

Országos Meteorológiai Szolgálat

Klíma modellezési tevékenység

Eredmények (2010)

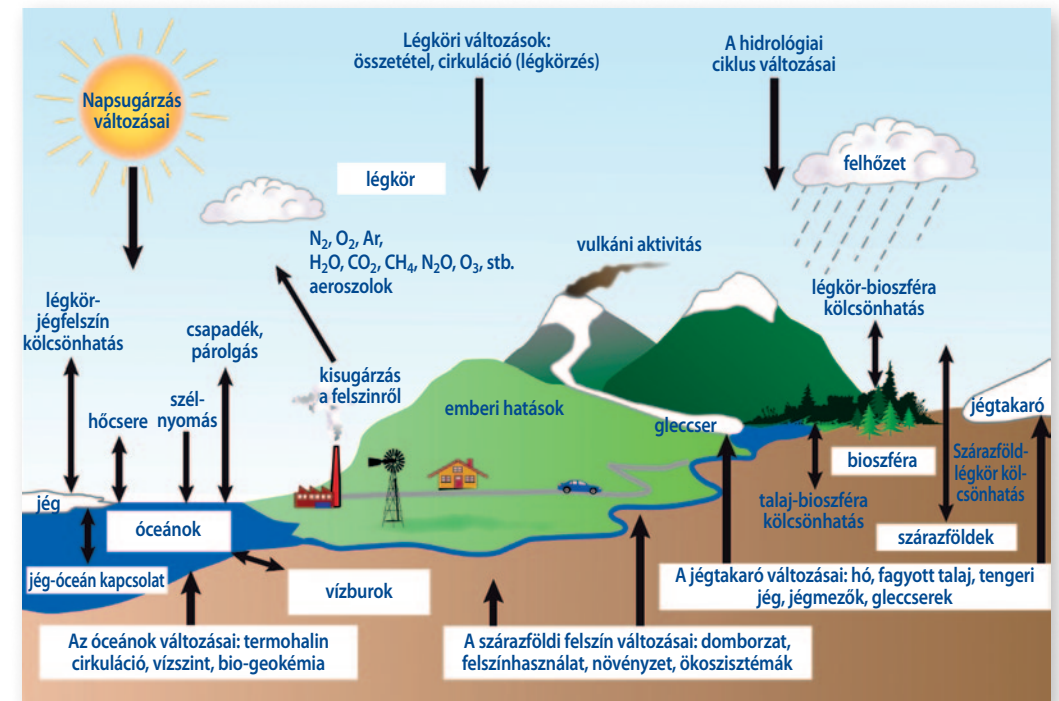


Bevezetés

Általánosan elfogadott tény, hogy az éghajlati rendszer összetett működésének és jövőbeli viselkedésének tanulmányozására a numerikus modellezés eszköztára szolgáltat megfelelő, objektív módszert.

A globális numerikus éghajlati modellek képesek a rendszer egyes összetevőit (a légkört, az óceán, a szárazföld, a jégtakaró és az élővilág; **1. ábra**) fizikai

A bizonytalanság pedig abból adódik, hogy jelenleg nem vagyunk képesek teljes bizonyossággal megmondani, hogyan változnak az antropogén tevékenység egyes részletei a jövőben. Éppen ezért a jövőbeli kibocsátási tendenciákra számos hipotézist (ún. forgatókönyvet) állítunk fel, melyek között vannak optimista, pesszimista vagy átlagosnak tekinthető változatok. Ezek figyelembevételével



1. ábra: az éghajlati rendszer elemei és legfontosabb kölcsönhatásai

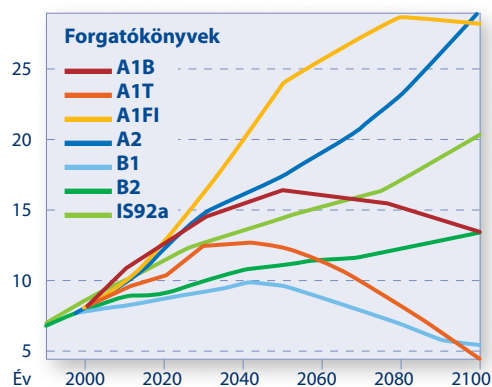
folymatainak leírására, valamint a komponensek közötti bonyolult kölcsönhatások és visszacsatolások jellemzésére. Ezek a modellek a komplex rendszer egészét együtt tekintik, ezért lehetőségünk van velük leírni az éghajlati rendszer választát egy feltételezett jövőbeli kényszerre.

A feltételezett jövőbeli kényszerek egyik legfontosabb és legbizonytalanabb eleme az emberi (antropogén) tevékenység. Az éghajlati rendszerre hatással bíró emberi tényezőket a globális modellek számára oly módon számszerűsíthetjük, hogy meghatározzuk mindezen tényezőknek (a népesség, az energiafelhasználás, az ipari és mezőgazdasági szerkezet stb. változásainak) az éghajlati rendszerre gyakorolt „sugárzási kényszerét” (azaz mennyiben módosulnak ezáltal a földi sugárzási viszonyok), s kiszámítjuk a hatással egyenértékű szén-dioxid-kibocsátást, valamint az ennek megfelelő koncentrációt (**2. ábra**).

készítenek globális projekciókat a Föld egészére nézve. (Ezeket a modell-szimulációkat nem előrejelzéseknek, hanem projekcióknak nevezzük éppen az említett feltételes voltuk miatt.)

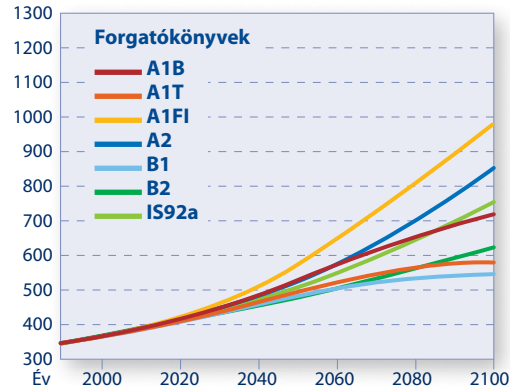


CO₂ kibocsátás (Gt C/év)



2. ábra: a globális emisszió legfontosabb forgatókönyv-családjainak szén-dioxid-kibocsátási (bal) és -koncentrációs (jobb) mutatói a XXI. századra

CO₂ koncentráció (ppm)



Napjainkra a nagy klímakutató központokban fejlesztett globális éghajlati modellek 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 planetáris (azaz globális, nagyskálájú) jellemzőinek vizsgálatára. A rövidtávú modellekkel ellentétben ezekkel a modellekkel szemben nem elvárás, hogy minden pontban és időpillanatban leírják az időjárást. Ebben az esetben a célunk az, hogy az éghajlati rendszer átlagos tér- és időbeli statisztikáit reprezentáljuk. A globális klímamodellek komplexitása azonban a jelenlegi számítógépes kapacitás teljes kihasználásával sem teszi lehetővé azt, hogy egyedüli alkalmazásukkal az éghajlatváltozás regionális vonatkozásairól pontos információhoz jussunk (térbeli felbontásuk például többnyire 100 km-nél még ma sem finomabb).

A részletek feltárására ezért ún. regionalizációs (leskálázási) módszerekkel élünk, amelyek segítségével egy, az érdeklődésünkre számot tartó területen (például Közép-Európa térségére) finomíthatjuk a nagyskálájú globális jellemzőket.

A globális információk regionális pontosítására Magyarországon regionális éghajlati modelleket használunk, melyek – miként a rövidtávú időjárás-előrejelzésben – egy kisebb tartományra készítenek projekciókat a globális modellek eredményeit határ-feltételekként felhasználva (**3. ábra**). A regionális modellek többnyire már csak az éghajlati rendszer légköri komponensének leírását tűzik ki célul, ezért kifejlesztésük általában a rövidtávú előrejelzésben is használt időjárás modellek adaptálását és kiterjesztését jelenti oly módon, hogy bizonyos folyamatokat (például a felhőképződést, sugárzást) az éghajlati tér- és időskálának megfelelően írják le.



3. ábra: az éghajlat regionális változása az éghajlati rendszert ért globális kényszer hatására

A hazai klímadinamikai tevékenységeink története

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál 2003 közepén fogalmazódott meg az a gondolat, hogy a hagyományos, statisztikai alapú klímakutatás mellett indítsuk be a klímadinamikai tevékenységeket is. Az elképzelést segítette, hogy az azt megelőző években megalakult egy olyan numerikus modellező csapat, amely képes számszerű előrejelzéseket biztosító modellek adaptálására és alkalmazására (természetesen ennek feltétele az a számítógépes háttér is, ami lehetővé teszi a modelljeink hatékony futtatását). A tervezett munka részleteit egy – Czelnai Rudolf akadémikus által összehívott – kötetlen megbeszélés szolgáltatta, ahol több, elsősorban klímakutatással és modellezéssel foglalkozó szakember vett részt és próbálta megfogalmazni egy regionális klímadinamikai kutatási program lehetséges alapjait (később a programot az MTA X. Osztálya is megvitatta és megvalósításra érdemesnek találta).

Az elképzelések egy Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program (NKFP) keretében kerültek kezdeti megvalósításra. Az NKFP program címe „Magyarország éghajlatának dinamikai vizsgálata és a numerikus modelleken alapuló regionális klíma-előrejelzések módszertanának megalapozása” volt. A projektet 2005. január 1. és 2007. december 31. között valósítottuk meg az ELTE Meteorológiai Tanszékével, a Pécsi Tudományegyetemmel és az Env-in-Cent Kft.-vel közösen (a projekt koordinátora az Országos Meteorológiai Szolgálat volt). Az együttműködés célja a magyarországi regionális klímamodellezési háttér megteremtése volt, ami alapot szolgáltat a Kárpát-medencében várható éghajlatváltozás becslésére. A megvalósítás során négy regionális klímamodelt adaptáltunk: az ALADIN-Climate és REMO modelleket az OMSZ-ban, míg a PRECIS és RegCM modelleket az ELTE Meteorológiai Tanszékén. A projektről részletes információk a <http://www.met.hu> linken találhatóak.

A modellezési alapok sikeres megteremtésével lehetőségünk nyílt arra, hogy kapcsolatba lépjünk azokkal az európai kutatókkal, akik regionális klímamodellezéssel foglalkoznak, és bekapcsolódjunk az európai kutatási hálózatba. Ennek egyik eredménye, hogy partnerként vettünk részt a CLAVIER és a CECILIA Európai Unió projektjeiben, amelyek az éghajlatváltozást és annak hatásait vizsgálták a közép- és kelet-európai térségben. A CLAVIER (Climate Change and Variability: Impact on Central

and Eastern Europe) projekt (időtartama: 2006 szeptemberétől 2009 augusztusáig) keretében a REMO modelt alkalmaztuk, és vizsgáltuk a klímaváltozás regionális hatását a cirkulációs viszonyokra, a szélsőséges eseményekre, a levegőszennyeződésre, a víz- és energiagazdálkodásra, illetve a mezőgazdaságra. A projektről további részletek a <http://www.clavier-eu.org> honlapon olvashatók. A CECILIA (Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment) projektben (időtartama: 2006 májusától 2009 decemberéig) az ALADIN-Climate modell eredményeivel vettünk részt. A CECILIA projekt szintén foglalkozott az éghajlatváltozás hatásaival, de a hangsúly a modellek futtatásán és leskálázásán volt. A projekt további részleteiről a <http://www.cecilia-eu.org> honlapon olvashatunk.

A nemzetközi kapcsolataink további erősítésére 2008 februárjában Budapesten egy regionális klímamodellezési mini-workshopot rendeztünk, ahova elsősorban a CLAVIER és a CECILIA projektek partnereit hívtuk meg. A workshop előadásai közül az Időjárás folyóirat számára szerkesztettünk egy különszámot (2008. 3-4. szám). 2009 nyarán egy nemzetközi Nyári Iskolát szerveztünk Visegrádon, melynek témája az éghajlatváltozás és éghajlati változékonyság volt („Climate Variability and Climate Change: Estimating and Reducing Uncertainties”). A mini-workshop és Nyári Iskola részletei, előadásai, valamint az Időjárás különszáma a <http://www.met.hu> linken érhetőek el.

A CECILIA és a CLAVIER projektek lezárása után 2010 elején kezdtük meg részvételünket az ECCONET (Effects of Climate Change on the Inland Waterway Networks) projektben (<http://www.tml-ueven.be/project/econet/home.htm>). A 2012 végéig tartó projekt az éghajlatváltozás folyami hajózásra gyakorolt várható hatásaival foglalkozik, különös tekintettel a Duna és a Rajna folyókra. Az OMSZ a munkában a klímamodellezési tapasztalataival és modellfuttatások interpretációjával vesz részt.

A regionális éghajlati modellekkel végrehajtott kísérletek

Az Országos Meteorológiai Szolgálat Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztályán (NMO) az elmúlt néhány évben két regionális klímamodell adaptálására került sor, melyek az alábbiak (a modellek részletes jellemzőit az **1. táblázat** mutatja be):

■ az ARPEGE-Climat globális általános cirkulációs modell alapján a Météo France (<http://www.cnrm.meteo.fr>) által nemzetközi együttműködésben kifejlesztett ALADIN-Climate regionális klímamodell;

■ a Német Szolgálat korábbi időjárás modellje és az ECHAM4 globális általános cirkulációs modell ötvözésével a hamburgi Max Planck Intézet (<http://www.mpimet.mpg.de>) által fejlesztett REMO modell.

A modellekkel először a múltra vonatkozóan hajtottunk végre kísérleteket abból a célból, hogy teszteljük és megismerjük működésüket egy, a mérések által viszonylag jól ismert, hosszabb múltbeli időszakon, s az így feltérképezett modellgyengeségek alapján fejlesszük őket. Ebben az esetben a modellkísérleteket elsőként olyan „tökéletesnek” tekintett (ún. re-analízis) határfeltételekkel hajtottuk végre, melyek előállításához megfigyelési információkat is felhasználtak. Az ezt követő modell-szimulációkban a nagyskalájú kényszereket már nem megfigyelés-alapú információk, hanem légköri vagy kapcsolt óceán-légkör általános cirkulációs modellek biztosították, ugyanis a jövőre vonatkozóan kizárólag a globális modellek eredményeit tudjuk határfeltételekként felhasználni. A múltra vonatkozóan így előállított eredményeket ebben

	ALADIN-Climate 4.5	REMO 5.0
Kiindulási modell	dinamika: ALADIN időjárás LAM* parametizációk: ARPEGE-Climate AGCM**	dinamika: Europa Modell időjárás LAM* parametizációk: ECHAM4 AGCM**
Dinamika		
Horizontális térbeli deriváltak reprezentációja	spektrális	rácsponi
Vertikális koordináta-rendszer	felszínkövető-nyomási hibrid	
Hidrosztatikus közelítés	hidrosztatikus	
Prognosztikai változók	<ul style="list-style-type: none"> ● hőmérséklet ● horizontális szélkomponensek ● specifikus légnedvesség ● felszíni nyomás 	<ul style="list-style-type: none"> ● hőmérséklet ● horizontális szélkomponensek ● specifikus légnedvesség ● felhő-víz tartalom ● felszíni nyomás
Időbeli sémák	szemi-implicit + szemi-Lagrange	explicit leapfrog + szemi-implicit
Fizikai parametizációk		
Sugárzás	Fouquart és Bonnel, Morcrette	
Talajmodell	ISBA	Warrilow
Talajrétegek száma	4 (hőmérsékletre) és 2 (nedvességre)	5
Nagyskalájú csapadék és felhőzet	Smith, Ricard és Royer	Sundquist, Roeckner et al.
Konvekció	Bougeault	Tiedtke, Nordeng

1. táblázat: az alkalmazott regionális modellek legfontosabb jellemzői

* LAM: Limited Area Model – korlátos tartományú modell

** AGCM: Atmospheric General Circulation Model – légköri általános cirkulációs modell

	ALADIN-Climate 4.5			REMO 5.0	
Kísérlet azonosítója	AL_ERA_25	AL_ERA_10	AL_ARP_10	REMO_ERA_25	REMO_ECH_25
Időszak	1961–2000	1961–2000	1961–2100	1961–2000	1951–2100
Horizontális térbeli felbontás	25 km	10 km	10 km	25 km	25 km
Függőleges szintek száma	31	31	31	20	20
Modell-tartomány	Közép- és Kelet-Európa	Kárpát-medence	Kárpát-medence	Közép- és Kelet-Európa	Közép- és Kelet-Európa
Peremfeltételek	ERA-40 re-analízisek	ERA-40 re-analízisek	ARPEGE-Climat/OPA AOGCM***	ERA-40 re-analízisek	ECHAM5/MPI-OM AOGCM***
Peremfeltételek felbontása	125 km	125 km	50 km	125 km	200 km
Kibocsátási forgatókönyv	–	–	A1B	–	A1B

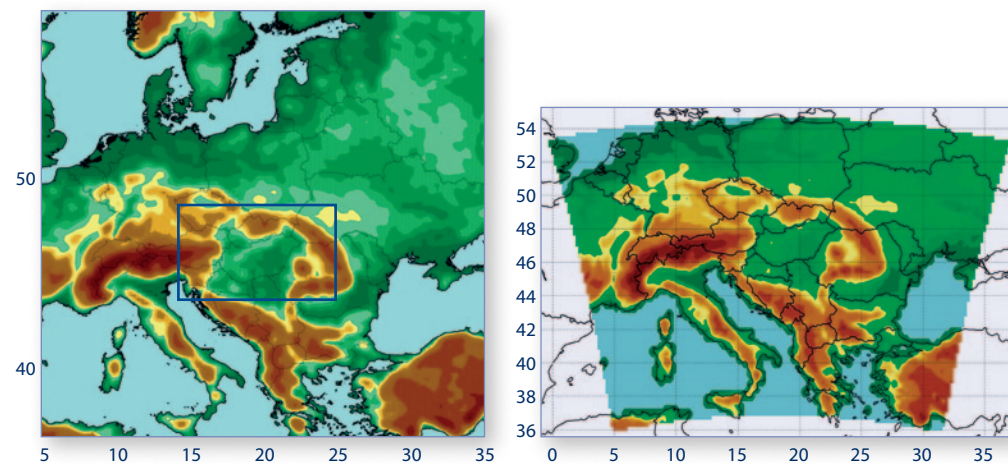
2. táblázat: a regionális modellekkel végrehajtott kísérletek

*** AOGCM: Atmosphere-Ocean General Circulation Model – légkör-óceán általános cirkulációs modell

az esetben is összehasonlítottuk megfigyelési adatokkal, csak míg az előbbi esetben a kiértékelés következtetései a regionális modell fejlesztéséhez szolgálnak információval, addig ezúttal a globális és a regionális modell együttes hibájáról kapunk képet. Megjegyezzük azonban, hogy nincsen egyértelmű kapcsolat a modellek múltbeli éghajlatra vonatkozó „teljesítménye” és a jövőre vonatkozó viselkedése között, de mégis azt várjuk, hogy a múltra jól teljesítő modell megfelelő alapot biztosít az éghajlat jövőbeli alakulásának becslésére.

A modell-szimulációk a REMO modell esetében 25, az ALADIN modell esetében 25, illetve 10 km-es

felbontással készültek; a finomabb felbontású kísérletek során egy kisebb, Kárpát-medencét magában foglaló tartományra, míg a 25 km-es felbontású szimulációkban egy Közép- és Kelet-Európát lefedő, nagyobb területre. A jövőre vonatkozóan a hazai modellkísérletekhez az antropogén tevékenység alakulásával kapcsolatos nagyskalájú kényszereket a globális modellek A1B kibocsátási forgatókönyvével előállított eredményei szolgáltatták (amely a bevezetőben említett forgatókönyvek között egy átlagos változatnak tekinthető a XXI. század második felére). A modellkísérletek legfontosabb jellemzőit a **2. táblázat** foglalja össze, a modellek integrálási tartományait pedig a **4. ábra** mutatja be.



4. ábra: a modellkísérletek integrálási területe; balra az ALADIN-Climate modell 25 (teljes panel) és 10 km-es (kék téglalap) felbontású tartományai, jobbra a REMO modell 25 km-es felbontással lefedett tartománya

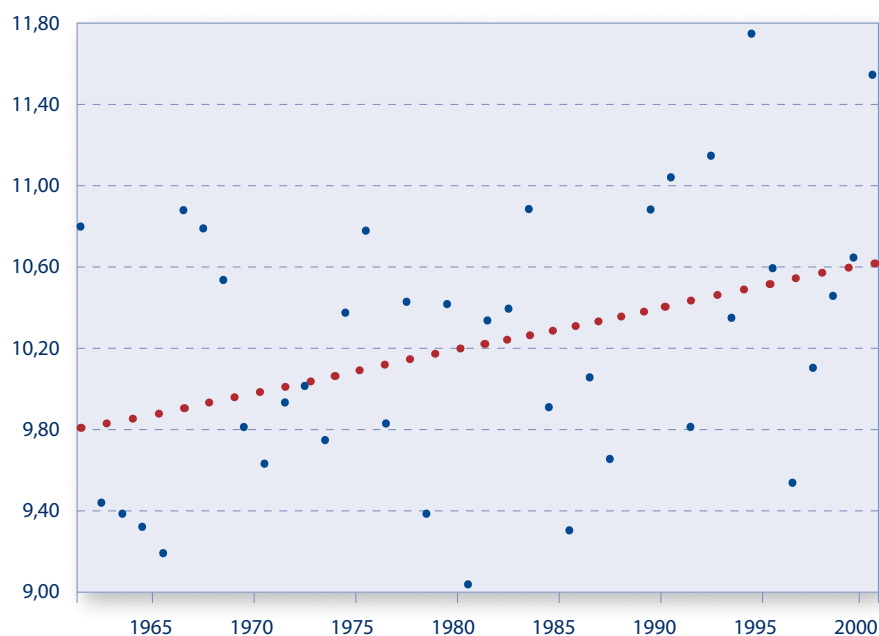
A múltra vonatkozó megfigyelési adatbázisok összehasonlító elemzése

A jövőbeli éghajlatváltozás értelmezéséhez elengedhetetlen a regionális klímamodelleink validációjához használt referencia-adatbázisok részletes vizsgálata. Egyáltalán nem mindegy, milyen adatbázishoz viszonyítva fogalmazzuk meg azon állításunkat, hogy például a modellünk által jelzett nyári átlaghőmérséklet a múltban túlzottan magas. A rendelkezésre álló adatok közül a következőket vizsgáltuk alapvetően a hőmérsékletre és a csapadékra:

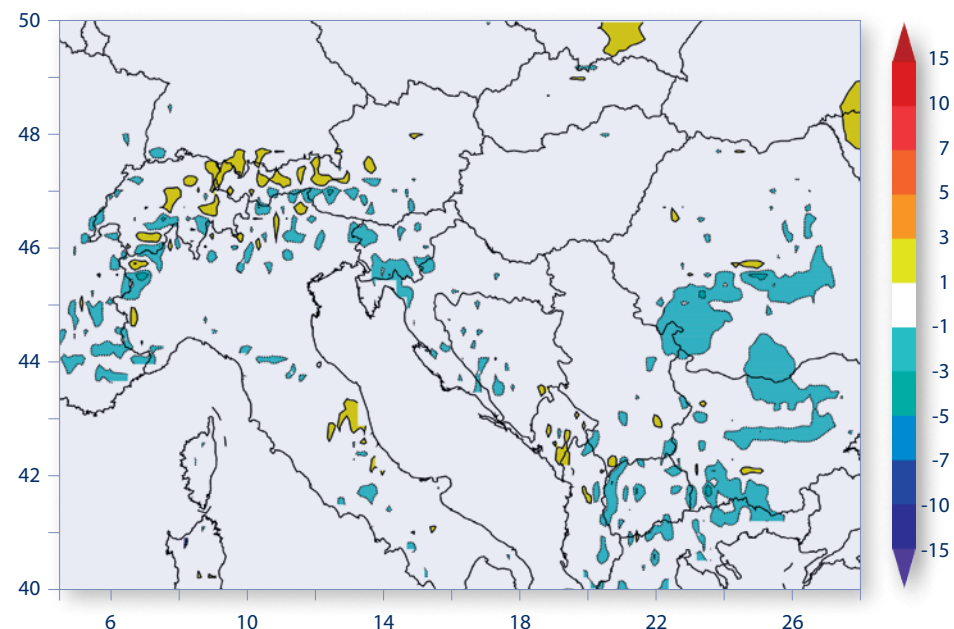
- az Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központ (ECMWF) ERA-40 re-analízisét (Uppala et al., 2005);
- a CRU (Climatic Research Unit) két különböző (megközelítőleg 50 és 20 km-es) felbontású és különböző módszertan szerint készült adatsorát (Mitchell and Jones, 2005 és Mitchell et al., 2004);
- az ECA&D (European Climate Assessment & Dataset) legújabb adatállományát (van Engelen et al., 2008);
- az OMSZ Éghajlati Osztályán készült HUGRID elnevezésű, rácsponti megfigyelési adatbázist (Szentimrey et al., 2005), illetve
- néhány magyarországi állomás nyers idősorát.

Az adatbázisok értékeléséhez fontos ismerni az előállításuk módszerét. A CRU, az ECA és a HUGRID adatok esetében a rendelkezésre álló, többnyire nem homogenizált megfigyelések felhasználásával, adott interpolációs technika alkalmazásával készítették el a felszíni rácsponti adatbázisokat a teljes Földet (CRU0.5) vagy Európát lefedve (CRU10' és ECA), illetve a HUGRID esetében Magyarországra koncentrálván. A nagyobb területet lefedő adatbázisok esetében a mérési pontokban szegény területeken (mint az óceánok vagy a tengerek) és a magasabb légköri rétegekben nem áll rendelkezésünkre információ. Az említett rácsponti megfigyelési adatbázisokkal összehasonlítva az ERA-40 re-analízisek esetében fontos különbség, hogy előállításukhoz a rendelkezésre álló méréseken túl numerikus modellek rövidtávú előrejelzéseit is felhasználták, így módon olyan magasságokban és területeken is előállítva pontos információt (analízist), ahol egyébként nem rendelkezünk méréssel. A re-analízisekkel kapcsolatban még fontos megjegyezni, hogy az összehasonlításnak csak a hőmérséklet esetében van alapja, a csapadékmező ugyanis nem egy analízis, hanem egy hatórási modell-előrejelzés eredményeként áll elő.

A különböző adatbázisok összehasonlító elemzése során megállapítottuk, hogy az ERA-40 adatbázis



5. ábra: a Magyarország területén mért éves átlaghőmérséklet időszora (°C-ban) és annak trendje (pirossal) 1961 és 2000 között a HUGRID adatok alapján



6. ábra: az 1961 és 2000 közötti nyári átlaghőmérséklet különbsége (°C-ban) a 10'-es felbontású CRU és az ECA között

elnagyolt, finomabb skálájú validációra nem alkalmas, ám a magaslégköri analízise révén a modellek számára egyedül ez nyújthat megfelelő kezdeti- és határfeltételeket. A CRU adatbázisok közül a durvább (fél fokos) felbontású tartalmazza a nagyobb számú, újabb és vélhetően pontosabb adatokat. Az ECA adatbázis a finomabb (10 íperces) felbontású CRU-hoz egészen hasonló, annyi különbséggel, hogy az előbbit folyamatosan frissítik. Magyarország területére ezek az adatsorok csak közelítő képet adhatnak, hiszen a rendelkezésre álló mérőállomások közül viszonylag keveset használtak fel az előállításuk során, ellentétben a HUGRID adatsorral, ahol az összes magyarországi állomás adatait figyelembe vették.

Napi rácsponti adatsoraink egyedül az ECA és a HUGRID adatbázisokból vannak, így kizárólag ezekből számolhatóak extrém éghajlati indexek, illetve azok trendjei. A klímamodellel való átlagos összehasonlításhoz szívesen használják még a CRU 10 íperces felbontású adatsorát (éppen az előnyösebb felbontása miatt) több európai és magyarországi intézetben.

Az 5. ábrán a Magyarország területén mért éves átlaghőmérséklet időszorát és annak lineáris trendjét láthatjuk 1961 és 2000 között a HUGRID adatok alapján (a növekedés szignifikáns) illetve a 6. ábrán az 1961 és 2000 közötti nyári átlaghőmérséklet különbségét a 10'-es felbontású CRU és az ECA között.



Validáció

A regionális klímamodelleink validációja során a modelljeinket a múltra futtatjuk, és az eredményeket különböző megfigyelési adatbázisokkal hasonlítjuk össze. Az alábbiakban röviden ismertetjük az egyes modelleink legfontosabb jellemzőit a múlt éghajlatára (1961–1990) vonatkozóan.

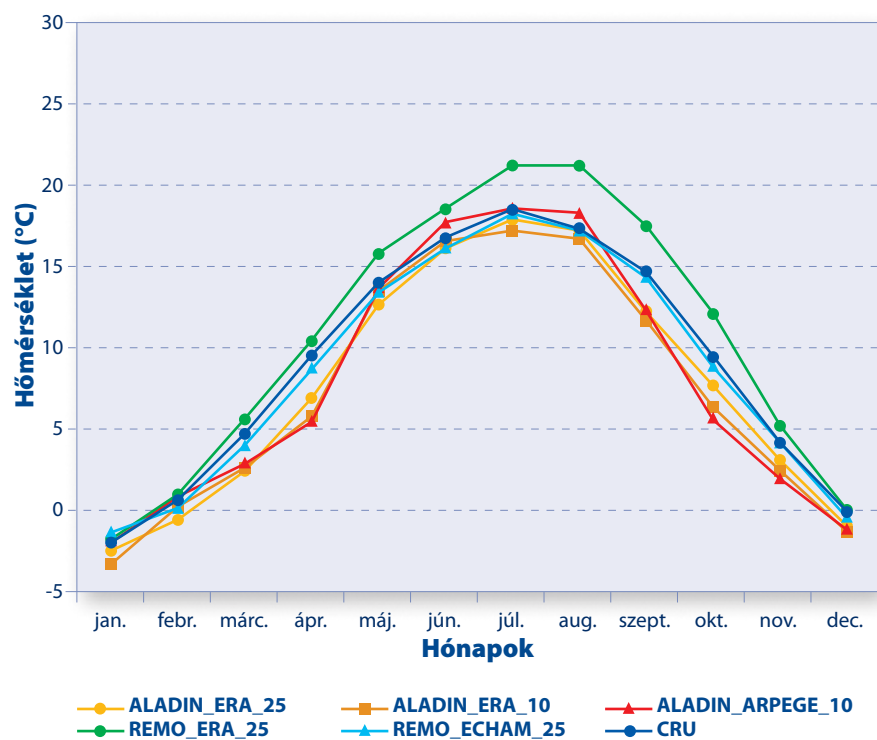
Az átlaghőmérsékletet (7. ábra) tekintve az öt modellkísérlet közül a legjobb eredményt az ECHAM5/MPI_OM kapcsolt globális klímamodellel meghajtott REMO-szimuláció adja mind évszakos, mind éves átlagban. A Kárpát-medence térségében legfeljebb 1 °C-kal térnek el a kapott hőmérsékletértékek a CRU adatbázis értékeitől. Ugyanakkor ERA-40 meghajtással, azaz „jobb” peremfeltétellel a REMO modell erősen felülbecsli az éves, illetve évszakos átlaghőmérsékleteket. Mindez arra enged következtetni, hogy a peremfeltétel és a regionális modell között kisebb a konzisztencia. Az ALADIN-Climate futtatások általában alulbecslik az átlaghőmérsékletet.

Ami a csapadékokat illeti: az ALADIN-Climate szimulációk és a globális modellel meghajtott REMO-kísérlet Magyarország területére éves átlagban csapadékosabb eredményt adnak a megfigyelésnél. ERA-40

meghajtással a REMO az ország déli területein alul-, míg északon felülbecsli a csapadék mennyiségét. Az évszakos átlagok esetében a kísérletek különböző eredményeket adnak, de a tavaszi csapadék felülbecslésében megegyeznek. Alulbecslés leginkább ősszel fordul elő, a legjobb eredményeket pedig minden kísérletnél télen kaptuk.

Mind az átlaghőmérséklet, mind a csapadék esetében azt tapasztaltuk, hogy az ALADIN-Climate kísérletek közül jobb eredményeket kaptunk a durvább felbontású, nagyobb területen végzett futtatással, mint a finomabb felbontásúakkal. Ebből arra következtethetünk, hogy a megválasztott terület túl kicsi. Emellett az is problémát jelenthet, hogy a tartomány pereme hegyvidékekre esik. Mindezen gyengeségek kiküszöbölésére terveink között szerepel az ALADIN-Climate modell egy nagyobb tartományon való futtatása.

A modellek validációjából látható, hogy azok viselkedése elég összetett: vannak olyan aspektusok, amelyekben jól, míg másokban rosszabbul teljesítenek, így módon a modellfejlesztés pontos irányának meghatározása sem egyszerű feladat.



7. ábra: mért és szimulált havi átlaghőmérséklet (°C-ban) Magyarországra az 1961–1990-es időszakra

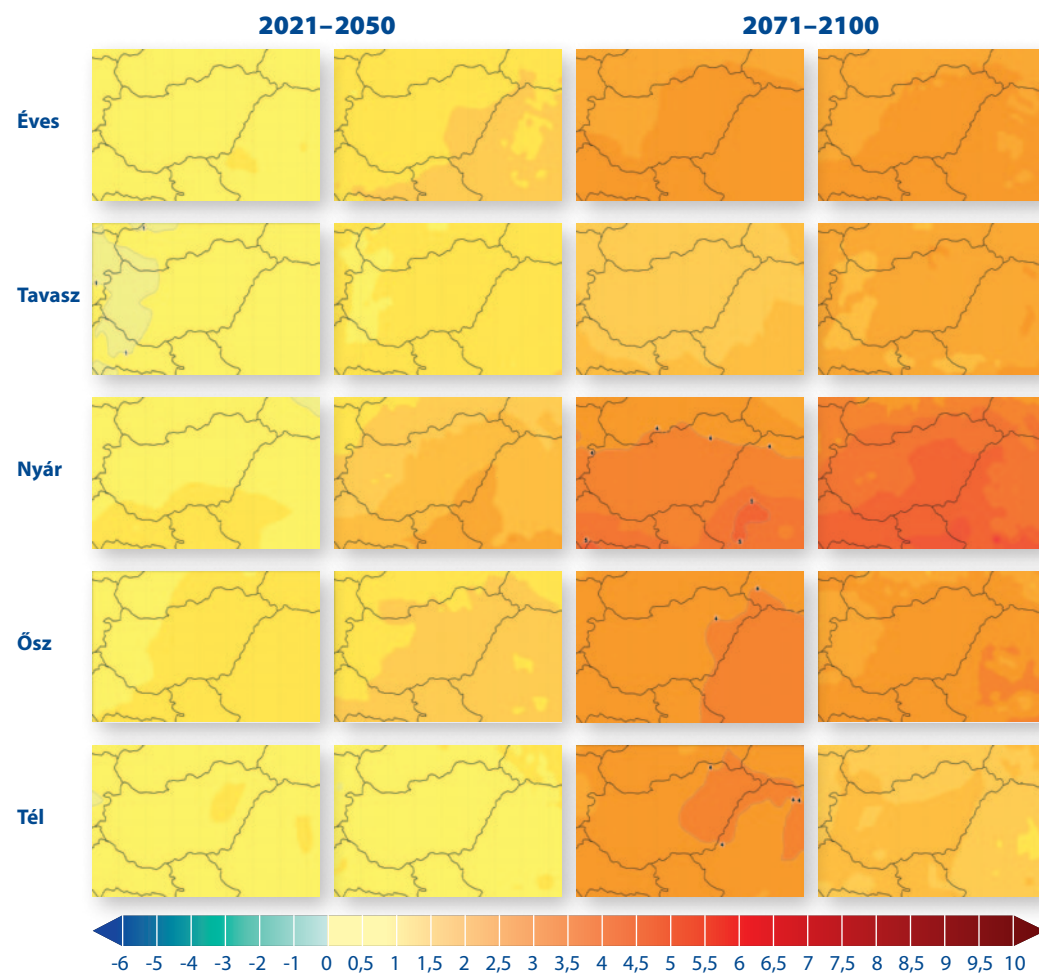
Az OMSZ-nál használt regionális klímamodellek Kárpát-medencére vonatkozó projekciós eredményei

Az ALADIN-Climate és REMO regionális éghajlati modellek nemcsak a fizikai folyamatok leírására alkalmazott numerikus sémáikban és parametizációs eljárásaikban különböznek, de a velük végrehajtott szimulációk is több tekintetben eltérnek (1-2. táblázat). Mindazonáltal mindegyik kísérlet azt szimulálja, hogyan módosul a XXI. században a Kárpát-medence éghajlata – azaz a modellkísérletek együttes vizsgálata lehetővé teszi azt, hogy számszerűsítsük a projekciókban lévő bizonytalanságokat. Ugyanis, ha egy adott éghajlati vonatkozásban a modellek jó egyezést mutatnak, akkor a szimulációk megbízhatósága nagyobb, ahol viszont eltérők az eredmények, ott a projekciók nagyobb bizonytalansággal terheltek. Az alábbiakban a csapadékra és hőmérsékletre vonatkozó eredményeket két jövőbeli időszakra, 2021–2050-re és 2071–2100-ra koncentrálva, együttesen mutatjuk be, a változásokat pedig minden esetben az 1961–1990 időszak szimulált átlagaihoz viszonyítva fejezzük ki. A jövőbeli eredmé-

nyeket tehát a korábbi referencia-időszaktól vett eltérések formájában adjuk meg annak érdekében, hogy a múltbeli és jövőbeli szimulációk átlagainak különbsége révén a szisztematikus modellhibákat kiküszöböljük (feltételezve, hogy a múltbeli és a jövőbeli hibatulajdonságok megegyeznek).

Hőmérséklet

A két regionális klímamodellel „egyetért” abban, hogy a XXI. században folytatódik az átlaghőmérséklet emelkedése a Kárpát-medencében, mégpedig minden évszak, időszak és modell esetében statisztikailag szignifikáns módon (azaz az évek közötti változékonyság nem haladja meg a változás mértékét) (8. ábra). A növekedés abban a tekintetben folyamatos, hogy a vizsgált 2071–2100 időszakban ez nagyobb mértékű (átlagosan 3,5 fok), mint a korábbi, 2021–2050 időszakban (amikor 1,7 fok az átlagos változás). Mindez azonban nem jelenti



8. ábra: éves és évszakos átlaghőmérséklet-változás (°C-ban) a két alkalmazott regionális klímamodellel eredményei alapján a 2021–2050 és 2071–2100 időszakban az 1961–1990 időszak modellátlagaihoz képest

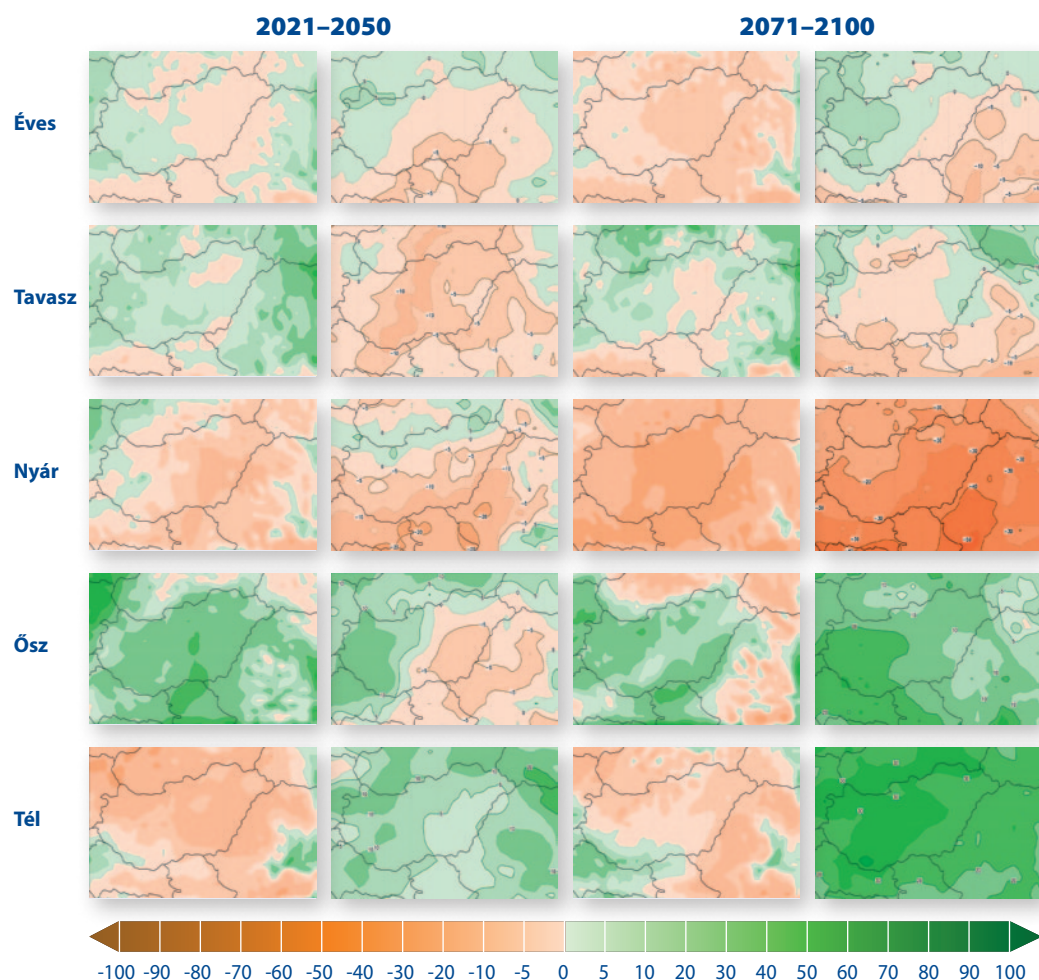
azt, hogy ez minden egyes évre érvényes lesz: továbbra is lesznek az 1961–1990-es átlagnál hűvösebb évek és évszakok. A melegedés pontos mértékében eltérnek az egyes modelleredmények, különösen az évszaki tendenciákat figyelembe véve. A legnagyobb változásokat nyárra vetítik előre: a 2021–2050 időszakban 1,4-2,6 fok, míg az évszázad utolsó évtizedeire 4,1-4,9 fokos változásra számíthatunk. A hőmérséklet-emelkedés területi eloszlását tekintve a projekciók egységesek abban, hogy az ország keleti és déli területein kell nagyobb mértékű melegedéssel számolnunk.

Csapadék

A csapadék megváltozása tekintetében a kép már kevésbé egyértelmű, mint a hőmérsékletnél, mert a modellek eredményei még kevesebb aspektusban egyeznek meg, ráadásul a változások csak néhány esetben bizonyultak statisztikailag szignifikánsnak. A 2021–2050 időszakban az éves csapadékösszeg változatlanosságában és a nyári csapadékatlag 5-10 %-ot elérő csökkenésében jobbra egységesek a projekciók

(9. ábra). Vannak azonban olyan területek is (elsősorban északon), ahol a modell-eredmények kismértékű nyári csapadéknövekedés lehetőségére hívják fel a figyelmet. Tavasszal és télen a két modell teljesen eltérő jövőképet ad: a 10 %-ot meg nem haladó mértékű növekedés, illetve a hasonló arányú csökkenés mindkét évszakban egyaránt lehetséges. Ősszel országos átlagban a növekedés lesz jellemző, de az egyes tájak esetében itt is vannak eltérések a projekciók között.

Az évszázad végére az éves csapadékatlag csökkenése mindkét modell szerint elérheti az 5 %-ot. Az évszázad közepén tapasztalt évszaki változások tovább folytatódhatnak, de nem minden esetben erősödő jelleggel. Nyáron a két modellkísérlet alapján 20 %-ot meghaladó csökkenés várható az ország egész területén. Télen az egyik modell eredményei alapján továbbra is elképzelhető 5 %-ot meghaladó csökkenés, a másik modell viszont 30 %-os növekedést valószínűsít. Ezt az évszadvégi téli növekvő tendenciát erősítik meg egyébként az európai PRUDENCE projekt (<http://prudence.dmi.dk>) durvább felbontású modelleredményei is.



9. ábra: éves és évszaki csapadékösszeg relatív változása (%-ban) a két alkalmazott regionális klímamodell eredményei alapján a 2021–2050 és 2071–2100 időszakban az 1961–1990 időszak modellátlagaihoz képest

Szélsőségek vizsgálata

A klímamodellek és ezáltal a klímaváltozás jellemzésének fontos része az éghajlat átlagos viselkedésének tanulmányozása mellett a szélsőségek leírása is. Ehhez több nemzetközi, klímaváltozással foglalkozó program és projekt keretén belül (például a CCL/CLIVAR/JCOMM – Commission for Climatology of WMO/Climate Variability and Predictability Research Programme/Joint WMO-IOC Technical Commission

for Oceanography and Marine Meteorology –, az ECA&D projekt, illetve különböző meteorológiai szolgálatok kutatócsoportjai, mint a holland KNMI vagy a brit Hadley Centre) számos klímaindexet definiáltak. Az extrém indexek definíciói elérhetőek a <http://www.clivar.org/organization/etccdi/indices.php> honlapon.

Jelölés	Név	Definíció	Egység
FD	fagyos napok száma	$T_{min} < 0 \text{ °C}$	nap
CFD	egymást követő fagyos napok évi maximális száma	azon időszakok hossza, amikor $T_{min} < 0 \text{ °C}$	nap
TX0LT	téli napok száma	$T_{max} < 0 \text{ °C}$	nap
TN-10LT	zord napok száma	$T_{min} < -10 \text{ °C}$	nap
TN20GT	túl meleg éjszakák száma	$T_{min} > 20 \text{ °C}$	nap
SU	nyári napok száma	$T_{max} > 25 \text{ °C}$	nap
TX30GE	hőszónapok száma	$T_{max} \geq 30 \text{ °C}$	nap
TX35GE	forró napok száma	$T_{max} \geq 35 \text{ °C}$	nap
HEAT	hőhullámok (1., 2. és 3. fokú)	$T_{átlag} \geq 25 \text{ °C}$ 1 napig / 3 napig vagy $T_{átlag} \geq 27 \text{ °C}$ 1 napig / 3 napig	nap
CDD	egymást követő száraz napok éves maximális száma	azon időszakok hossza, amikor $R_{nap} < 1 \text{ mm}$	nap
CWD	egymást követő csapadékos napok évi maximális száma	azon időszakok hossza, amikor $R_{nap} \geq 1 \text{ mm}$	nap
RR0.1	0,1 mm csapadékot meghaladó napok száma	$R_{nap} \geq 0,1 \text{ mm}$	nap
RR1	1 mm csapadékot meghaladó napok száma	$R_{nap} \geq 1 \text{ mm}$	nap
RR5	5 mm csapadékot meghaladó napok száma	$R_{nap} \geq 5 \text{ mm}$	nap
RR10	nagy csapadékú napok száma	$R_{nap} \geq 10 \text{ mm}$	nap
RR20	extrém csapadékú napok száma	$R_{nap} \geq 20 \text{ mm}$	nap
RX1	az év során mért legnagyobb 1 napi csapadék	$\max(R_{nap})$ egy évben	mm
RX5	az év során mért legnagyobb 5 napi csapadék	$\max(R_{i,i+1,i+2,i+3,i+4})$ egy évben	mm
SDII	napi csapadékinzentiási index	teljes csapadékösszeg/csapadékos napok száma ($R_{nap} \geq 1 \text{ mm}$)	mm/nap
SPI	standardizált csapadék index	éves vagy évszaki szinten: $(R - R_{átlag})/\text{szórás}$	–
CEI	extrém éghajlati index	összetett: a szélsőségek által sújtott területet vizsgálja	–

3. táblázat: a Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztályon használt extrém éghajlati indexek

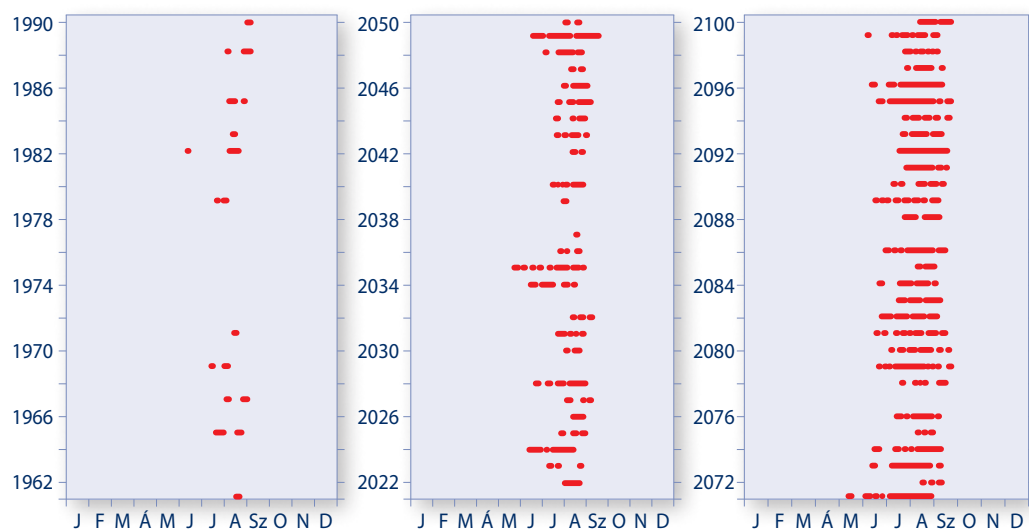


A Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztályon egyelőre ezekből 11 csapadékkal és 9 hőmérséklettel kapcsolatos indexet, illetve egy komplex mutatót elemeztünk, de terveink között szerepel további, hazánkban kevésbé elterjedt indexek számítása és elemzése is. Az általunk alkalmazott indexeket a **3. táblázat** foglalja össze.

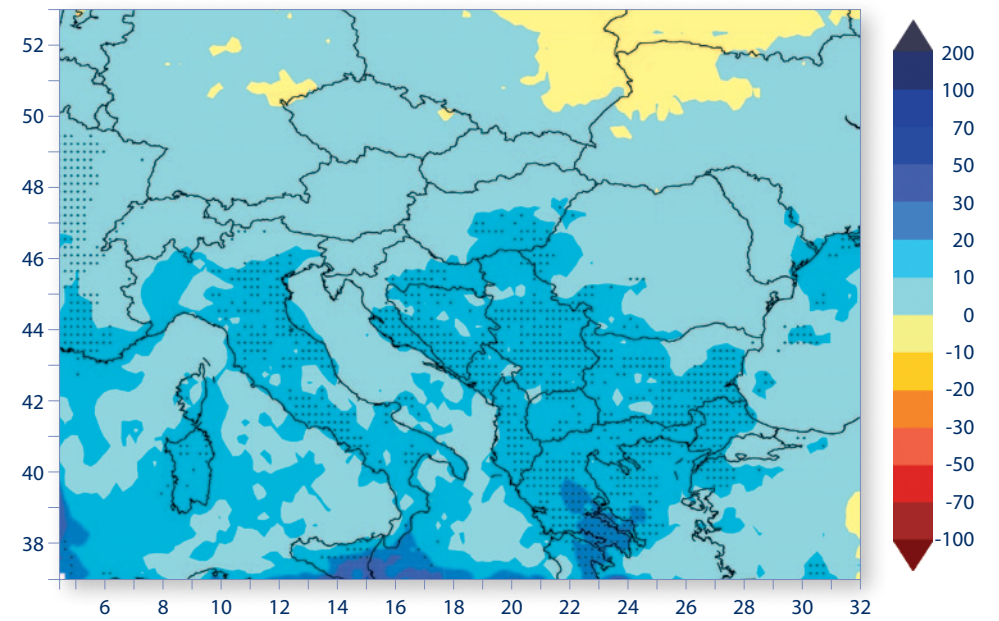
Az Éghajlati Elemző Osztállyal közösen különböző napi felbontású, rácsponti adatbázisokat elemeztünk. A Kárpát-medence területére vizsgáltuk az OMSZ által létrehozott HUGRID elnevezésű adatbázist, az ECA&D legújabb adatállományát, illetve a két, nálunk futtatott regionális klímamodellel (ALADIN-Climate és REMO) eredményeit különböző időszaka-

kokra. Ahogy az átlagos éghajlati viselkedésnél, úgy az extrém indexeknél is fontos a változás (vagy éppen a referencia-időszaktól vett hiba) szignifikanciáját vizsgálni. Ezt statisztikai vizsgálatokkal (Welchteszttel, illetve t-próbával) végeztük (http://www.statsdirect.com/help/statsdirect.htm#parametric_methods/ptt.htm).

A hazai hatástanulmányokat is elsősorban az itt megnevezett indexekre alapozzák, ám néha speciális igényeket (további származtatott indexet számolva) kell kielégítenünk, hiszen ma már egyre több szektor alapozza döntéseit regionális klímamodellek eredményeire épülő, kvantitatív hatásvizsgálatokra.



10. ábra: az ország területének legalább 10 %-án előforduló forró napok gyakorisága az ALADIN-Climate modell szerint a különböző időszakokban (1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100). Az ábráról a 30 éves változékonyság olvasható le, de a konkrét évenkénti gyakoriság nem.



11. ábra: a napi csapadékkéntességi index REMO modell által szimulált változása (%-ban) 2021–2050-re az 1961–1990-es kontroll-időszakhoz képest (a pontok a szignifikáns változások területeit jelölik)

Példaként láthatjuk az ország területének legalább 10%-án előforduló forró napok (azon napok, amikor a maximumhőmérséklet 35 °C felett van) gyakoriságát az ALADIN-Climate modell alapján (**10. ábra**), illetve a REMO modell szerint vett napi csapadékkéntességi index várható változását (%-ban) 2021–2050-re az 1961–1990-es kontroll-időszakhoz képest (**11. ábra**). Az utóbbi térképen a szignifikáns változás pontokkal van jelölve.

A **10. ábrán** jól látszik, hogy míg a kezdeti, XX. század végi szimulált kontrollidőszakban az ország területének legalább 10%-án ritkán (természetesen főleg július-augusztusban) fordult elő 35 °C feletti

hőmérsékletű nap, addig a XXI. század első felében és végén már majdnem minden évben májustól szeptemberig bármikor előfordulhat. Az első és második időszak közötti változás jóval jelentősebb, mint a második és harmadik időszak közötti.

A **11. ábra** a korábbi, európai projektek durvább (50 km és afeletti) felbontású modellfuttatásainak eredményeit támasztja alá: a napi csapadékkéntességi index a REMO modell futtatási területének nagy részén növekszik. Ez azt jelenti, hogy a jövőben egy csapadékos napra átlagosan nagyobb csapadékmennyiség jut. Ez a növekedés Magyarországon 10% körüli, de csak az Alföld déli részén szignifikáns.



Tervek

A klímamodellezés terén számos további tervünk, elképzelésünk van a megkezdett munka folytatásához, melyek közül az alábbiakban a legfontosabbakat és a legérdekesebbeket emeljük ki.

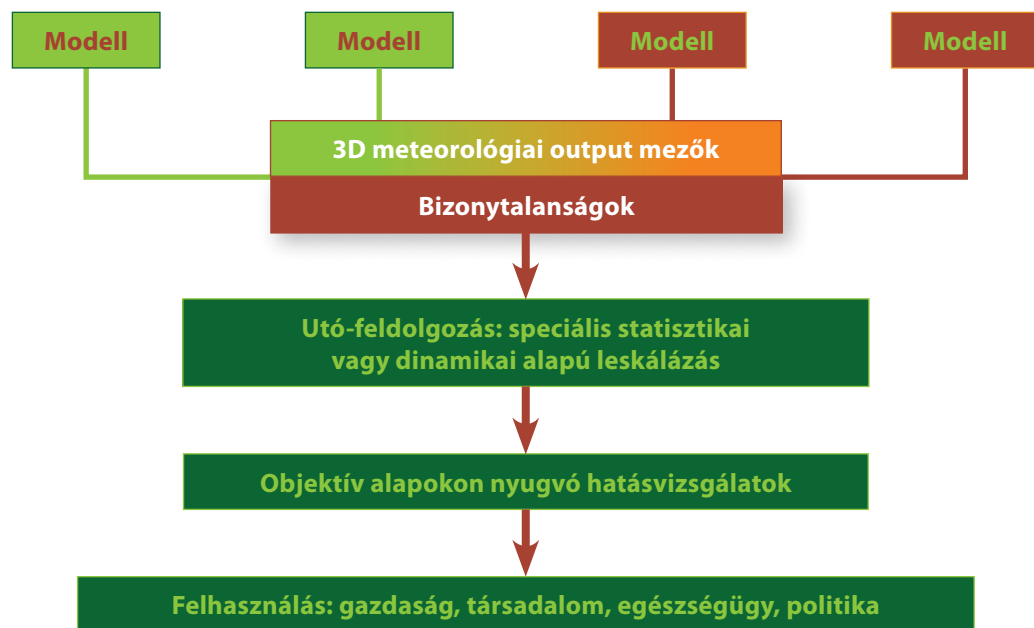
A magyarországi regionális klímamodellek (ALADIN-Climate, PRECIS, RegCM, REMO) együttes kiértékelése: a Magyarországon rendelkezésre álló négy regionális klímamodell (elsősorban) jövőre vonatkozó eredményeit együttesen értékeljük ki (ensemble technika), azaz számszerűsítjük az egyes projekciókat és a bennük rejlő bizonytalanságokat. A munkát az OMSZ és az ELTE Meteorológiai Tanszéke közösen valósítja meg.



Tervezzük a jelenleg rendelkezésre álló modell-kísérletek további bővítését, kiegészítését, amely az alábbi munkák elvégzését jelenti a 2010–2012-es évek időszakában:

1. a jelenleg 25 km-es horizontális rácsfelbontású REMO modell 10 km-es felbontású változatának előkészítése (a megfelelő tartomány meghatározása) és futtatása az 1951–2100-as időszakra,
2. az ALADIN-Climate modell optimális futtatási tartományának meghatározása és a 10 km-es modellfuttatások ismételt végrehajtása (egy, a jelenleginél újabb modellváltozattal).

További kapcsolatokat szeretnénk kiépíteni a nagyközönséggel, illetve a klímaváltozás hatásainak vizsgálóival annak tudatosítása érdekében, hogy az éghajlati rendszer jövőbeli alakulásának vizsgálatára az egyedüli járható út a dinamikus modellezés, és az éghajlati hatásvizsgálatokat regionális klímamodellek eredményeire kell alapozni (12. ábra) az eredményes alkalmazkodási feladatok megtervezéséhez. A kapcsolattartás egyik tervezett eszköze egy kérdőív összeállítása, mely révén felmérhetnénk a társadalom éghajlatváltozással kapcsolatos ismereteit és a jellemző tévhiteket.



12. ábra: a regionális klímamodellek hatásvizsgálatokra való alkalmazhatóságának sematikus folyamatábrája



További információk a hazai klímadinamikai tevékenységről

(Az alábbi cikkek, előadások elérhetők a következő címen: <http://www.met.hu>.)

Csima, G. and Horányi, A., 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* 112, 3-4 (különszám), 155-177.

Csima, G., 2009: High resolution experiments with the ALADIN-Climate regional climate model. Előadás a European Meteorological Society 9. éves találkozóján, Toulouse (Franciaország).

Horányi, A., Csima, G., Szabó, P. és Szépszó, G., 2008: Regionális klímamodellek és eredményeik alkalmazhatósága éghajlati hatásvizsgálatokra, I-II. rész. Szakmai előadás a Corvinus Egyetemen az „Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz” munkacsoport számára, Budapest.

Horányi, A., Csima, G., Szabó, P., Szépszó, G., Bartholy, J., Hunyady, A., Pieczka, I., Pongrácz, R., and Torma, Cs., 2009: Application of a regional climate model mini-ensemble for the Carpathian Basin. Előadás a European Meteorological Society éves találkozóján, Toulouse (Franciaország).

Horányi, A., Krüszselyi, I., Szabó, P. és Szépszó, G., 2010: A klímaváltozás a Balatonnál a meteorológiai számítások tükrében. Szakmai előadás a Balatonnál foglalkozó szakemberek részére, Siófok.

Szabó, P., 2008: Comparison of precipitation and temperature fields in different data sets used for evaluating Regional Climate Models at the Hungarian Meteorological Service. *Kutatási beszámoló*.

Szabó, P., 2009: The evaluation of extreme precipitation and temperature indices based on regional climate models at the Hungarian Meteorological Service. Előadás a European Meteorological Society 9. éves találkozóján, Toulouse (Franciaország).

Szépszó, G., 2008: Regional change of extreme characteristics over Hungary based on different regional climate models of the PRUDENCE project. *Időjárás* 112, 3-4 (különszám), 265-284.

Szépszó, G. and Horányi, A., 2008: Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary. *Időjárás* 112, 3-4 (különszám), 203-231.

Hivatkozások

- van Engelen, A., Klein Tank, A., van der Schrier, G., and Klok, L., 2008. European Climate Assessment & Dataset (ECA&D), Report 2008, „Towards an operational system for assessing observed changes in climate extremes”. KNMI, De Bilt, The Netherlands, 68pp. http://eca.knmi.nl/documents/ECAD_report_2008.pdf
- Mitchell, T. D. and Jones, P. D., 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. International Journal of Climatology 25, 693–712. http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid/CRU_TS_2_1.html
- Mitchell, T. D., Carter, T. R., Jones, P. D., Hulme, M., and New, M., 2004: A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100). Working Paper 55. Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, UK. http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid/CRU_TS_1_2.html
- Szentimrey, T., Bihari, Z. and Szalai, S., 2005: Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis (MISH). Geophysical Research Abstracts 7.
- Uppala, et al., 2005: The ERA-40 re-analysis. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society 131, 2961–3012. <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-40>

Kapcsolódó weboldalak

- **OMSZ** <http://www.met.hu>
- **CECILIA** <http://www.cecilia-eu.org>
- **CLAVIER** <http://www.clavier-eu.org>
- **CRU** <http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid>
- **ECA&D** http://eca.knmi.nl/documents/ECAD_report_2008.pdf
- **ECCONET** <http://www.tmlleuven.be/project/econet/home.htm>
- **ENSEMBLES** <http://ensembles-eu.metoffice.com>
- **ERA** <http://www.ecmwf.int/research/era>
- **IPCC** <http://www.ipcc.ch>
- **PRUDENCE** <http://prudence.dmi.dk>

Összeállította:

Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály
Horányi András, Krüzselyi Ilona, Szabó Péter, Szépszó Gabriella

Kapcsolat: klimadinamika@met.hu



ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLAT

1024 Budapest, Kitaibel Pál u.1.
Tel.: (1) 346-4600 • Fax: (1) 346-4669
<http://www.met.hu> • e-mail: mets@met.hu

Postacím:
Országos Meteorológiai Szolgálat
1525 Budapest, Pf.: 38.