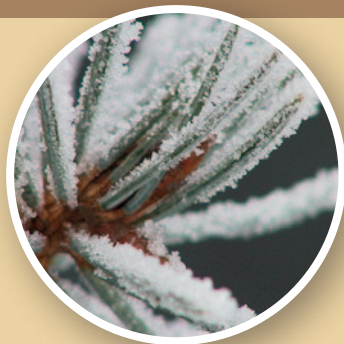


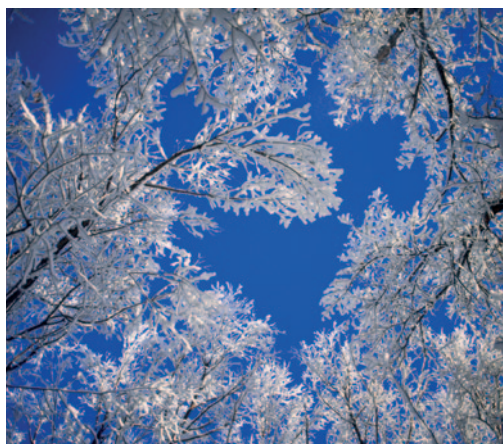
Összefoglaló Magyarország éghajlatának várható alakulásáról

*Készült az Országos Meteorológiai Szolgálat
és az ELTE Meteorológiai Tanszék
regionális klímamodell-eredményeinek
együttes elemzése alapján (2010)*



Bevezetés

Általánosan elfogadott tény, hogy az éghajlati rendszer összetett működésének tanulmányozására a numerikus modellezés eszköztára szolgált megfelelő, objektív módszert. A **globális numerikus éghajlati modellek** képesek a rendszer egyes összetevői (a légkör, az óceán, a szárazföld, a jégtakaró és az élővilág) fizikai folyamatainak 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 választ 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 számszerűsítik, hogy meghatározzák mindezen tényezőknek (a népesség, az energiafelhasználás, az ipari és mezőgazdasági szerkezet stb. változásainak) az éghajlati rendszerre gyakorolt „sugárzási kényszerét”, azaz kiszámítják a hatással egyenértékű üvegházgáz- és aeroszol-kibocsátást, valamint az ennek megfelelő koncentrációt. Az ezekhez kapcsolódó bizonytalanság 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 (forgatókönyvet) állítottak fel, melyek között vannak optimista, pesszimista vagy átlagosnak tekinthető változatok, s ezek figyelembevételével készítenek globális **projekciókat** a Föld egészére nézve (ezeket a modell-szimulációkat nem nevezzük előrejelzéseknek, éppen az említett feltételes voltuk miatt).



Napjainkra a nagy klímakutató központokban fejlesztett globális éghajlati modellek kidolgozottsága elérte azt a szintet, hogy ezek a modellek képesek megbízhatóan leírni az éghajlati rendszer eleminek viselkedését a közöttük lévő összetett kölcsönhatásokkal együtt, továbbá kiválóan használhatók az éghajlatváltozás planetáris (azaz 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 (térbeli felbontásuk például többnyire még ma sem haladja meg a 100 km-t). A részletek feltárására ezért úgynevezett regionalizációs (leskálázási) módszerekkel élünk, amelyek segítségével egy, az érdeklődésünkre számot tartó területen finomíthatjuk a nagyskálájú globális információkat. A globális információk regionális finomítására Magyarországon regionális éghajlati modelleket használunk, melyek – miként a rövidtávú időjárás-előrejelzésben – egy kisebb tartományra készítenek projekciókat a globális modellek eredményeit határfeltételekként felhasználva.

A továbbiakban bemutatjuk a hazai klímamodellzési tevékenység alapjait, majd a négy Magyarországon alkalmazott regionális klímamodell eredményeit összefoglaló együttes kiértékelést, amely során nemcsak Magyarország éghajlatának várható főbb jellemzőit igyekszünk felvázolni, hanem az azokban rejlő bizonytalanságokat is. A kiadvány végén a gyakran feltett kérdésekre próbálunk tudományos alaposságú választ adni.

Hazai klímadinamikai vizsgálatok

Az elmúlt néhány évben **négy regionális klímamodellt** adaptáltunk az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (<http://www.met.hu>) és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén (<http://nimbus.elte.hu>), melyek az alábbiak:

■ az ARPEGE-Climat globális általános cirkulációs modell alapján a Météo France által nemzetközi együttműködésben kifejlesztett **ALADIN-Climate** regionális klímamodell (OMSZ);

■ a UK Met Office Hadley Centre kapcsolt óceán-légkör általános cirkulációs HadCM3 modellje alapján kifejlesztett **PRECIS** regionális légköri klímamodell (ELTE);

■ az MM4 mezoskálájú modelltől a triezsti Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP) által kifejlesztett **RegCM** regionális klímamodell (ELTE);

■ a Német Meteorológiai Szolgálat korábbi időjárás- és az ECHAM4 globális általános cirkulációs modell ötvezésével a hamburgi Max Planck Intézet által kifejlesztett **REMO** modell (OMSZ).

A modellekkel mindkét intézményben először a múltira vonatkozóan hajtottunk végre kísérleteket, és a validációt a jövőbeli változásokra vonatkozó

projekciók követték. A modell-szimulációk 25, illetve 10 km-es felbontással készültek – a finomabb felbontású modellekkel kisebb, a 25 km-es felbontású esetekben nagyobb, a Kárpát-medencét magában foglaló tartományokra. A modellek és a modellkísérletek legfontosabb jellemzőit az **1. táblázat** foglalja össze.

Látható tehát, hogy a négy regionális modell nemcsak a fizikai folyamatok leírására alkalmazott numerikus sémáiban és parametizációs eljárásaiban különbözik, de a velük végrehajtott szimulációk is több tekintetben eltérnek. 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 adott tekintetben a modellek jó egyezést mutatnak, akkor a szimulációk bizonyossága nagyobb, ahol viszont eltérők az eredmények, ott a projekciók nagyobb bizonytalansággal terheltek. A továbbiakban a csapadéokra és hőmérsékletre vonatkozó eredményeket két jövőbeli időszakra, 2021–2050-re és 2071–2100-ra koncentrálna három, illetve négy modell eredményei alapján **együttesen** mutatjuk be; a változásokat minden esetben az 1961–1990 időszak szimulált átlagaihoz viszonyítva fejezzük ki.

Modell	ALADIN	PRECIS	RegCM	REMO
Időszak	1961–2100	1961–1990 2071–2100	1961–1990 2021–2050 2071–2100	1951–2100
Felbontás	10 km	25 km	10 km	25 km
Forgatókönyv	A1B	B2*	A1B	A1B

1. táblázat: a regionális éghajlati modellekkel végrehajtott modell-szimulációk jellemzői

* A PRECIS modellel készült egy további modellkísérlet az A2 kibocsátási forgatókönyv figyelembevételével, ennek eredményeit azonban nem használtuk fel a jelen tanulmány összeállításakor.

Eredmények

Hőmérséklet

A Magyarországon rendelkezésre álló regionális klímamodellek „egyértelműen” abban, hogy a XXI. században folytatódik az átlaghőmérséklet emelkedése a Kárpát-medencében, mégpedig minden évszak, időszak és modell esetében statisztikailag szignifikáns módon (**2. táblázat**). A növekedés

abban a tekintetben folyamatos, hogy a vizsgált 2071–2100 időszakban nagyobb mértékben (átlagosan 3,5°C-kal) várható, mint a korábbi 2021–2050 időszakban (amikor 1,5 fok az átlagos változás). Mindez azonban nem jelenti 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 0,7–2,6°C, míg az évszázad utolsó évtizedeire 3,5–6,0°C-os változásra számíthatunk.

A hőmérséklet-emelkedés területi eloszlását tekintve a projekciók egységesek abban, hogy az ország keleti és déli területein kell nagyobb mértékű melegedéssel számolnunk, míg az északnyugati tájakon valamivel kisebb változás valószínű. A hőmérsékleti szélsőségek alakulása az átlagos viszonyokhoz

hasonlóan követi a melegedő tendenciát és az esetek többségében statisztikailag szignifikáns (utóbbi vizsgálatokat csak az ALADIN és REMO modellekre végeztük el): a meleg szélsőségek, mint a nyári, a hőség- és a forró napok, valamint a hóhullámok gyakorisága szignifikáns módon növekszik, az évszázad közepén 100-200%-kal, az évszázad végére 300-400%-kal, és ez a növekedés az északi, északnyugati és északkeleti (hűvösebb) tájainkon intenzívebb. Ugyanakkor a hideg szélsőségek előfordulása csökken, sőt, vannak olyan területek az országban (például délen), ahol már a 2021–2050 időszakban mindössze évi 1-2 szélsőségesen hideg napra kell számítanunk átlagosan (azaz amikor a minimumhőmérséklet -10°C alá csökken).

	Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
2021–2050	1,1–1,9	1,1–1,6	0,7–2,6	0,8–2,0	1,1–1,3
2071–2100	3,1–4,0	2,3–3,1	3,5–6,0	3,0–3,9	2,5–3,9

2. táblázat: a magyarországi átlaghőmérséklet változása (°C-ban)

Csapadék

A csapadék megváltozása tekintetében a kép már jóval kevésbé egyértelmű, mert a modellek eredményei nem minden aspektusban egyeznek meg, ráadásul a változások csak igen kevés esetben bizonyultak statisztikailag szignifikánsnak (azaz az évek közötti változékonyság meghaladja a változás mértékét). A 2021–2050 időszakban az éves csapadék-összeg nagyon kismértékű (5%-ot többnyire nem meghaladó) és a nyári csapadékátlag 5-10%-ot elérő csökkenésében jobbra egységesek a projekciók (**3. táblázat**). Vannak azonban olyan területek is (észak-északkeleten), ahol egyes modelleredmények a nyári csapadéknövekedés valószínűségére hívják fel a figyelmet. Ebben az időszakban a modellek többsége alapján télen csökkenő tendencia várható, mégpedig az ország keleti és északnyugati tájain 10%-ot meghaladó mértékű; csupán egyetlenegy modell valószínűsít inkább növekedést az ország nagy részén. Az átmeneti évszakok esetében tavasszal a csökkenés, ősszel inkább növekedés lesz jellemző.

	Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
2021–2050	(-7)–0	(-10)–(+3)	(-5)–(-2)	(-4)–(+14)	(-10)–(+7)
2071–2100	(-21)–(+3)	(-8)–(+2)	(-43)–(-18)	(-18)–(+19)	(-6)–(+31)

3. táblázat: a magyarországi csapadékösszeg átlagos változása (%-ban)

A szélsőséges jelenségek tekintetében, míg a hőmérsékleti extrémumok terén szignifikáns változások szemtanúi lehettünk, addig a csapadékokkal kapcsolatos szélsőségek változásai a legtöbb esetben nem szignifikánsak. Ha a csapadékontenzitást tekintjük (tehát az év során lehullott csapadékmennyiség és a csapadékos napok számának hányadosát), akkor azt tapasztaljuk, hogy ez az egész országban növekedni fog (szignifikáns módon a 2021–2050 időszakban még csak az ország nyugati tájain, de az évszázad végére szinte mindenütt). Ha ezt összevetjük azzal, hogy az éves csapadékbevitel várhatóan csökken a jövőben, akkor mindez arra utal, hogy a csapadékos napok száma is csökkenni fog, mégpedig 2021–2050-ben

10%-kal, az évszázad végére pedig 10-20%-kal. Ugyanakkor a vizsgálatok azt is megmutatták, hogy a nagy (20 mm-t meghaladó) csapadékkal járó események száma várhatóan ezzel ellentétesen és ennél nagyobb mértékben változik, vagyis növekedni fog. Az egymást követő száraz napok számára vonatkozóan a modelleredmények által leírt változások az évszázad közepére nem egyértelműek: ugyanolyan valószínűséggel jeleznek kismértékű csökkenést, mint növekedést. Az évszázad végére azonban már statisztikai értelemben is szignifikáns növekedés várható az ország egyes tájain (főként keleten), azaz ezzel megnőhet a szárazság és aszály lehetősége.



Összefoglalás

Hőmérséklet

- A változások statisztikailag szignifikánsak.
- Melegedés Magyarországon a két időszakban: átlagosan 1,5 illetve 3,5°C.
- Legnagyobb változás nyáron: a 2021–2050 időszakra a hőmérséklet-emelkedés mértéke elérheti a 2°C-ot, az évszázad végén pedig meghaladhatja a 3,5°C-ot.
- A déli és keleti területeken nagyobb mértékű melegedés várható.
- A meleg szélsőségek gyakorisága erőteljesen növekszik, a hideg szélsőségek előfordulása kisebb mértékben csökken.

Csapadék

- Kevesebb a statisztikailag szignifikáns változás.
- Mindkét időszakban az éves, a nyári és a tavaszi csapadék csökkenése, valamint az őszi csapadék növekedése valószínű.
- A 2021–2050 időszakban a téli csapadék csökkenését, míg 2071–2100-ban a növekedését valószínűsítik a modellek.
- Mindkét időszakban a csapadékontenzitáció növekedése várható (de csak az évszázad végén szignifikáns): a csapadékos napok száma csökken, a nagy csapadékok gyakorisága növekszik.
- Az egymást követő száraz napok száma nem változik a 2021–2050 időszakra, majd az évszázad végére növekedés várható (az ország keleti részén szignifikáns módon).

Gyakran felmerülő kérdések

1. A közelmúltban tapasztalt évszakok szélsőséges sajátosságai már az éghajlatváltozásnak tudhatók be? Nem mond ellent a jelzett tendenciának egy adott évszak ezzel ellentétes viselkedése?

Konkrét példa: Ön szerint 2009/2010 hosszú és az átlagosnál hidegebb tele nincs ellentmondásban a globális felmelegedéssel?

Egyedi évszakok, évek alapján nem vonhatunk le következtetéseket az éghajlatról. Az éghajlati jellemzőket hosszabb, legalább 30 éves időszakok átlagában vizsgáljuk, s a változásokat általában két, harmincéves időszak összehasonlításával fejezzük ki. Egy-egy, adott szempontból kiugró évszakra, évről évről tehát nem beszélünk, hiszen minden esetben átlagos változásokról beszélünk. Azaz egy olyan konkrét állítás, hogy az átlaghőmérséklet a jövőben emelkedni, a nyári átlagcsapadék csökkenni fog, nem jelenti azt, hogy a jövőben ne fordulhatna elő az átlagosnál hűvösebb év, illetve az átlagosnál is csapadékosabb nyár.

2. Az éghajlatváltozással magyarázható-e a közelmúltban tapasztalt egy-egy szélsőséges jelenség?

Konkrét példa: A 2006. augusztus 20-i rendkívüli vihar tekinthető-e a globális felmelegedés következményének?

Egyedi szélsőséges jelenségek alapján nem vonhatunk le messzemenő következtetéseket az éghajlatról. Az éghajlati jellemzőket hosszabb, legalább 30 éves időszakok átlagában vizsgáljuk, s a változásokat két, harmincéves időszak összehasonlításával fejezzük ki (vagy trendvizsgálatot végzünk ennél is hosszabb, százéves időszakokra). Látható tehát, hogy egy-egy szélsőséges eseménynek nincsen egyedi jelentősége, minden esetben azt kell megvizsgálni, hogy az adott jelenség gyakorisága változott-e a kijelölt referencia-időszakhoz viszonyítva.



3. Milyen város éghajlatához fog leginkább hasonlítani egy adott magyarországi város éghajlata?

Konkrét példa: Azt hallottuk, hogy Budapest éghajlata néhány év múlva hasonló lesz, mint ami most Firenzében vagy Várnában jellemző.

Ezeket az állításokat általában egy-két éghajlati jellemző (általában csapadék és hőmérséklet), „együttállás” alapján fogalmazzák meg. Ezek a változók ugyan az éghajlatnak jellemzői, de nem meghatározói – egy adott hely (pont, térség) klímáját olyan tényezők alakítják ki, mint a földrajzi elhelyezkedés, óceánoktól való távolság, tengerszint feletti magasság, környező domborzat, szélviszonyok, és ezek között fizikailag nem lehetséges pontos párhuzamot vonni.

Másfelől, ha ezt a precíz megközelítést félretesszük, akkor is csak nagy körültekintéssel tehetünk hasonló

kijelentéseket, hiszen egy hely éghajlatát nem egy-két, de nagyon sok jellemző határozza meg, és kevés az esélye, hogy ezek mindegyike meg fog egyezni egy másik földrajzi hely viszonyaival.

4. Miből ered az éghajlati scenáriók bizonytalansága?

Egyrészt a társadalmi-gazdasági folyamatok (pl. a népesség alakulása, a gazdasági fejlődés üteme és régiókénti eloszlása, technológiai újítások széleskörű elterjedése, antropogén kibocsátások alakulása stb.) még néhány évtizedre előre is nehezen prognosztizálhatók, évszázados időskálán pedig még nagyobb az ezekből adódó bizonytalanság. Másrészt a klímamodellek is magukban foglalnak számos bizonytalansági forrást, mint például a kis tér- és időskálájú felhőfizikai folyamatok parametrizációja, mely értelemszerűen kihat a modell-szimulációkból származtatható csapadékmennyiségekre.



A munkában részt vettek:

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

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék:
Bartholy Judit, Pieczka Ildikó, Pongrácz Rita, Torma Csaba

Kapcsolat:

OMSZ: klimadinamika@met.hu

ELTE: bari@ludens.elte.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.