



Kisokos a klímamodell-eredmények gyakorlati felhasználására



ORSZÁGI
METEOROLÓGIAI
SZOLGÁLAT



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

SZÉCHENYI 2020

Európai Unió
Kohéziós Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Meteorológiai tájékoztatás

Éghajlati hatástanulmányok: eghajlat@met.hu, klimadinamika@met.hu

Éghajlati adatszolgáltatások, feldolgozások: klimaker@met.hu

Előrejelzés és egyéb szolgáltatások: service@met.hu

Központi elérhetőségek

Országos Meteorológiai Szolgálat

1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.

Tel.: (1) 346-4600

Fax: (1) 346-4669

e-mail: omsz@met.hu

Marcell György Főobszervatórium

1181 Budapest, Gillice tér 39.

Tel.: (1) 346-4600

Levegőtisztaság-védelmi Referencia Központ

1181 Budapest, Gillice tér 39.

Tel.: (1) 346-4600

Siófoki Viharjelző Obszervatórium

8600 Siófok, Vitorlás utca 17.

Tel.: (84) 310-466

e-mail: siofok@met.hu

www.met.hu

klimadat.met.hu

legszenyezettség.met.hu

aviation.met.hu

odp.met.hu

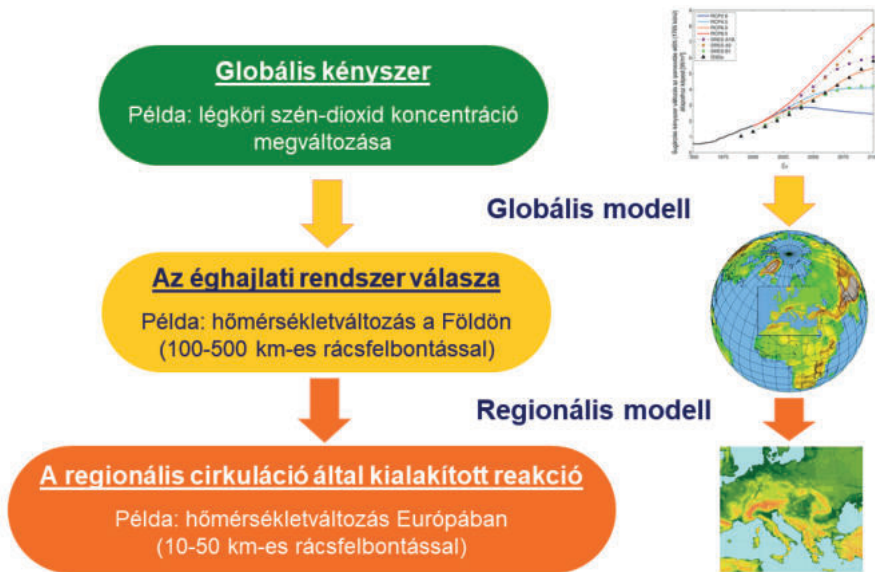


Kisokos a klímamodell-eredmények gyakorlati felhasználására

Bevezetés

Az éghajlat jövőbeli változása modellek segítségével vizsgálható. A modellezés során a kiválasztott területre egy térbeli rácsot illesztünk, s a meteorológiai változók időbeli fejlődését a rácspontokban követjük. A rácsátvólásnál kisebb skálájú folyamatokat a rácsponthoz tartozó értékek és egyéb összefüggések felhasználásával, parametrikus módszerek segítségével vesszük figyelembe.

A teljes földi rendszer viselkedését a légkörre, az óceánra, a jég- és hótakaróra, a szárazföldi felszínre, az élővilágra felírt modellek csatolásával létrehozott **kapcsolt globális éghajlati modellekkel** tanulmányozzuk. Kisebbségi területek (pl. egy kontinens, egy ország) változásainak feltárására **regionális éghajlati modelleket** használunk. Ezekkel a kiválasztott térség jellemzőit 10-50 km-es rácsfelbontással alkalmazásával írjuk le, figyelembe véve a tartományon kívül zajló folyamatokat is, amiről általában globális modellek eredményei adnak információt (1. ábra).

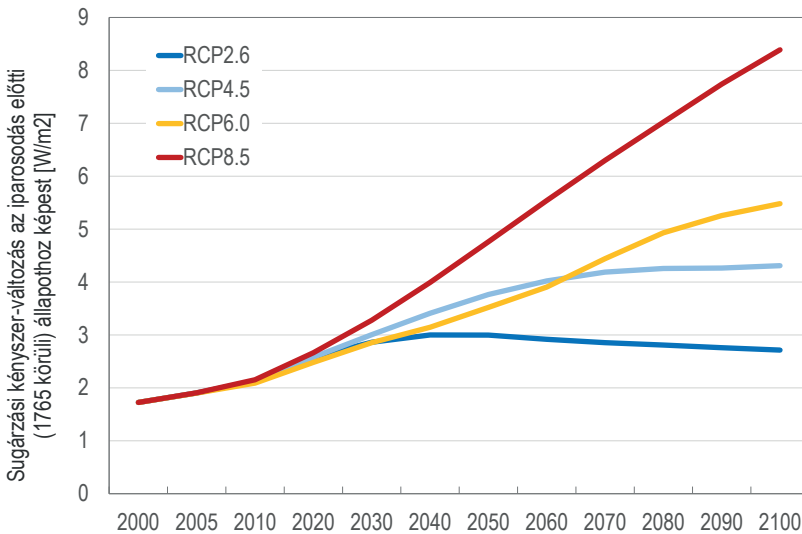


1. ábra. A regionális éghajlatváltozás vizsgálatának folyamata.

Az éghajlat jövőbeli viselkedésének modellezése **bizonytalanságokkal** terhelt, melyek az alábbi forrásokból származnak:

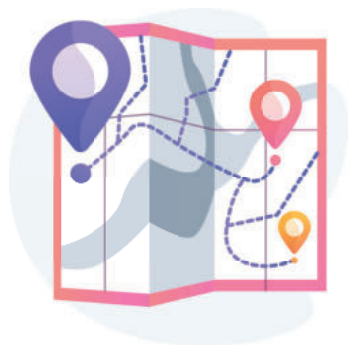
- 1. Természetes, belső változékonyság.** Az éghajlati rendszer belső tulajdonsága, melynek köszönhetően a rendszer külső kényszer nélkül is folyamatosan változik. Például ezzel magyarázható az átlagosnál melegebb és hidegebb évek egymást követő váltakozása.

2. **Modellbizonytalanság.** Ugyan minden klímamodell az éghajlati rendszer viselkedését jellemzi, az egyes modellek különböző közelítő módszereket használnak a fizikai folyamatok leírására. A legnagyobb eltérések a felhő- és a csapadékképződés leírásában vannak, így elsősorban ennek köszönhető a csapadékszimulációk nagyfokú bizonytalansága.
3. **Emberi tevékenység bizonytalansága.** A modellszimulációkban a természetes éghajlatalkító folyamatok mellett az emberi tevékenység hatását is figyelembe kell vennünk. Az antropogén tevékenységet meghatározó politikai, gazdasági és társadalmi folyamatok alakulását azonban nem tudjuk egyértelműen előrejelezni, így leírására különböző (pl. alacsony, magas, közepes mértékű kibocsátáshoz tartozó) forgatókönyveket definiáltak (2. ábra). A forgatókönyveket az éghajlati modellek az üvegházgázok és aeroszol részecskék koncentrációjának különböző jövőbeli alakulásaként veszik figyelembe, s az ezeken alapuló kísérleteket **projekcióknak** nevezzük.



2. ábra. Az emberi tevékenység jövőbeli alakulására vonatkozó forgatókönyvek, melyek a sugárzási kényszer változásán alapulnak. Pl. az RCP4.5 forgatókönyv szerint a XXI. század végére globálisan $4,5 \text{ W/m}^2$ energiátöbblet várható az iparosodás előtti szinthez képest. (Adatok forrása: IIASA)

A projekciós bizonytalanságok számszerűsítésének eszköze az **ensemble technika**, amikor **együttesen értékeljük több** – különböző modellekkel és forgatókönyvekkel elvégzett – **szimuláció eredményét**. Az összeállított szimuláció-együttes akkor reprezentálja jól a valós bizonytalanságot, ha minden fontos bizonytalanságtípust a súlyának megfelelően veszünk figyelembe. Az ilyen ensemble rendszerek készítése kiterjedt nemzetközi együttműködést igényel, mivel általában még a legnagyobb klímakutató központoknak is csupán arra van kapacitása, hogy az általuk fejlesztett modellt néhány scenárió figyelembevételével lefuttassák.



A klímaváltozásra való felkészüléshez a meteorológiai változások különböző területekre kifejtett hatásait célzott és objektív vizsgálatokkal mérjük fel, s ezek eredményei beépül(-het)nek az alkalmazkodással kapcsolatos stratégiai döntéshozatalba. A Kisokosban az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott módszertan alapján útmutatót adunk a klímamodellek eredményeinek felhasználására és a valószínűségi jellegű információk értelmezésére. Két jellemző felhasználói csoport egy-egy tipikus igényét követjük lépésről lépésre: *Modellező Miksa* egy hidrológiai modell segítségével folyóink hajózhatóságát vizsgálja a következő évtizedekre, míg *Tervező Tekla* a balatoni kerékpárút fejlesztéséhez végez környezeti hatástanulmányt, figyelembe véve a várható éghajlatváltozás hatását az épített elemekre. A példákban áttekintjük azokat a kérdéseket, amik felmerülnek az éghajlati modelleredményeken alapuló hatásvizsgálatok készítése során.



1. Milyen meteorológiai változókat használjunk a hatásvizsgálatainkban?

A vizsgálatok első lépésében meghatározzuk azokat a meteorológiai változókat, amelyek kiindulási információval szolgálhatnak a konkrét hatáselemzésekben. **A megfelelő éghajlati adatok összeállítása egy többlépcsős, iteratív-konzultatív folyamat**, amiben egyeztetjük és közelítjük a felhasználói igényeket, valamint a modelladatok kínálta lehetőségeket. Ennek során figyelembe vesszük a modelladatok térbeli felbontását, időbeli gyakoriságát, a modell által leírt meteorológiai változók körét.



Modellező Miksa egy hidrológiai modellt futtat és ennek eredményei segítségével tanulmányozza a Duna hajózhatóságának változását. A modellfuttatáshoz napi gyakoriságú adatokra van szükség elsősorban a csapadékra, a felszínközeli hőmérsékletre és szélre, a párolgásra, a sugárzásra és a lefolyásra vonatkozóan. A hidrológiai modell maga is rácsponthoz végezi a számításait, így az adatoknak egy a Duna vízgyűjtő területét lefedő rácson kell rendelkezésre állnia.



Tervező Teklán a kerékpárút használhatóságát befolyásoló meteorológiai tényezőkről szükséges információt szereznie környezeti hatástanulmányának elvégzéséhez. A vizsgálat szempontjából elsősorban a hőmérsékleti és a csapadékviszonyok, azok éven belüli eloszlása és szélsőértékei a meghatározóak. Így a csapadék időbeli eloszlása, a nagy (pl. 20 mm-t meghaladó) csapadékkal járó események jövőbeli gyakorisága, a hőmérséklet változása, a magas (35 fok feletti) és alacsony (pl. 0 fok alatti) hőmérsékleti értékek jövőbeli előfordulása szolgálhat kiindulásként. Az információkra elsősorban a kerékpárút útvonala mentén van szükség. A regionális klímamodellek napjainkban jellemző felbontása azonban ehhez nem elég részletes, így a hasonló lokális adatigények esetében mindig az adott területet lefedő modellbeli rácsponthoz összesítve adunk információt.

2. Hogyan férhetünk hozzá a hatásvizsgálatokhoz szükséges klímamodellek eredményeihez?

A regionális éghajlati modellek eredményeihez több forrásból is hozzájuthatunk. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál például két regionális klímamodelt futtatunk: az ALADIN és a REMO modellekkel Közép- és Kelet-Európát 10 km-es felbontással lefedő tartományon készülnek kísérletek, a közepes és magas szennyezőanyag kibocsátást feltételező RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek használatával. A Euro-CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment) együttműködésben 10-50 km-es felbontású szimulációkat végeznek Európára a XXI. század végéig alacsony, közepes és magas kibocsátási scenáriók figyelembevételével. A Copernicus Climate Change Service éghajlati adatbázisában pedig további szimulációk eredményei érhetőek el, melyek a Euro-CORDEX-ben kevésbé használt modellekkel és forgatókönyvekkel készültek.

A felsorolt adatbázisoknak más-más előnyei vannak. Az OMSZ modellkísérleteiből olyan meteorológiai változókra is elérhető adat, amelyek az európai adatbázisokba nem kerültek bele. Ugyanakkor a Euro-CORDEX vagy a Copernicus nagyszámú szimulációi a bizonytalanságok teljesebb figyelembevételét teszik lehetővé. A Kisokosban a példák tárgyalásánál a Euro-CORDEX adataira támaszkodunk, ami jelenleg a legszélesebb kiterjedést teszi lehetővé.

3. Hány modellszimuláció eredményeit használjuk a vizsgálatunkhoz?

A jövőbeli éghajlatváltozás vizsgálatokor következtetéseinket több modellszimuláció eredményei alapján tesszük. Ideális esetben egy nagy számosságú ensemble lehetőséget biztosít arra, hogy felmérjük, éghajlatunk milyen irányban változhat a jövőben. A gyakorlatban azonban számos korlátja lehet annak, hogy a teljes ensemble-t felhasználjuk.



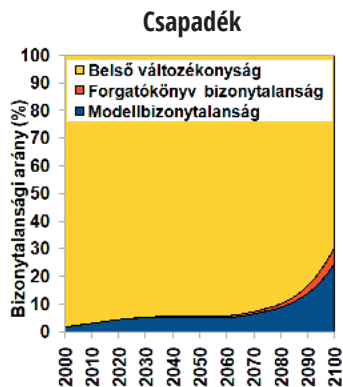
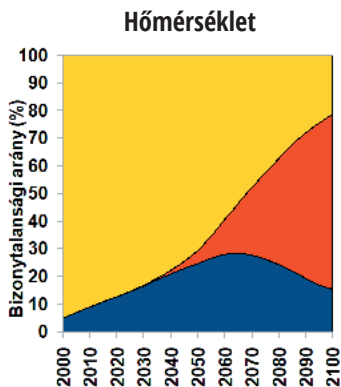
Modellező Miksa a hajózhatóságot komplex, nagy számításgéniű modellekkel vizsgálja. Ebben az esetben gyakorlati megfontolásból nincs lehetőség a teljes ensemble minden tagjával elvégezni a számításokat. Ehelyett célszerű **néhány (3-5) reprezentatív modellszimulációt** kiválasztanunk, amelyekkel a legfontosabb éghajlatváltozási irányok esetén fellépő hatások számszerűsíthetők. A reprezentatív modell-együttes összeállításához figyelembe kell vennünk a hatásvizsgálat jellemző földrajzi területét és időtávját, illetve azoknak a meteorológiai változóknak az alakulását, amelyekre a hatásvizsgálat érzékeny.

Első lépésként segítséget nyújthat annak ismerete, hogy adott földrajzi terület, időtáv és meteorológiai változó függvényében a különböző modellek és forgatókönyvek alkalmazása milyen mértékben járul hozzá a teljes ensemble szórásához. **A regionális csapadékprojekciók bizonytalanságát** (a 3. ábra a Kárpát-medencére mutat példát) **döntően a belső változékonyság alakítja**, s a 21. század első felében ez a bizonytalanság elsődleges forrása a hőmérsékleti projekciók esetében is. **A különböző modellek és forgatókönyvek használata az évszázad második felében fejt ki hatását.** A forgatókönyv-választás elsősorban a hőmérsékleti projekciók eredményeiben okoz eltéréseket, a csapadékváltozás lehetséges irányait inkább a különböző modellek használata mutatja meg.

Mivel Modellező Miksa modellje különösen a csapadékadatokra érzékeny, számára egy (pl. közepes vagy magas kibocsátási) forgatókönyvel és több regionális modellel készített kísérlet együtteséből választjuk ki a reprezentatív szimulációkat.



Tervező Tekla feladata nem napi felbontású meteorológiai adatokat igényel, hanem az azokból előállított éghajlati információt (pl. a 20 mm-t meghaladó csapadéköszegező napok gyakoriságváltozását) és a várható változások valószínűségének ismeretét. **A valószínűségek számításához a lehető legszélesebb modellszimuláció-együttest célszerű felhasználnunk.** Ezért Tekla számára egy nagy számosságú ensemble adja az alapot, amelyben (általában) minden szimulációt egyformán reprezentatívnak tekintünk.



3. ábra. A belső változékonyság (sárga), a forgatókönyv- (narancs) és a modellválasztás (kék) okozta bizonytalanság hozzájárulása a Kárpát-medencére vonatkozó hőmérséklet- és csapadékprojekciók teljes bizonytalanságához a XXI. század során. Az ábrák a Euro-CORDEX 1. táblázatban szereplő 24 regionális modellszimulációja alapján készültek.

4. Hogyan vegyük figyelembe a modelledmények pontatlanságait?

Egy éghajlati modell jövőre vonatkozó eredményeinek értelmezését megelőzően a modellező szakemberek felmérik, hogy az képes-e reprodukálni egy adott térség éghajlati jellemzőit. Ezt a vizsgálatot **validációnak** nevezzük, mely során a modellt **egy 20-30 éves múltbeli időszakra futtatják** és eredményeit a modellrácsra interpolált **mérésekkel hasonlítják össze**. Az értékelés során ellenőrzik, hogy a modell visszaadja-e a fontos meteorológiai változók éves menetét, eloszlását, térbeli sajátosságait. A hibákról szerzett információk birtokában döntünk arról, hogy használunk-e egy modellszimulációt az adott vizsgálatokhoz. **A különböző modellek eltérő képességekkel írják le az egyes meteorológiai változókat**, ezért a validációnál célszerű külön figyelmet fordítani azokra a meteorológiai változókra, amelyekre a leginkább érzékeny a hatásvizsgálati modell.



Modellező Miksa hidrológiai modelljének fontos kiindulási adata a csapadékmennyiség, ezért az adatigényét kielégítő modellszimulációk kiválasztásánál erre fókuszálunk.



Tervező Tekla feladatához mind a hőmérsékleti, mind a csapadékkal kapcsolatos jellemzők leírása fontos. A hőmérsékleti viszonyokat a modellek többsége elfogadható pontossággal jellemzi, így a csapadék megfelelő modellezése Tekla feladata esetében is lényeges kritérium a modellek kiválasztásánál.

Mindkét igény kielégítésénél a Euro-CORDEX adataira támaszkodunk, és olyan szimuláció-együttest állítunk össze, melynek tagjai megbízhatóan írják le térségünk csapadékjellemzőit. A kiindulásul kiválasztott 24 modellkísérletet 12 km-es felbontáson, 7 regionális és 5 globális modell összekapcsolásával, az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyvekkel készítették (1. táblázat).

		Regionális modell							
		ALADINS3	RCA4	CClM-4-8-17	RACMO2ZE	REMO2009	WRF331	HIRHAM5	Összesen
Globális modell	CNRM-CM5	x	x						2
	MPI-ESM-LR		x	x		x			3
	HadGEM2-ES		x		x				2
	IPSL-CM5A		x				x		2
	EC-EARTH		x		x			x	3
	Összesen		5	1	2	1	1	1	12

1. táblázat. A példákban tekintett regionális modellek (oszlopok) és az azok kiindulásául szolgáló globális modellek (sorok). Mindegyik kombináció két (az RCP4.5 és RCP8.5) forgatókönyv figyelembevételével készített kísérletét választottuk, összesen 24 szimulációt.

Az éghajlati projekciók eredményeit megadhatjuk **változás vagy jövőre vonatkozó idősorok** formájában. A változásokat a múltbeli referencia-időszakra és a jövőre vonatkozó eredmények különbségéből képezzük (pl. 2021–2050 időszak átlaghőmérséklet-változását tekintjük az 1971–2000 időszakhoz képest). A meteorológiai változók jövőben várható értékeinek megadásához **a nyers modelleredményeket gyakran hibakorrekciónak kell alávetni**. Ennek lényege, hogy a múltbeli modellezett és mért meteorológiai adatok közötti eltérésekre korrekciós faktorokat határoznak meg, amit a jövőbeli modelleredményekre változtatás nélkül alkalmaznak. A számos eljárás közül a megfelelő korrekciós módszert a felhasználói igények és az adott feladat ismeretében kell kiválasztani, figyelembe véve, hogy a hibakorrekciónak újabb bizonytalanságot visz a modelleredményekbe.



Tervező Tekla feladata a napi adatokból számított várható értékeket, több évtizedes átlagokat igényli. Az átlagos hibák korrigálásához használható a **delta-módszer**, amelynek lényege, hogy a validációhoz is használt referencia-időszakban mért átlagokat (pl. az 1971–2000 időszakban mért éves átlaghőmérsékletet) kombináljuk a jövőre vonatkozó átlagos változásokkal (pl. 2021–2050 éves átlaghőmérséklet-változásával 1971–2000-hez képest).



Modellező Miksa hidrológiai modellje napi felbontású jövőbeli meteorológiai adatokat igényel, amihez nem elegendő a 30-éves átlagértékek hibájának kiküszöbölése, a **napi értékek korrekciója** szükséges. Ebben az esetben egy olyan eljárást alkalmazunk a nyers modelledményekre, amely az ezekből számított **eloszlásfüggvény módosításán** alapszik.

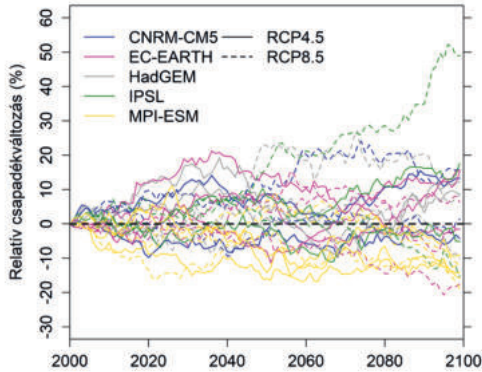
5. Hogyan alakítsuk az adatsokaságot értékes információvá?

Az előzőekben azt vizsgáltuk, hogy a rendelkezésre álló klímamodel-szimulációkból a különböző típusú feladatok adatigényét figyelembe véve, valamint az éghajlati modelledmények bizonytalansági forrásainak ismerete alapján elméletben mennyit és milyen összeállításban érdemes kiválasztani. Ezek után azt nézzük meg, hogy az így nyert adatokból hogyan lehet olyan információt kinyerni, ami segíti a konkrét modellkiválasztást vagy a döntések meghozatalát.



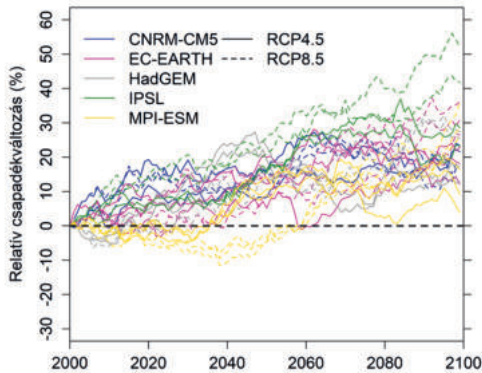
Modellező Miksa feladatához olyan **reprezentatív szimulációkat** ajánlott kiválasztani, amelyek megjelenítik az éghajlatváltozás lehetséges főbb irányait. A projekciók gyors áttekintését és a megfelelő tagok kiválasztását segítheti a **fáklya- és box-whisker diagram** (4. ábra). Előbbin a modellszimulációk által jelzett változásértékeket az idő függvényében jelenítjük meg. Például a 4. ábra 24 Euro-CORDEX modellszimuláció nyári és téli csapadékváltozásait mutatja Magyarországra 2000-től 2100-ig, 30-éves mozgátlagolással az évenkénti változékonyság kiszűrésére. Az évszázad végére a modellek 40%-ot meghaladó szórást mutatnak, a változás nyáron kb. -20% és 50% közötti, míg télen kb. 0 és 50% közötti. A box-whisker diagram segítségével a modellsokaság statisztikai értelemben reprezentatív tagjait választhatjuk ki, pl. amelyek egy 30-éves időszakban (a 4. ábra két paneljének jobb oldalán 2071–2100-ban) a legkisebb és a legnagyobb változást, a mediánt, valamint az alsó és felső kvartilist jelenítik meg. (A medián a sorba rendezett adatok középső értéke, míg az alsó, illetve a felső kvartilisnél a modelladatok 25%-a kisebb illetve nagyobb változást mutat.) Látható, hogy a **reprezentatív tagok kiválasztása** nem könnyű feladat, **függhet attól, hogy melyik meteorológiai változót, évszakot, vizsgálati időszakot és forgatókönyvet tekintjük.** Azt azonban elmondhatjuk, hogy nyáron és télen az MPI-ESM globális modellel meghajtott regionális modellek (4. ábrán sárga színnel jelölt) jellemzően a bizonytalansági intervallum alján, az EC-EARTH, HadGEM és CNRM globális modellel meghajtott regionális modellek (rózsaszín, szürke és kék) a bizonytalansági intervallum közepén, míg az IPSL modellel meghajtott regionális modellek (zöld) a bizonytalansági intervallum tetején helyezkednek el, tehát ezekből választanánk ki a reprezentatív tagokat.

Nyár



	RCP4.5	RCP8.5
minimum	MPI-ESM_CCLM	EC-EARTH_RCA
medián	EC-EARTH_RCA HadGEM_RACMO	HadGEM_RCA EC-EARTH_RACMO
maximum	IPSL_WRF	IPSL_WRF

Tél



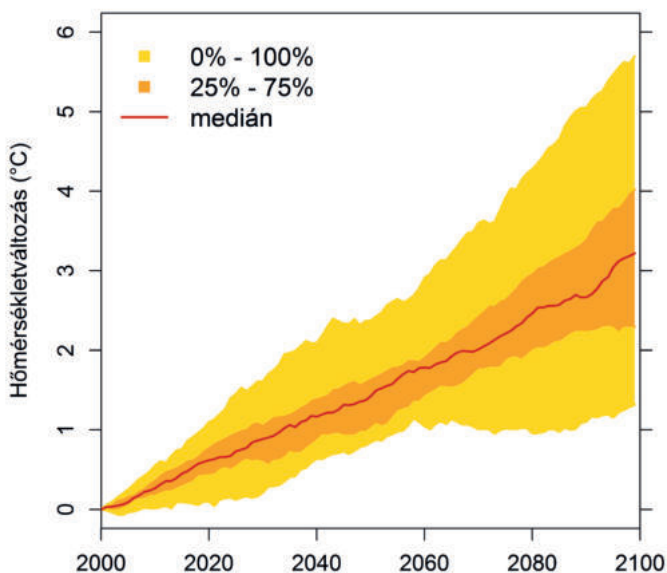
	RCP4.5	RCP8.5
minimum	MPI-ESM_CCLM	EC-EARTH_RCA
medián	EC-EARTH_RCA HadGEM_RACMO	HadGEM_RCA EC-EARTH_RACMO
maximum	IPSL_WRF	IPSL_WRF

4. ábra. A magyarországi nyári és téli csapadék relatív változása (%; fent bal oldali ábrák), 30-éves mozgóátlaggal (azaz az adott évhez tartozó érték a megelőző 30 év átlagos változása a referenciához képest) 24 európai modellszimuláció alapján. A jobb oldali box-whisker diagram forgatókönyvenként mutatja a 2071–2100-ra vonatkozó modelleredményekből számított kvantiliseket (minimumot – a függőleges vonal alsó határa, alsó kvartilist – a téglalap alsó határa, mediánt – a téglalapban lévő vízszintes vonal, felső kvartilist – a téglalap felső határa, maximumot – a függőleges vonal felső határa). Referencia-időszak: 1971–2000. A táblázatban a 2071–2100 időszakra a legkisebb, legnagyobb és a mediánértéknek megfelelő változásokat mutató modelleket tüntettük fel.



Tervező Tekla feladata szempontjából nem lényeges, hogy melyik modell adja a legnagyobb vagy a legkisebb változást; számára a fő kérdés az, hogy a változás milyen határok között és milyen valószínűséggel következhet be. Az alábbiakban olyan eszközöket mutatunk be, melyek a **sokasági modelleredményekből** származtatható **valószínűségi információkat** jelenítik meg. Az 5. ábrán látható **meteogram** hasonló a fáklyadiagramhoz, azonban az egyes modellszimulációk eredményei helyett a meteorológiai változó (esetünkben a hőmérséklet) által felvett intervallumot rajzoljuk ki (sárga színű terület), kiemelve a valószínűbb tartományt (az alsó és felső kvartilis közötti, narancs színű terület a tagok középső 50%-át tartalmazza) és a mediánt (piros vonal).

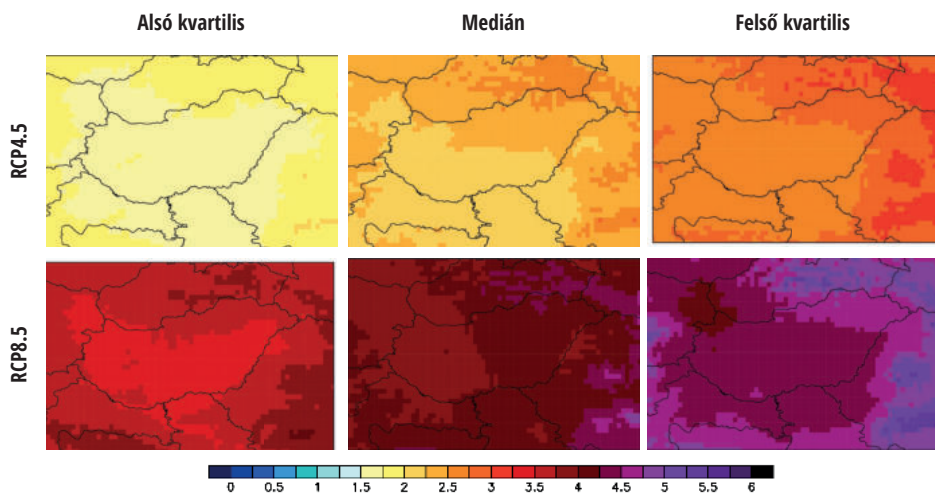
Előnye a box-whisker diagrammal szemben, hogy míg az csak egy 30-éves időszakra vonatkozik, addig ezen az ábrán végigkövethetjük a kitüntetett értékek alakulását a teljes időszak alatt. Az ábra alapján például a 24 vizsgált modellszimuláció 50%-a szerint a magyarországi hőmérsékletváltozás kb. 2050-re elérheti az 1 °C-ot, az évszázad végére pedig 2 és 4 °C között alakulhat.



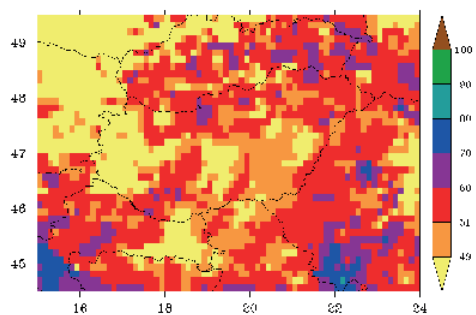
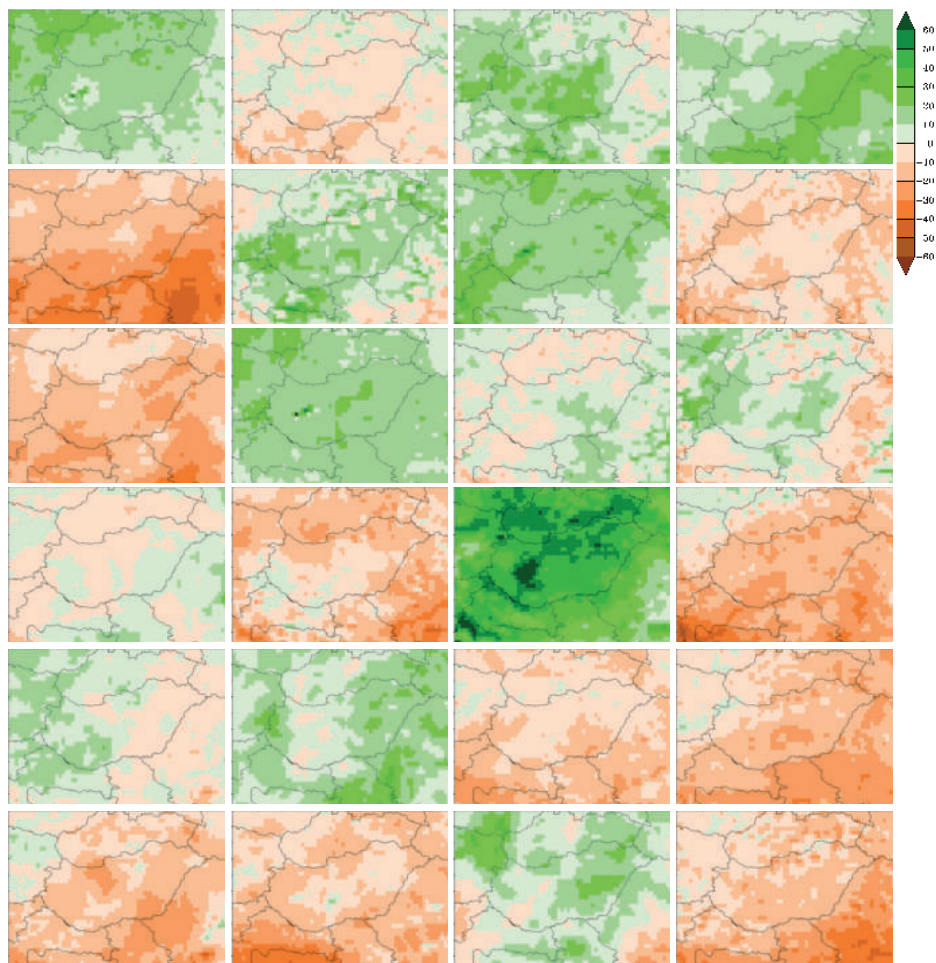
5. ábra. A magyarországi éves átlaghőmérséklet-változás minimuma, alsó kvartilise, mediánja, felső kvartilise és maximuma (°C) 24 európai modellszimuláció eredményei alapján. Referencia: 1971–2000. A modellszimulációk fele az alsó és a felső kvartilis által határolt (narancssárga) területen belül helyezkedik el.



A változás térbeli eloszlását térképek segítségével vizsgálhatjuk. Az egyes modellszimulációk eredményeit bemutató térképekből **bélyegdiagramot** állíthatunk össze, melynek segítségével egyszerre tanulmányozhatjuk a teljes együttest (7. ábra bal oldali része a csapadékváltozásra). Sok ensemble tag esetén a bélyegdiagramok mellett célszerű az információt szintetizálni. Például a különböző **kvantilisok** értékeit rácsponthonként is kiszámíthatjuk, és azokból **térképet** készíthetünk. A 6. ábra az alsó kvantilis, a medián és a felső kvantilis térképeit mutatja, mely alapján az ország északkeleti területén a változás mértéke a 4,5 °C-ot is meghaladhatja. Egy másik döntéstámogató megjelenítési mód a **valószínűségi térkép**, melyhez definiálnunk kell az adott meteorológiai változóra vonatkozó küszöbértéke(ke)t, aminek átlépése érdekes a hatásvizsgálat szempontjából. Tervező Tekla például szeretné tudni, hogy mennyi a valószínűsége a nyári csapadékösszeg csökkenésének az évszázad végén. Ehhez rácsponthonként kiszámítjuk, hogy a modellszimulációk hány százaléka ad kevesebb csapadékot a jövőre, mint a múltbeli referencia időszakban, és az eredményt térképen ábrázoljuk (mint a 7. ábra jobb paneljén). A bélyegdiagram és a valószínűségi térkép együttes elemzése alapján az évszázad végére a nyári csapadékösszeg alakulása igen bizonytalan, ugyanis a modellszimulációk körülbelül 50%-a valószínűsíti annak csökkenését.



6. ábra. A 2071–2100-ra várható éves hőmérsékletváltozás (°C) alsó kvantilise, mediánja és felső kvantilise 12-12 európai modellszimuláció eredményei alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.



7. ábra. Nyári csapadékváltozás 2071–2100-ban (%; fent) 24 európai modellszimuláció eredményei alapján, valamint a csapadékcsökkenés ezekből számított valószínűsége (%; lent). Referencia-időszak: 1971–2000.

6. Átlagoljuk-e a modelleredményeket?

A nagyszámú modellszimuláció eredményeinek egyszerűsítésére kínálkozó módszer a modellszimulációk átlagolása, amellyel az éghajlatváltozásról kategorikus információk (egyetlen számérték, igen/nem válaszok) állíthatók elő. Az átlag alkalmazása azonban gyakran az eredmények téves értelmezéséhez vezet. Az alábbiakban ennek illusztrálására és a lehetséges alternatívákra mutatunk példát.

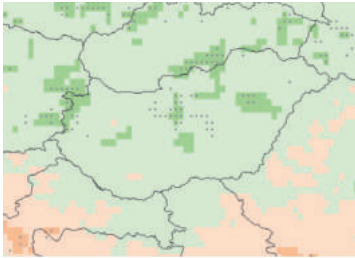


Modellező Miksa munkája során a Szolgáltatunktól kapott éghajlati adatokat bemeneti adatként használja, és olyan modellt alkalmaz a Duna jövőbeli hajózhatóságának vizsgálatára, ami egy másik fizikai folyamatot, az éghajlatváltozás hatására bekövetkező hidrológiai folyamatot szimulálja. **Több klímaszimuláció átlagolása nem eredményez a fizika törvényeit kielégítő mezőt.** Miksa modellje azonban egy fizikailag konzisztens adatsort vár kiindulásul, így a modellátlatot nem tudja használni. Ehelyett a hidrológiai szimulációk számának csökkentésére – ahogyan azt a 3. és 5. kérdésnél említettük – érdemes néhány, a bizonytalanságokat reprezentatíván megjelenítő szimulációt kiválasztania, és ezek mindegyikével elvégeznie a hatásvizsgálatát.

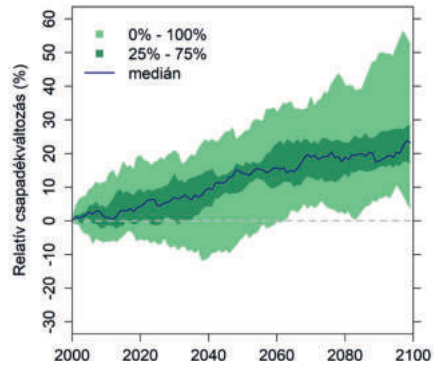
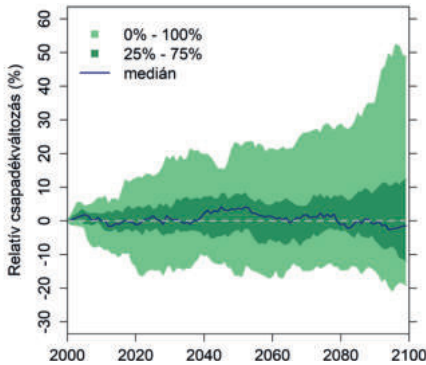
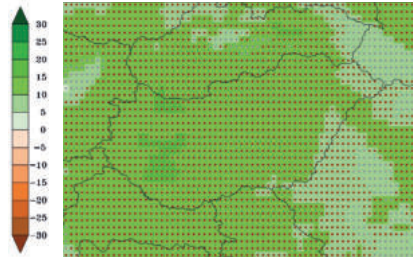


Tervező Tekla számára **az átlag a szórásértékekkel kiegészítve** jó becslés lehet a hőmérséklet esetén, hiszen minden modellszimuláció azonos irányú várható változást (magyarországi éves átlaghőmérséklet emelkedést) mutat. A **csapadékkal** kapcsolatos eredményeknél azonban **a negatív és pozitív változások átlagolása elfedi a ténylegesen lehetséges változási irányokat és azok mértékét.** Ebben az esetben különösen fontos olyan **statisztikai mennyiségek** (pl. szórás, kvartilis értékek) számítása, amik betekintést adnak az átlag által „elsimított” részletekbe. A *8. ábrán* erre láthatunk egy példát. Tekintsük a 24-tagú modellszimuláció-együttesünk által 2021–2050-re jelzett nyári és téli csapadékváltozást, az 1971–2000 referencia-időszakhoz képest. Az ebből képzett átlagok térképei (felső sor) alapján arra következtethetnénk, hogy az évszázad közepére nyáron kismértékű (legfeljebb 5%-os), télen jelentősebb (10-15%-os) csapadéknövekedés várható hazánkban. Télen a modelleredmények 75%-a mindenütt (pontozás jelöli a térképeken) csapadéknövekedést jelez, míg nyáron ez csak néhány rácpontban teljesül, azaz a modellszimulációk legalább negyede (de az ábra bal alsó részén szereplő meteogram alapján csaknem a fele) kisebb-nagyobb mértékű csökkenést vetít előre. A **szignifikancia-vizsgálat** során olyan statisztikai tesztet (pl. t-próbát) hajtunk végre, mely megmutatja, hogy az átlagos változás mértéke nagyobb-e a természetes belső változékonyságnál. A *8. ábra* térképei alapján a magyarországi rácpontokban csak a téli változás szignifikáns (ezt piros pontozás jelöli). Tehát a téli 10-15%-os csapadéknövekedést egy valószínű eredménynek tekinthetjük, országos átlagban a modelleredmények 50%-a is ezen az intervallumon belül helyezkedik el (*8. ábra* alsó sor).

Nyár



Tél

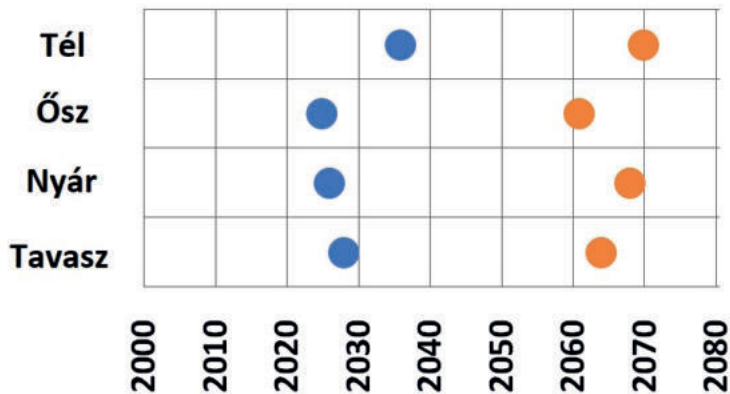


8. ábra. Felső sor: 24 európai modellszimuláció által mutatott nyári és téli csapadékváltozás (%) átlaga 2021–2050-ben 1971–2000-hez képest. Pontozással jelöltük azokat a rácpontokat, ahol a modellszimulációk 75%-a azonos irányú változást mutat, ezen belül pedig piros színnel azokat a pontokat, ahol a változás mértéke nagyobb a belső változékonyságnál. Alsó sor: a 24 tagú modellszimuláció-együttes által jelzett magyarországi nyári és téli csapadékváltozás (%) kvantilisai (minimum, alsó kvartilis, medián, felső kvartilis, maximum).

7. Mi a változás és a változékonyság közötti különbség?

A Meteorológiai Világszervezet 30 évben jelölte meg azt a legrövidebb időszakot, amin az éghajlat változása vizsgálható. (A Kisokosban is a néhány évtizedes időtávra koncentrálnak és nem foglalkozunk a földtörténeti skálájú változásokkal és változékonysággal.) Ahogyan azt korábban említettük, a jövőbeli klímaállapot jellemzéséhez kijelölünk egy 30-éves vonatkoztatási alapot, amihez képest a változásokat értelmezzük. Egy-egy hónap, évszak vagy év éghajlati állapotának a referencia állapottól számított eltérését éghajlati anomáliának nevezzük; az anomáliák időszora az éghajlat változékonyságát (ingadozását) mutatja. Az **éghajlat megváltozásáról** akkor beszélünk, ha **a klímaállapot vagy a klímaingadozás statisztikailag szignifikáns módosulását** tapasztaljuk.

Több olyan mérőszám vagy jellemző is megadható, melyek a döntéshozók és a kockázatértékeléssel foglalkozó szakemberek számára információval szolgálnak a változás és a változékonyság viszonyáról. A már említett **szignifikancia-teszt** megmutatja, hogy a kapott változásérték miként viszonyul az adatsor szórásához, azaz az éghajlatváltozási jel a „zajhoz”. Számszerűsíthetjük a **változás bekövetkezésének idejét**, ami azt az évet mutatja, amikor a várható változás meghaladja a változékonyság nagyságát. Ehhez a változás és a változékonyság (négyzetgyökének) abszolútértékben vett hányadosát vizsgáljuk. Amikor ez **meghaladja az 1-et, a változást nem kizárólagosan a természetes változékonyság okozza**. Ha az arány **2-nél is nagyobb**, akkor **nagymértékű változásokkal** nézhetünk szembe. A 9. ábra mutatja, hogy a vizsgált modellegyüttesünk szerint a Kárpát-medencében az átlaghőmérséklet esetében a változás ősszel haladja meg legkorábban (a 2020-as évek második felében) a változékonyságot, míg télen ez kb. egy évtizeddel később következik be. A 2060-as évektől jelentős változások várhatók az átlaghőmérsékletben, ami a szélsőségekben még nagyobb módosulásokat okozhat. A mutató értelmezésénél figyelembe kell venni, hogy az éghajlati rendszer tehetetlensége és egyes üvegházhatású gázok hosszú légköri tartózkodási ideje miatt az antropogén kényszerek mérséklése (pl. a szennyezőanyag-kibocsátás csökkentése) több évtized múlva érezheti hatását, tehát a radikális változások elkerüléséhez azok bekövetkezésénél jóval korábban kell cselekedni.



9. ábra. Annak ideje, amikor a Kárpát-medencére vonatkozó évszakos hőmérsékletváltozás meghaladja (>1; kék), illetve jelentősen meghaladja (>2; narancssárga) az évszakos hőmérséklet változékonyságának mértékét 24 európai éghajlati modellszimuláció eredményei alapján.

Összefoglalás

Az éghajlati adatok hozzáférhetősége folyamatosan bővül, ezért elengedhetetlen, hogy a felhasználók ismerjék az éghajlati modellezés alapjait, valamint a modelleredmények felhasználásának módját és korlátait. Kiadványunk azzal a céllal készült, hogy az Országos Meteorológiai Szolgálat éghajlati adatszolgáltatásban alkalmazott módszertanát röviden bemutassa két tipikus felhasználói megkeresés példáján.

A Kisokosban egy hidrológiai modell futtatásához szükséges, napi részletességű, rácspontra vonatkozó meteorológiai adatigény és egy infrastruktúra-fejlesztéshez kapcsolódó környezeti hatástanulmányhoz szükséges adatigény kielégítéséhez alkalmazott eljárás legfontosabb elemeit mutattuk be. A két feladat közötti legfontosabb különbség a kért meteorológiai információk mennyisége. Mivel a hidrológiai modellezés számításigényes feladat, csak néhány modellszimuláció eredményét tudja figyelembe venni. Ezért bemutattuk, hogy a nagy számosságú modellszimuláció-együttesből milyen módszerekkel tudunk az éghajlatváltozás lehetséges irányait megjelölő reprezentatív tagokat kiválasztani. Ugyanakkor rávilágítottunk arra is, hogy különböző meteorológiai változókra vagy időtávra koncentrálna eltérő modellszimulációkkal tudjuk a bizonytalansági intervallumot jól lefedni. Az infrastruktúra-fejlesztéssel kapcsolatos feladat napi és rácsponti adatsorok helyett éghajlati indikátorokat igényelt. Az ilyen vizsgálatokhoz célszerű minél több tagú szimulációegyüttest felhasználni, és azokból különböző statisztikai mutatókat számítani. A Kisokosban különböző módszereket ajánlunk az adatsokaságból hasznos és értelmezhető információ kinyerésére.

Végezetül hangsúlyozzuk, hogy nincsen minden feladatra egyaránt alkalmazható, egyetemes eljárás. Ezért bátorítjuk a klímainformációk felhasználóit, hogy kérdéseikkel forduljanak az éghajlati szakemberekhez annak érdekében, hogy közösen megtalálják a feladatukhoz legjobban illeszkedő meteorológiai és éghajlati információkat.

Kislexikon

Belső (természetes) változékonyság: Az éghajlat antropogén kényszer nélküli ingadozása. Például hidegebb és melegebb évek váltakozása.

Bélyegdiagram: Az ensemble tagjainak ugyanarra a meteorológiai változóra és időszakra vonatkozó térképeinek összessége, kis méretben, bélyegalbum-szerűen megjelenítve. L. még: ensemble technika.

Box-whisker diagram: Egy adatsor minimumának, maximumának és kvartiliseinek megjelenítésére szolgáló diagram, mely egy téglalapról és két vonalról áll. A téglalap a sorbarendezett adatsor középső 50%-ának terjedelmét jeleníti meg, alsó és felső határa jelöli az adatsor alsó és felső kvartilisét, a téglalapon található vonal pedig a mediánértéket mutatja. A téglalapról lefele és felfele kinyúló vonalak az adatsor maximum- és minimumértékét jelölik. L. még: kvartilisek.

CORDEX, Euro-CORDEX: A World Climate Research Programme 2009-ben hívta életre a CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment) együttműködést, melyben előre definiált kontinens méretű tartományok fölött összehangoltan készítenek regionális éghajlati modellszimulációkat a XXI. századra a globális éghajlati modellek eredményeinek leskálázásával. A Euro-CORDEX a CORDEX Európára és Észak-Afrikára szimulációkat végző ága. Bővebben: <https://www.euro-cordex.net>. L. még: regionális éghajlati modell.

Delta-módszer: A legegyszerűbb hibakorrektíós eljárás. Lényege, hogy meghatározzák a modelleredmények átlagos eltérését a vizsgálandó jövőbeli időszak és a múltbeli referencia-időszak között, majd az így kapott változásértékek és a referencia-időszak méréseinek kombinációjával állítják elő a modelleredmények korrigált jövőbeli értékeit. L. még: hibakorrektíós módszer.

Éghajlati index: A meteorológiai változók (elsősorban a hőmérséklet és a csapadék) napi minimum, átlag-, maximum értékeiből vagy napi összegeiből származtatott indikátorok, amelyek leggyakrabban egy adott küszöbérték átlépésének gyakoriságát, illetve küszöb felett vagy alatt való tartózkodásának idejét fejezik ki. Előbbire példa a fagyos napok száma, ami azon napok összege, amikor a minimumhőmérséklet 0 °C alá süllyed. Utóbbira példa a száraz időszakok maximális hossza, ami az a leghosszabb időszak, amikor a napi csapadékösszeg 1 mm alatti. L. még: meteorológiai változó.

Éghajlati projekció: Egy adott antropogén kibocsátási forgatókönyv figyelembevételével készített éghajlati modellszimuláció eredménye. Például az RCP forgatókönyvek 2005-ig mért, míg 2006-tól becsült sugárzási kényszert tartalmaznak, emiatt egy 1950-től 2100-ig futtatott modellszimuláció projekciós időszaka 2006–2100.

A jövőbeli emberi tevékenység feltételes módon – forgatókönyvek útján – való figyelembevétele miatt az „éghajlati előrejelzés” kifejezés nem használatos. Az éghajlati projekciók értelmezése során a meteorológiai változók több évtizedes időszakra vonatkozó statisztikai mérőszámait vizsgálják. L. még: forgatókönyv.

Eloszlásfüggvény: Egy adatsokaság statisztikai jellemzője, mely megmutatja, hogy mi a valószínűsége annak, hogy egy adott értéknél az adathalmaz elemei kisebb értékeket vesznek fel.

Ensemble technika: A meteorológiai előrejelzések bizonytalanságának számszerűsítésére alkalmazott módszer, melynek során együttesen értékelik több modellszimuláció eredményét. Az egyes kísérletek a légkör vagy éghajlati rendszer egyformán valószínű leírását adják, s az előálló ensemble lehetővé teszi az eredmények valószínűségi formában való közlését. Az éghajlati projekciók bizonytalansága elsősorban a fizikai és antropogén folyamatok közelítő leírásából adódik, ezért a különböző globális, illetve regionális modellekkel és forgatókönyvekkel elvégzett szimulációk együttesével számszerűsítik azt.

Fáklyadiagram: Az ensemble előrejelzések egyik megjelenítési módja, mely egy meteorológiai változó adott területre vonatkozó (pl. Magyarországra vagy néhány rácspontra átlagolt) időbeli változását mutatja mindegyik ensemble tag megjelenítésével. Az eredmények a bizonytalanság növekedésével (éghajlati szimulációk esetében általában a referencia-időszaktól távolodva) egyre nagyobb mértékben szórnak, jellegzetes fáklya alakot öltve. L. még: ensemble technika.

Forgatókönyv (scenário): Az éghajlatot befolyásoló külső kényszerek egyik bizonytalan eleme az emberi (antropogén) tevékenység. A meghatározó politikai, gazdasági és társadalmi folyamatok leírására forgatókönyveket alkottak meg, amiket az éghajlati modellek az üvegházgázok és aeroszol részecskék koncentrációjának különböző (pl. alacsony, magas, közepes mértékű kibocsátáshoz tartozó) jövőbeli értékeivel vesznek figyelembe. A jelenleg használt ún. RCP (Representative Concentration Pathways) forgatókönyvcsalád tagjai a sugárzási kényszer lehetséges alakulását írják le (pl. az RCP4.5 szerint az évszázad végére $4,5 \text{ W/m}^2$ sugárzási kényszernövekedés várható az ipari forradalom szintjéhez képest); míg a legújabb SSP (Shared Socioeconomic Pathways) forgatókönyvcsalád egyesíti az eltérő társadalmi-gazdasági fejlődési pályákat és a számszerűen meghatározott mitigációs célokat. L. még: sugárzási kényszer.

Globális éghajlati modell (GCM): A teljes éghajlati rendszer (a légkör, a felszíni és felszín alatti víz, a jég- és hótakaró, a szárazföldi felszín és az élővilág) és a rendszer összetevői közötti kölcsönhatások leírására alkalmazott numerikus modellek. Egyik legfontosabb alkalmazási területük a külső kényszerek (pl. az emberi tevékenység változásának) éghajlati rendszerre kifejtett hatásának számszerűsítése. Ezek a modellek a Földet és a légkört egy háromdimenziós ráccsal fedik le, amelynek horizontális ráctávolsága jelenleg 100-250 km körüli.

Hatásvizsgálati modell: Az éghajlatváltozás különböző (mezőgazdasági, ökológiai, turisztikai stb.) szektorokra kifejtett hatásainak számszerű vizsgálatára alkalmazott modell, amely leggyakrabban az éghajlati modellek napi felbontású eredményeit igényli. Ilyen hatásvizsgálati modell például egy hidrológiai modell vagy egy bio-geokémiai folyamatokat leíró ökoszisztéma modell.

Hibakorrekció: Az éghajlati modelleredmények hibáinak eltávolítására használt módszer. Többféle eljárás létezik, melyek lényege, hogy egy hosszabb múltbeli időszakon modellezett és mért meteorológiai adatok statisztikai jellemzői (pl. eloszlásfüggvényeik) közötti eltérésekre korrekciós faktorokat határoznak meg, amit aztán a jövőbeli modelleredményekre alkalmaznak. Ehhez lényeges, hogy a referencia-időszakra rendelkezésre álljanak a korrigálandó meteorológiai változók megfigyelt értékei. L. még: referencia-időszak, delta-módszer, eloszlásfüggvény.

Külső kényszer: Az éghajlati rendszert kívülről befolyásoló tényezők. Természetes külső kényszerek például a naptevékenység változékonysága, a Föld pályaelemeinek változásai és a vulkánkitörések, míg emberi (antropogén) külső kényszerek például az üvegházhatású gázok és aeroszol részecskék kibocsátása, és a földhasználat megváltoztatása.

Kvartilisek: A kvartilisek a növekvő sorba rendezett adathalmazt 4 egyenlő részre osztják. A 2. kvartilis a medián, azaz az adatsor középső eleme (páros elemszámú adatsor esetén a két középső elem számtani közepe). A sorba rendezett adatsor első 25%-át a 2. vagy alsó kvartilis, utolsó 25%-át a 3. vagy felső kvartilis jelöli ki. Pl. 9 adat esetén a medián, az alsó és a felső kvartilis rendre az 5., a 3. és a 7. adat a sorban. Az alsó és felső kvartilis között helyezkedik el az adatsor középső 50%-a.

Meteorogram: Az ensemble előrejelzések egyik megjelenítési módja, amely egy meteorológiai változó által adott területen (pl. Magyarországra vagy néhány rácspontra átlagolt) felvett intervallumot mutatja az egyes időpontokhoz tartozó kvartilis értékek feltüntetésével. A kvartilis értékek közötti területeket általában különböző színezéssel töltik ki. L. még: ensemble technika, kvartilisek, Box-whisker diagram.

Meteorológiai változó: A légkör tér- és időfüggő állapotváltozóinak (pl. hőmérséklet, szélesebesség, légnymás, nedvesség) és az ezekből származtatott mennyiségek (pl. csapadék).

Parametrizáció: A modell térbeli rácsfelbontásánál kisebb skálán zajló fizikai folyamatok (pl. sugárzás, felhő- és csapadékképződés) leírására használt eljárás. Felhasználják hozzá az állapotváltozók rácsponthelyi értékeit és az adott fizikai folyamatot közelítő statisztikus-empirikus összefüggéseket.

Referencia-időszak: A jelenhez közeli több évtizedes időszak, melynek éghajlati állapotához a jövőbeli projekciók eredményeit viszonyítják. Például a 2071–2100 időszakra vonatkozó átlaghőmérséklet változását az 1971–2000 referencia-időszak átlagához hasonlítják. A referencia-időszak

megválasztásánál fontos, hogy az ne essen bele a modellek projekciós időszakába, valamint hogy a nemzetközileg széles körben használt időszakokkal összhangban legyen (jelenleg az 1971–2000 időszak a legelterjedtebb).

Regionális éghajlati modell (RCM): A Föld egésze helyett egy kisebb terület (pl. kontinens, ország) éghajlati jellemzőinek leírására használt modellek. A modellek tartományán kívül zajló nagytérségű folyamatokat általában a globális éghajlati modelledmények írják le, ezeket az információkat a tartomány peremén határfeltételek formájában veszik figyelembe. A regionális éghajlati modellek rácsfelbontása 10-50 km-es. L. még: globális éghajlati modell.

Sugárzási kényszer: Ha a légkör felső határára érkező és azon távozó sugárzási energiamennyiségben változás következik be, akkor a Föld sugárzási egyensúlya megbomlik. Ennek eredményeképpen a rendszerben energiatöbblet vagy energiavesztéség keletkezik. A sugárzási kényszer a troposzféra (a légkör alsó, kb. 10-18 km-es rétege) tetején beérkező és távozó sugárzásmennyiség különbsége, amit W/m^2 egységben fejezünk ki.

Szignifikancia-vizsgálat: Annak vizsgálata, hogy az éghajlati modell átlagos változásértéke meghaladja-e a természetes változékonyságot. A változékonyság a modell eredményének adott időszakon vett időbeli szórásával jellemezhető. A vizsgálat során statisztikai tesztet (pl. t-próbát) hajtanak végre, ami rácspontonként vagy a térbeli átlagos értékekre egyaránt végezhető.

Validáció: Annak vizsgálata, hogy az éghajlati modell képes-e reprodukálni a múltbeli éghajlat jellemzőit. Ennek során a modellt egy 20-30 éves múltbeli időszakra futtatják és eredményeit szabályos rácsra interpolált mérésekkel különböző statisztikai mutatók (pl. átlagok, szórásértékek) segítségével hasonlítják össze.

Valószínűségi térkép: Egy meteorológiai változó vagy éghajlati index meghatározott irányú és mértékű változásának valószínűsége az ensemble tagjai alapján, térképesen megjelenítve. Elkészítéséhez definiálni kell egy küszöbértéket, aminek átlépési valószínűségét számszerűsíti a térkép. Például a 2021–2050 időszakban 10%-nál nagyobb csapadéknövekedés valószínűségi térképe azt jeleníti meg minden rácsponthoz, hogy az összes vizsgált modelledmény hány százaléka jelezte a csapadékösszeg 10%-ot meghaladó növekedését 2021–2050-ben a referencia-időszakhoz képest. L. még: ensemble technika.

Változás bekövetkezésének ideje: Az az év, amikor a modellegyüttes alapján a várható változás meghaladja a változékonyság mértékét. Ezt egy arányszám írja le, amelynek számlálójában a várható változás nagysága, nevezőjében a változékonyság négyzetgyöke áll. Amikor ez az arány meghaladja az 1-et, statisztikailag bizonyítottá válik, hogy a változást nem kizárólagosan a természetes változékonyság okozza. A 2-t elérő érték nagymértékű változást jelez. (A nemzetközi szakirodalomban a mutató neve time of emergence; TOE.)

Elérhetőségek:

e-mail: klimadinamika@met.hu

**honlap: <https://www.met.hu/RCM>
[klimadat.met.hu](https://www.met.hu/RCM)**



© 2022 Országos Meteorológiai Szolgálat

Kiadja az Országos Meteorológiai Szolgálat
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.

Kiadásért felel: Dr. Radics Kornélia, az OMSZ elnöke
Írta: Allaga-Zsebeházi Gabriella, Bán Beatrix, Szépszó Gabriella
Közreműködők: Király Andrea, Szabó Péter
Grafika: Szabó Dorottya

A kiadvány a KEHOP-1.1.0-15-2015-00001 projekt keretében készült a Környezeti és Energiahatékonysági Operatív Program Kohéziós Alapjának támogatásával.

