

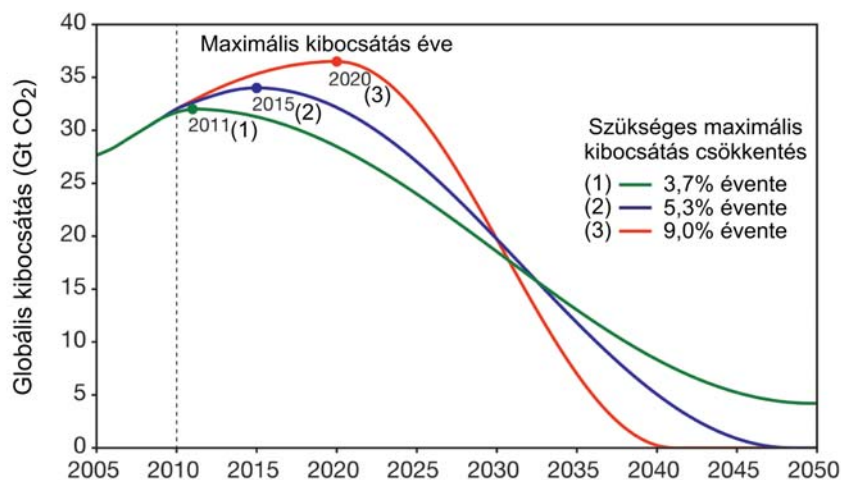
REGIONÁLIS ÉGHAJLATVÁLTOZÁS – MODELLEREDMÉNYEK ELEMZÉSE A KÁRPÁT-MEDENCE TÉRSÉGÉRE

Bartholy Judit, Pongrácz Rita

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.

e-mail: bartholy@caesar.elte.hu, prita@nimbus.elte.hu

A Klímaváltozási Kormányközi Testület (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2007-ben megjelent Negyedik helyzetértékelő jelentése (IPCC, 2007) összefoglalja a nemzetközi tudományos közösség klímaváltozással kapcsolatos ismereteit, s felhívja a figyelmet a várható következményekre. A jelentés lezárása óta világszerte folyamatosan számos újabb mérési és kutatási eredmény látott napvilágot e témakörben. Vitathatatlan, hogy az emberi tevékenységek hatására a globális szén-dioxid kibocsátás 2008-ban 40%-kal volt magasabb az 1990-es értéknél. Ugyancsak tény, hogy az elmúlt 25 évben a globális hőmérséklet-növekedés üteme elérte az évtizedenkénti 0,2 °C-os mértéket – annak ellenére, hogy az utolsó évtizedben a napsugárzásból származó éghajlati kényszer csökkent.



1. ábra: A globális szén-dioxid emisszió alakulása 2010–2050 között, ha 67% valószínűséggel 2 °C alatt szeretnénk tartani a globális melegedés mértékét (Forrás: WBGU, 2009)

A fenti tények is arra utalnak, hogy a XXI. század nagy kihívása a globális klímaváltozás következményeinek kezelése, az egyre fokozódó emberi tevékenység hatásainak csökkentése, illetve a várható regionális változásokra való felkészülés, azokhoz való alkalmazkodás. Minél tovább várunk arra, hogy a tudomány minden bizonytalanság kizárásával igazolja az éghajlati rendszer változási folyamatait, és azok regionális következményeit, annál több visszafordíthatatlan változás következik be a Föld számos sérülékeny régiójának környezeti feltételeiben. Ezzel párhuzamosan adaptációs lehetőségeink egyre szűkülnek. Az 1. ábrán német elemzők által készített előrejelzéseket láthatunk a globális CO₂-kibocsátás becslt alakulásáról. A vizsgálat során (WBGU, 2009) meghatározták, hogy milyen mértékű kibocsátás-csökkentés szükséges ahhoz, hogy a XXI. század közepére a globális melegedés mértéke ne haladja meg a 2 °C-ot. Annak függvényében, hogy az antropogén kibocsátás összehangolt csökkentése már 2011-ben, 2015-ben vagy csak 2020-ban kezdődik meg, a globális önkorlátozás mértéke az idő

előrehaladtával egyre drasztikusabb kell legyen: kilenc éves késlekedés évi 3,7% helyett 9%-os kibocsátás-csökkentést tesz szükségessé.

A rendelkezésre álló jelenlegi becslések alapján nagyon gyors cselekvés lenne szükséges, mely komoly gazdasági következményekkel jár. Ugyanakkor érthető, hogy a társadalom minden szegmense tart a változásoktól, s a különböző ipari lobbik vagy a nemzeti kormányok szeretnék halogatni vagy elkerülni az egyre sürgetőbb környezetvédelmi intézkedéseket, s az energiaszektor átalakítását. Ahhoz, hogy drasztikus döntések szülessenek, olyan egyértelmű bizonyítékokat várnak a tudománytól, melyeket az egyelőre nem képes szolgáltatni. Ebben a feszült légkörben érthető, hogy erősödik az általános kételkedés, s egyre gyakrabban jelennek meg ún. klímaszkeptikus elgondolások. Ezen elméletek egy része valódi fizikai alapokkal rendelkezik, míg nagyobb hányada mögött nincs valós tudományos háttér, s a kételkedésben csupán a változásoktól való burkolt félelem jelenik meg: ha nincs globális melegedés, úgy minden folytatódhat az eddig megszokott módon, tehát nincs különösebb teendőnk. A rövidtávú meteorológiai prognózisok, illetve gazdasági döntések is tartalmaznak bizonytalanságot, s a valószínűségi előrejelzések könnyítik meg a hatáselemzéseket, a kockázatbecslést. Ugyanez az út követhető a klímaszcenáriók esetén is: ezért itt is egyre inkább több klímamodell alapján készített valószínűségi becslésekkel találkozunk, melyek alapján a döntéshozók évtizedekkel előre szembesülhetnek a régióban várható éghajlati tendenciákkal. E cikkben regionális klímamodell-szimulációk felhasználásával a valószínűsíthető klímaváltozást vázoljuk fel a Kárpát-medence térségére.

Globális és regionális klímamodellek

A klímára vonatkozó jövőbeli becsléseket fizikai törvényeken alapuló matematikai formulák alkotta éghajlati modellek futtatásával készíthetünk. A globális éghajlati modelleket (GCM-eket) az éghajlati rendszer – azaz a légkör, az óceán, a talajfelszín, a krioszféra és a bioszféra – folyamatainak, kölcsönhatásainak leírására fejlesztették ki. Az éghajlati rendszer numerikus modellezése az alapvető fizikai törvényszerűségeken alapszik, melyek közül a legfontosabbak a tömeg-, az energia- s az impulzusmomentum megmaradásának elve. E modellek szimulálják a légkör és az óceánok mozgásait, becslést adnak többek között a hőmérséklet, sűrűség, légnyomás várható alakulására. Leírják a hidrológiai ciklus elemeit, a sarki jégsapkák, gleccserek terjeszkedését, olvadását. Közelítik a felhő- és csapadékképződési folyamatokat. Mind több összefüggés (egyenlet) beiktatásával lehetőség van egyre több – a légkörre, az óceánra, a bioszféra vonatkozó – fizikai folyamat és kölcsönhatás figyelembevételére. Napjainkra a nagy klímakutató központokban fejlesztett globális éghajlati modellek tudományos és technikai kidolgozottsága elérte azt a szintet, hogy ezek a modellek képesek megbízhatóan leírni az éghajlati rendszer elemeinek viselkedését (a közöttük lévő összetett kölcsönhatásokkal együtt), továbbá kiválóan használhatók az éghajlatváltozás globális, nagyskálájú jellemzőinek vizsgálatára. Komplexitásuk azonban a jelenlegi számítógépes kapacitás teljes kihasználásával sem teszi lehetővé azt, hogy egyedüli alkalmazásukkal az éghajlatváltozás regionális vonatkozásairól pontos információhoz jussunk. Egyrészt azért nem, mert e modellek területi felbontása általában durva, gyakran 150–250 km, ami azt jelenti, hogy például Magyarországra mindössze néhány rácspont esik. Másrészt e közelítés nem tartalmazza a felszín, s a domborzat kellően részletes adatait. Így statisztikus és/vagy dinamikus közelítéssel alapuló módszerek felhasználásával regionalizációs (ún. leskálázási) eljárásokat szükséges alkalmazni annak érdekében, hogy egy adott térségre vonatkoztatott pontos információkat kaphassunk. A dinamikus közelítés keretein belül elsőként Giorgi és

munkatársai (Giorgi, 1990) fejlesztettek ki egy azóta is elterjedten használt módszert, az ún. beágyazott modellel való szimulációt. Ezek a globális modellek eredményeit bemenő paraméterként (kiindulásként és oldalsó peremfeltételekként) felhasználó korlátos tartományú beágyazott modellek képesek a nagyskálájú változásokat leképezni területileg finomabb skálára. A regionális modellek felbontása akár 10–25 km is lehet, mely már kisebb régiók pontos éghajlati leírását is lehetővé teszi.

A regionális éghajlati modellek (RCM-ek) megbízható fizikai tartalommal, nagy területi felbontással rendelkeznek, azonban a Földnek csak egy kisebb, korlátos tartományát fedik le. Általában az éghajlati rendszer komponensei közül a légkört és a földfelszint tartalmazzák, s képesek a felhő-, a sugárzási-, a csapadék-, valamint a talajhidrológiai-folyamatok leírására. Ma már számos RCM áll rendelkezésre, melyek alkalmasak kisebb térségek XXI. századi éghajlatának finomabb térskálájú becslésére.

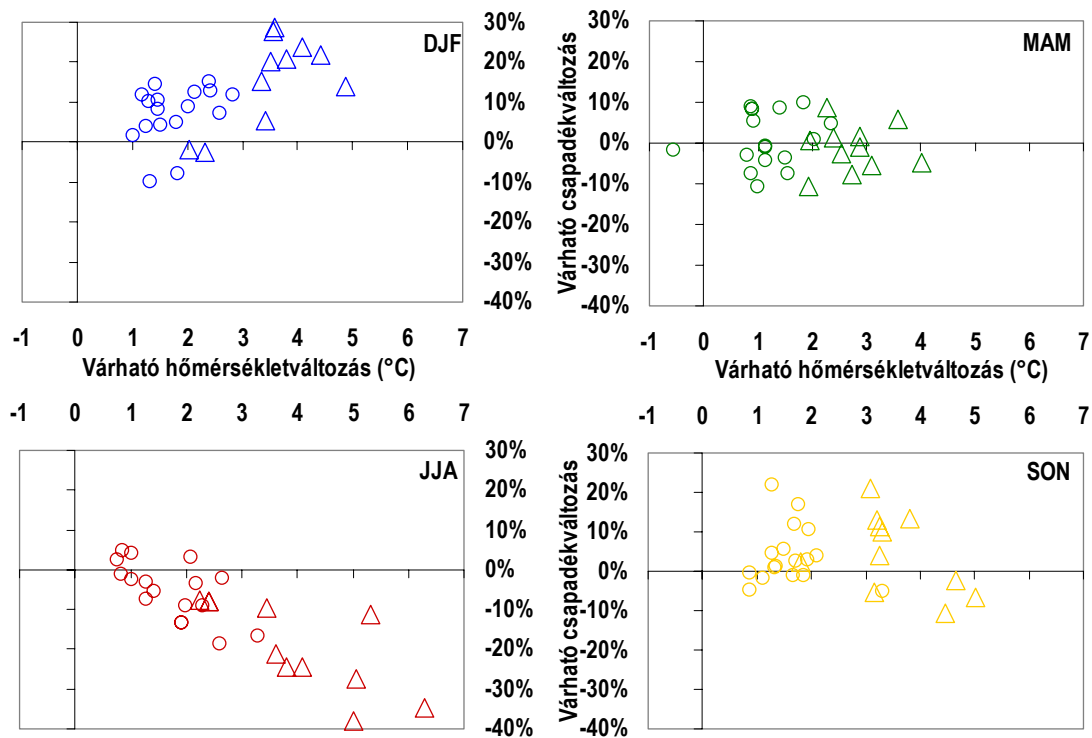
Az elmúlt évtizedben mind az Európai Unió, mind az Amerikai Egyesült Államok szenátusa nagy erőfeszítéseket tett annak érdekében, hogy lehetővé váljon a regionális éghajlati előrejelzések információtartalmának, minőségének, s megbízhatóságának növekedése. A korábbiakban jellemző sporadikus, nem kellően koordinált kutatások helyett megjelentek egyrészt az EU-keretprogramokban az egész kontinenst, illetve annak egy-egy térségét átfogó projektek (pl.: PRUDENCE, ENSEMBLES, CECILIA, CLAVIER), másrészt az Amerikai Egyesült Államokban egy külön kormánybizottság létesült a klímaváltozással kapcsolatos kutatások összehangolására.

Az Európai Unió VI. keretprogramja által támogatott, 2009-ben lezárult ENSEMBLES projekt során 25 km-es horizontális felbontást alkalmazó RCM-ek 1951–2100 (illetve néhány esetben csak 1951–2050) időszakra vonatkozó folyamatos szimulációit készítették el a teljes európai térségre (van der Linden és Mitchell, 2009). A szimulációs futtatásokhoz az RCM-ek számára szükséges meghajtó kezdeti- és peremfeltételeket alapvetően három különböző GCM szolgáltatta: (1) a brit Hadley Központ által kifejlesztett HadCM (Gordon et al., 2000; Rowell, 2005), (2) a német Max-Planck Intézet által fejlesztett ECHAM (Roeckner et al., 2003; 2006) és (3) a francia Météo-France modellje, az ARPEGE (Déqué et al., 1998). A szimulációk mindegyike a közepesnek tekinthető A1B scenáriót (Nakicenovic és Swart, 2000) vette figyelembe. Ez a globális emisszió-scenárió azt feltételezi, hogy a Föld teljes népessége néhány évtizeden belül mintegy 9 milliárdra növekszik, majd ezt követően a XXI. század végére fokozatosan 7 milliárdra csökken. Az A1B scenárió gyors gazdasági és technológiai fejlődést prognosztizál, s a becslések szerint az ehhez szükséges energiaigényt a fosszilis tüzelőanyagok és a megújuló/nukleáris energiahordozók közel hasonló arányban fogják fedezni. Ez a lehetséges forgatókönyv a légköri szén-dioxid koncentráció-szintjének valamelyest lassuló ütemű növekedését vetíti előre, mely 2100-ra meghaladhatja a 715 ppm-et (Nakicenovic és Swart, 2000).

Becsült klímaváltozás a Kárpát-medencében

A Kárpát-medence térségét tartalmazó kivágotra meghatároztuk a rendelkezésre álló ENSEMBLES-szimulációk (van der Linden és Mitchell, 2009) alapján a hőmérsékleti és csapadékviszonyok éves, évszakos és havi skálán várható változását a XXI. századra. A Magyarország területére eső rácspontok átlagos értékeit felhasználva a szimulációnként becsült éghajlatváltozásokat összegzi a 2. ábra. Eredményeink mind a négy évszakban egyértelmű melegedést valószínűsítene az ország területén, melynek mértéke a hazai rácspontok átlagát tekintve a század végére elérheti a 4–6 °C-ot. A legnagyobb mértékű melegedésre nyáron számíthatunk. A hazai csapadékviszonyokra vonatkozóan a modell-szimulációk becslései nagyobb bizonytalanságot tartalmaznak. A legnagyobb valószí-

nűséggel a 2071–2100 időszakra várható nyári szárazodás és téli csapadéknövekedés becsülhető, mely az éven belüli eloszlás módosulásához vezet. Mind a magasabb hőmérsékletekkel, mind a csapadékkal kapcsolatban az extrém éghajlati események XXI. századi gyakoriságnövekedésére számíthatunk, mely a társadalom egésze és a gazdaság számos ágazata számára komoly alkalmazkodást, s a tervezési stratégiák átgondolását igényli.



2. ábra: A hazai hőmérsékleti és csapadékviszonyok becsült évszakos változásai a XXI. századra vonatkozóan. A grafikonokon látható körök az egyes modellszimulációk által a 2021–2050 időszakra becsült változásokat jelzik, a háromszögek pedig a 2071–2100 időszakra várható változásokat. Referencia időszak: 1961–1990.

Az 1990-es évek végén nemzetközi összefogással alakult WMO-CCI/CLIVAR munkacsoport ajánlásai alapján definiált éghajlati indexeket (Karl et al., 1999) is használhatjuk a hazai éghajlati tendenciák elemzéséhez. Korábbi vizsgálataink során számos hőmérséklettel, illetve csapadékkal kapcsolatos éghajlati index XX. századi tendenciáit határoztuk meg a Kárpát-medence térségére (Bartholy és Pongrácz, 2005; 2007). A számításokhoz a hazai és szomszédos országokbeli meteorológiai állomások mért adatsorait használtuk fel. Ugyanezen indexek idősorait előállítottuk számos RCM-szimulációt felhasználva is, például a PRUDENCE és az ENSEMBLES projekt keretében kapott modellszimulációknak a Kárpát-medence kivágatára vonatkozó mezősorai alapján (Bartholy et al., 2008a; 2008b; Pongrácz et al., 2009). E cikkben 11 ENSEMBLES-szimuláció (van der Linden és Mitchell, 2009) alapján kapott eredményeinket mutatjuk be.

A klímamodellek validációja során a szimulációkból származó éghajlati változók (pl. a hőmérséklet és a csapadék) outputmezőire meghatároztuk az éves, évszakos és havi átlagos értékeket az 1951–2000 időszakra. Ezeket az átlagmezőket összevetettük a mérések alapján összeállított E-OBS adatbázisból (Haylock et al., 2008) számított átlagos mezőkkel. Az így kapott hibák azt jelzik, hogy mind a hőmérséklet, mind a csapadék esetén általában felülbecslés jellemző. A szimulált hőmérsékleti mezők térségünkben elsősorban a nyári

félévben haladják meg a mérésekből származtatott átlaghőmérsékletet. Ezzel ellentétben a szimulált csapadékmezők nyáron jellemzően alulbecslik az E-OBS adatbázisból meghatározott havi átlagos csapadékot (Pongrácz et al., 2011).

Annak érdekében, hogy a megfigyelésekhez minél pontosabban közelítő szimulált meteorológiai mezőkkel dolgozhassunk, mindenképpen szükséges a szimulált idősorok statisztikai módszeren alapuló korrigálása. A hibakorrekción eljárásal megfelelő mértékben csökkenthetjük az RCM-ekből származó mezősorok hibáit. Erre a célra egy olyan módszert alkalmaztunk, mely a meteorológiai változók percentilis értékeinek kiszámításán és a szimulációból meghatározott eloszlásnak a megfigyelt eloszláshoz való illesztésén alapul (Formayer és Haas, 2009). A módszer lényege, hogy két adathalmaz statisztikai szempontból közel egyezőnek tekinthető, amennyiben eloszlásuk megegyezik (Déqué, 2007), s az eloszlásfüggvény alakjára nézve a módszer semmilyen előzetes feltételezést nem követel meg. Az eloszlások illesztéséhez használt függvényt többféle módon definiálhatjuk – jelen vizsgálataink során a hőmérséklet esetén additív, a csapadék esetén pedig multiplikatív összefüggést alkalmaztunk. A korrekciós faktorokat minden rácspontra, az év 12 hónapjára külön-külön meghatároztuk. A végrehajtott hibakorrekciónak köszönhetően a szimulált adatok empirikus eloszlásfüggvénye már megfelelően rásimul a megfigyelt adatok eloszlásfüggvényének görbéjére.

Eddigi vizsgálataink során (Kis, 2012; Pongrácz et al., 2012) a csapadékkal kapcsolatos éghajlati indexek közül az alábbiak várható tendenciáinak elemzését végeztük el: CDD (egymást követő száraz napok maximális száma), SDII (csapadékintenzitás, vagyis a csapadékos napok átlagos csapadéka), RX1 (az 1 nap alatt lehullott maximális csapadékmennyiség), RR10 (10 mm-t meghaladó csapadékú napok száma), RR1 (1 mm-t meghaladó csapadékú napok száma).

1. táblázat: Néhány csapadékkal kapcsolatos éghajlati index becsült változása 2071–2100 időszakra 11 RCM-szimuláció alapján (referencia időszak: 1961–1990)

Index	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
CDD: Az egymást követő száraz napok maximális száma (amikor $R_{\text{nap}} < 1 \text{ mm}$)	↑↑↑↓	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑	↑↑↑	↓↓↓↓↓
RR1: Csapadékos napok száma (amikor $R_{\text{nap}} \geq 1 \text{ mm}$)	↓↓↓↓↓ ↓↓↑	↓↓↓↓↓ ↓↓↓↓↓ ↓	↓↓↓↓↓	↑↑↑↑
RR10: Nagy csapadékú napok száma (amikor $R_{\text{nap}} \geq 10 \text{ mm}$)	↑	↓↓↓↓↓ ↓↓	↑↑↑↑↑ ↑↑	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑↑
RX1: 1 nap alatt lehullott legnagyobb csapadékösszeg ($R_{\text{max,1nap}}$)	↑↑↑	↑↑	↑↑↑↑↑ ↑↑	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑↑
SDII: Csapadékintenzitás, a csapadékos napok átlagos csapadéka ($R_{\text{sum}}/RR1$)	↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↓	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑↑

Az 1. táblázatban foglaljuk össze a fenti öt éghajlati indexre a magyarországi rácspontok átlagára vonatkozó szignifikáns trendeket a 11 RCM-szimuláció korrigált output mezői alapján. A felfelé, illetve lefelé mutató nyilak rendre a szignifikáns növekedést, illetve a szignifikáns csökkenést jelzik. A barna nyilak az éghajlat szárazabbá, a zöldek pedig az éghajlat nedvesebbé válására utalnak. Az eredmények azt jelzik, hogy hazánkban a XXI. század végére nyáron (továbbá kisebb mértékben ősszel és tavasszal)

jellemzően szárazodásra számíthatunk, ugyanakkor a csapadékesemények valószínűsíthetően nagyobb intenzitásúak lesznek (főként ősszel). Télen szintén várhatóan intenzívebb lesz a csapadék hullás, de ebben az időszakban összességében is a csapadék növekedése prognosztizálható.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat támogatta az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával az „Európai Léptékkel a Tudásért”, ELTE-TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. A felsőoktatás minőségének javítása a kutatás-fejlesztés-innováció-oktatás fejlesztésén keresztül” pályázat, az OTKA K-78125 számú pályázata, a Nemzeti Fejlesztési (korábban Környezetvédelmi és Vízügyi) Minisztérium, az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CCWATERS projekt (SEE/A/022/2.1/X), az SH/2/1 számú svájci-magyar közös kutatási program keretében megvalósuló Felső-Tisza árvíz-megelőzési rendszer fejlesztési projektje, valamint az MTA TKI Alkalmazkodás a klíma-változáshoz című (2006/TKI/246) programja.

Hivatkozások

- Bartholy, J., Pongrácz, R., 2005: Néhány extrém éghajlati paraméter globális és a Kárpát-medencére számított tendenciája a XX. században. *AGRO-21 Füzetek*, 40, 70–93.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., 2007: Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. *Global and Planetary Change*, 57, 83–95.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy., Szabó, P., 2008a: Analysis of expected climate change in the Carpathian basin using the PRUDENCE results. *Időjárás*, 112, 249–264.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy., Szabó, P., 2008b: Milyen mértékű változás várható a Kárpát-medence éghajlati szélsőségeiben a XXI. század végére? *Léggör*, 53/3, 19–23.
- Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16–26.
- Déqué, M., Marquet, P., Jones, R.G., 1998: Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Climate Dynamics*, 14, 173–189.
- Formayer, H., Haas, P., 2009: Correction of RegCM3 model output data using a rank matching approach applied on various meteorological parameters. In: Deliverable D3.2 RCM output localization methods (BOKU-contribution of the FP 6 CECILIA project). <http://www.cecilia-eu.org/>
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, 3, 941–963.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C.A., Banks, H., Gregory, J.M., Johns, T.C., Mitchell, J.F.B., Wood, R.A., 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16, 147–168.
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D., New, M., 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)* 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201

- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. Cambridge University Press, New York. 996p.
- Karl, T.R., Nicholls, N., Ghazi, A., 1999: Clivar/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. *Climatic Change*, 42, 3–7.
- Kis, A., 2012: *Extrém csapadékindexek elemzése a Kárpát-medence térségére az ENSEMBLES klímaszimulációk korrigált csapadéksorai alapján*. XIII. Országos Felsőoktatási Környezettudományi Diákkonferencia dolgozat, Veszprém. 36p. Témavezető: Pongrácz R.
- van der Linden, P., Mitchell, J.F.B., 2009: *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. 164p.
- Nakicenovic, N., Swart, R., eds., 2000: *Emissions Scenarios*. A special reports of IPCC Working Group III. Cambridge University Press, UK. 570p.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Szabó, P., Gelybó, Gy., 2009: A comparison of observed trends and simulated changes in extreme climate indices in the Carpathian basin by the end of this century. *Int. J. of Global Warming*, 1, 336–355.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Miklós, E., 2011: Analysis of projected climate change for Hungary using ENSEMBLES simulations. *Applied Ecology and Environmental Research*, 9, 387–398.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Miklós, E., Kis, A., Török, O., 2012: Extrém éghajlati indexek várható tendenciái modellszimulációk eredményei alapján. *Légkör* (megjelenés alatt)
- Roeckner, E., Bauml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, L., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U., Tompkins, A., 2003: *The atmospheric general circulation model ECHAM5, Part 1. Model description*. MPI Report No. 349. 140p. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornblueh, L., Manzini, E., Schlese, U., Schulzweida, U., 2006: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J. Climate*, 19, 3771–3791.
- Rowell, D.P., 2005: A scenario of European climate change for the late 21st century: seasonal means and interannual variability. *Climate Dynamics*, 25, 837–849.
- WBGU, 2009: *Solving the climate dilemma: The budget approach*. German Advisory Council on Global Change (WBGU), Berlin.