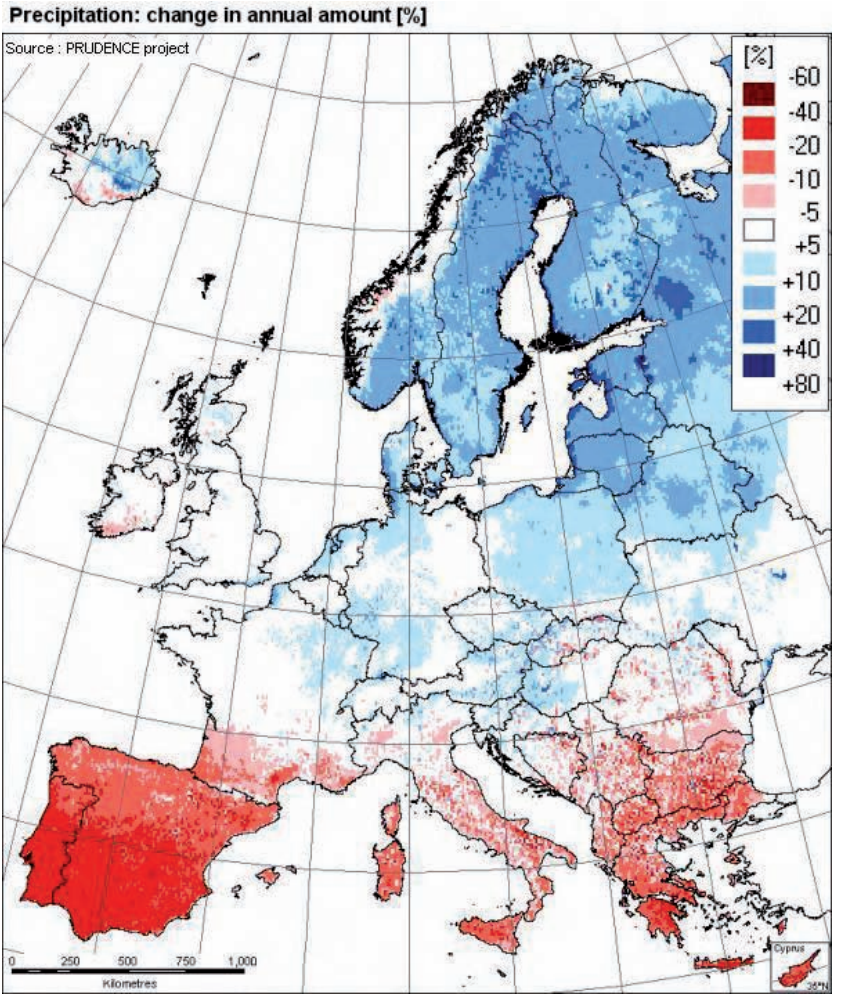
A PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects – Christensen et al. 2007) során nagy felbontású éghajlatváltozási forgatókönyveket dolgoztak ki, amely közel egy évszázadra előre írja le Európa különböző térségeinek éghajlati változásait, a pesszimistább A2 és az optimistább B2 kibocsátási forgatókönyvek alapján (9. és 10. ábra) (Zsebeházi 2011).

9. ábra: Az évi átlagos középhőmérséklet lehetséges változása 2071–2100 között az 1961–1990-es periódushoz viszonyítva, az IPCC SRES A2. szcenárió alapján, a HadCM3 globális cirkulációs modell és a HIRHAM 12km-es felbontású regionális modell felhasználásával



Forrás: PRUDENCE.

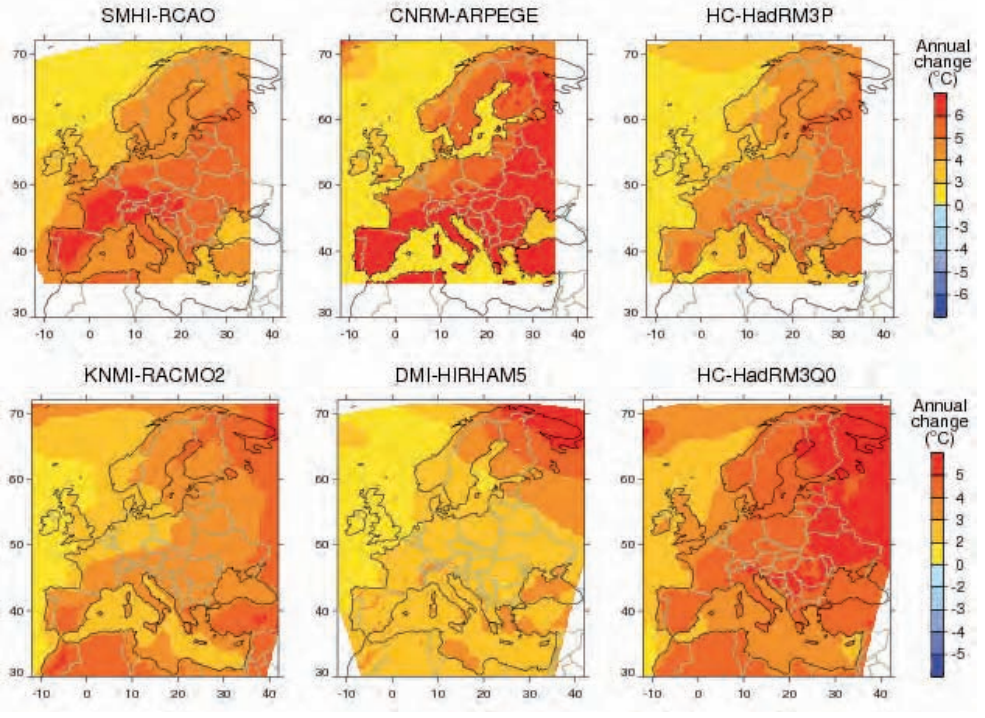
10. ábra: Az évi átlagos lehulló csapadékmennyiség lehetséges változása 2071–2100 között az 1961–1990-es periódushoz viszonyítva, az IPCC SRES A2 szcenárió alapján, a HadCM3 globális cirkulációs modell és a HIRHAM 12km-es felbontású regionális modell felhasználásával



Forrás: PRUDENCE.

Az ENSEMBLES során konkrét módszereket dolgoztak ki a modelleredmények együttes vizsgálatára. Nagy felbontású, európai globális és regionális modelleket alkalmaztak, a modelleredményeket validálták és Európát lefedő rácsponti megfigyelési adatbázist hoztak létre. 25 km-es horizontális felbontásban öt globális modell szolgáltatta a kezdeti és határfeltételeket. Összesen 25 szimulációt végeztek, az átlagosnak tekinthető A1B szcenárióval. Ezek közül az ALADIN; REMO; RegCM hazai adaptációjára is sor került (11. ábra).

11. 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) szimulációi alapján



Forrás: http://www.cru.uea.ac.uk/projects/ecochange/climatedata/desc

A 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 északkeleti, 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" (Mika é.n.).

A kontinentális projekteket összefogó, 2009-ben induló CORDEX projekt az egész Földre (korábban kevésbé kutatott térségekre, mint pl. Afrika) kiterjedő regionális éghajlati leskálázást valósít meg, alapvetően 50 km-es grid segítségével, de ennél kisebb, akár 10 km-es felbontásokkal is kísérletezve. A több nagyrégióra fókuszáló finom felbontású modellezésben – a megfelelő összehasonlítás érdekében – a tervezett szimulációk mindegyikére egységes követelmények vonatkoznak (Jacob et al. 2013; Teichmann 2015). A nemzetközi projektek mellett számos kutatóintézet és kutatócsoport végez regionális modellkísérleteket és vizsgálja a klímaváltozás lehetséges hatásait. Ennek eredményeként bővülnek azok a projekciók, amelyek alapján jobban körvonalazható a jövő.

Konklúziók – a klímamodellezés legfőbb nehézségei

Az éghajlati szimulációk bizonytalanságai

A globális és regionális éghajlati modellek előrejelzései számos kérdéses tényezőt rejtenek magukban, ugyanakkor a bizonytalanság vizsgálata segít a becslésekhez képest várható „kilengéseinek" számszerűsítésében. A legfontosabb bizonytalansági tényező az éghajlati rendszerek evolúciója: már az éghajlatváltozás fogalmának definiálása sem egyszerű, ugyanis az éghajlati rendszernek egyik fontos jellemzője, hogy minden külső kényszer nélkül is képes időről időre jelentősen megváltozni. A változás iránya előre nem látható, és az sem tudható, hogy rövidebb vagy hosszabb ideig tart. Mivel az éghajlati rendszerek újabb egyensúlyi állapot felé tartanak, lényegében nincs átlagosnak tekinthető egyensúlyi állapotuk. Ezt a változékonyságot tapasztaljuk például akkor, amikor egy csapadék szempontjából nem rendkívüli időszakot néhány, a szokásosnál jóval szárazabb vagy nedvesebb év követ. 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. A klimatikus modellek megalkotása mégis nagy nehézségekbe ütközik, hiszen a közép- és hosszú távú alkalmazhatóság igénye miatt nincs „garancia" arra nézve, hogy a múlt éghajlatát jól leíró modell megbízható képet ad 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 közelítik, ezért az eredmények 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 között igen komoly bizonytalansági tényező az emberi civilizáció jelenléte. Miután az antropogén tevékenységek alakulásáról és pontos irányáról csak elképzelések vannak, a jövőbeli hatásokról is csak feltételezések lehetnek. Az alternatívák külső kényszerként számszerűsíthetők, így az adott modell az éghajlati rendszer egészének válaszát szimulálja a feltételezett külső kényszerre. Tehát az emberi tevékenységek változása és hatása éghajlati modellek segítségével vizsgálható. Az elmúlt évtized antropogén hatásainak tapasztalatai szükségessé tették a jelenleg használatban lévő SRES szcenáriók felülvizsgálatát, amelynek eredményeképpen megszülettek az RCP projekciók (Moss et al. 2010).

Összetettség és az ebből fakadó dilemmák

A tudományos és szakpolitikai diskurzusokban – mint ahogyan a közvélekedésben is – a klímaváltozást erőteljes dilemmák és nézetkülönbségek övezik (erről lásd pl. jelen kötetben Baranyai, Varjú 2015). Ennek elsődleges oka, hogy a változások előrejelzése még kvantitatív módszerek alkalmazásával sem tökéletes, hiszen a globális

környezeti rendszerben lezajló folyamatokat az atmoszféra, hidroszféra, litoszféra, krioszféra és bioszféra többszörösen összetett kölcsönhatásai jellemzik.

Az éghajlati rendszer tényezői és mozgatóerői – a teljes földi környezeti rendszerbe ágyazódva – 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 jelentősen befolyásolhatja a globális felmelegedést, megváltoztathatja a klímamodellek korábbi becsléseit (Shakhova et al. 2014).

A természeti tényezők mellett az antropogén változások értelmezése és azok mértékének kiszámítása ugyancsak nehéz feladat. A mai álláspontok szerint az emberi tényezők által előidézett változások jelentősen befolyásolhatják a természetes ingadozások mértékét, így e faktorok vitás kérdéseket vetnek fel az előrebecslések során. Az antropogén hatások számszerűsítésekor a legtöbb modell a szén-dioxid-koncentráció monoton növekedését mutatja be, 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) az IPCC és a NIPCC közötti sajátos vitát elemzik és annak hatását a klímaváltozással kapcsolatos felfogás alakulására. Tény, hogy az utóbbi néhány évben a klímaszkeptikusok egyre inkább bekapcsolódnak a diskurzusba. Egyre többen azt vallják a globális hőmérséklet változásával kapcsolatban, hogy az 1970-es, 1980-as évekbeli modellszerű becslések többsége jóval magasabb hőmérsékletemelkedést jelzett előre, mint amekkora valójában bekövetkezett. Vagyis az ellenőrzések nyomán kiderült, 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 21. századra).

Többen – így pl. az Alabamai Huntsville Egyetem klímakutatói is – úgy vélik, hogy a korábbi projekciók alapján egyértelmű a modellek kudarca, hiszen sem a troposzferikus, sem a felszíni hőmérsékleti adatok nem mutatják a korábban számított erőteljesebb változásokat (Monckton 2015; Spencer 2008; 2010; 2014). 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.

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 befolyásolhatják az alapvetően laikus közvéleményt, így esetenként 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 mediterranizálódása, vagy az alföldi tájak „elsivatagosodása").

A modellek és azok megalkotóinak felelőssége tehát több szempontból is igen nagy. Mindamellett, hogy a szcenáriók megannyi bizonytalanságot hordoznak, a számítógépes technológia fejlődésével egyre alaposabban lehet bemutatni a várható módosulások mértékét. A modellek folyamatosan tökéletesednek és egyre körültekintőbb képet adnak a jövőbeli változásokról. Ezzel együtt 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 hatásairól. Ez az igény jogos és értelemszerű, hiszen 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 alrendszereket 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 a lakosság számára is hasznosítható konkrét előrejelzések szintjén próbálják leírni és megbecsülni az adott környezetben várható klímahatások mértékét. A klímamodellezéssel foglalkozó kutatócsoportok munkája mindinkább lehetővé teszi, hogy 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 nagyobbrészt 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" (Czelnai 2009).

Irodalom

Ackerman, T. P., Stokes, G.M. (2003): The Atmospheric Radiation Measurement Program. *Physics Today,* 1., 39–44.

Bader, D. C., Covey, W. J., Gutkowski, Jr., Held, I. M., Kunkel, K. E., Miller, R. L., Tokmakian, R. T., Zhang, M. H. (2008): *Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations.* U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 3.1. Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research

Baranyai N., Varjú V. (2015): *A lakosság klímaváltozással kapcsolatos attitűdjének empirikus vizsgálata.* Jelen kötetben.

Bartholy J., Pongrácz R. (szerk.) (2013): *Klímaváltozás*. ELTE, Budapest http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/Klimavaltozas/index.html (Letöltés: 2015. november 29.)

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,* Suppl. 1., 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,* Suppl. 1., 1–6.

Czelnai R. (2009): Válasz Reményi Károly észrevételeire. *Magyar Tudomány,* február. http://www.matud.iif.hu/2009/09feb/15.htm (Letöltés: 2015. november 29.)

Diffenbaugh, N. S., Field, C. B. (2013): Changes in Ecologically Critical Terrestrial Climate Conditions. *Science,* 6145., 486–492.

Haszpra L. (2011): Emisszió szcenáriók. In: Bartholy J., Bozó L., Haszpra L. (szerk.) (2011): *Klímaváltozás – 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére.* MTA, ELTE, Budapest, 92–98. http://nimbus.elte.hu/~klimakonyv/Klimavaltozas-2011.pdf (Letöltés: 2015. május 29.)

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. *Journal of Hydrometeorology,* 4., 569–589.

Jacob, D. et al. (2013): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change,* 2., 563–578.

McGuffie, K., Henderson-Sellers A. (2005): *A Climate Modelling Primer.* 3rd Edition. John Wiley and Sons, Chichester

Medimorec, S., Pennycook, G. (2015): The language of denial: text analysis reveals differences in language use between climate change proponents and skeptics. *Climatic Change,* 4., 597–605.

Meehl, G. A. et al. (2007): Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007*: *The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, New York

Mika J. (é.n.): Éghajlatváltozás, hatások, válaszadás, Kempelen Farkas Hallgatói Információs Központ, Budapest http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0038_foldrajz_MikaJanos-eghajlat-HU/ch01s05.html (Letöltés: 2015. november 29.)

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/ (Letöltés: 2015. november 29.)

Moss, R. H. et al. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature,* 463., 747–756.

Nakicenovic, N. et al. (2000): *IPCC special report on emissions scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge

Pieczka I. (2012): *A Kárpát-medence térségére vonatkozó éghajlati szcenáriók elemzése a PRECIS finom felbontású regionális klímamodell felhasználásával.* PhD értekezés. ELTE, Budapest

Pomázi I., Szabó E. (2008): Environmental Visions and Outlooks: An Overview of International and Hungarian Experiences. *Statistical Review,* 2., 138–164.

Práger T. (2011): A globális éghajlatmodellezés közelmúltja és jelene (1990–2010). In: Bartholy J., Bozó L., Haszpra L. (szerk.): *Klímaváltozás 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére*. ELTE? Budapest http://nimbus.elte.hu/~klimakonyv/Klimavaltozas-2011.pdf (Letöltés: 2015. november 29.)

Reichler, T., Kim, J. (2008): How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? *Bulletin of the American Meteorological Society,* 3., 303–311.

Richardson, L. F. (1922): *Weather Prediction by Numerical Process.* Cambridge University Press, Cambridge

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

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/ (Letöltés: 2015. november 29.)

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

Teichmann, C. (2015): *Downscaling of CMIP6 for regional climate modeling: experiences from CORDEX,* Scenario MIP Workshop, IIASA, Austria http://klima.kvvm.hu/documents/31/tudom_nyos_alapokAR4.pdf (Letöltés: 2015. november 29.)

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A. (2012): An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 4., 485–498.

Thompson, R. S. et al. (1998): A strategy for assessing potential future changes in climate, hydrology, and vegetation in the Western United States. *US Geological Survey Circular,* 1153. http://pubs.usgs.gov/circ/1998/c1153/c1153_1.htm (Letöltés: 2015. november 29.)

Vág A. (2011): *Az Európa számára releváns környezeti migráció forgatókönyvei.* PhD értekezés. Szent István Egyetem, Gödöllő

Zsebeházi G. (2011): *Magyarország éghajlatának jellemzése az ENSEMBLES projektbeli és a hazai regionális modelleredmények együttes vizsgálatával.* Szakdolgozat. ELTE Földtudományi Intézet Meteorológiai Tanszék, Budapest

Internetes források

IPCC: http://www.ipcc.ch/
U.S. Climate Change Assessment Program: http://nca2014.globalchange.gov/report
NCAR UCAR University Corporation for Atmospheric Research: http://www2.ucar.edu/
NOAA National Atmospheric and Ocean Administration, NASA Goddard Institute for Space Studies: http://www.giss.nasa.gov/
PRUDENCE: http://prudence.dmi.dk/
ENSEMBLES: http://www.ensembles-eu.org/