

A magyarországi klímamodellek

Hoyk Edit

Bevezetés

A 2050-ig tartó időszak klímaváltozással összefüggő társadalmi-gazdasági változásainak modellezéséhez szükség van a várható klímaváltozásnak a bemutatására. Ehhez szolgáltatnak alapot a regionális klímamodellek, amelyek egymáshoz képest kisebb-nagyobb eltérésekkel vázolják fel a jövő éghajlatára vonatkozó tendenciákat.

Fejezetünkben fő célkitűzésünk a nemzetközi adaptáció alapján Magyarországon lefuttatott klímamodellek bemutatása, fontosabb eredményeik összefoglalása.

A létező klímamodellek közül számunkra nem a planetáris szintű modellezés, hanem a regionális és az országos léptékű modelleredmények alkalmazhatók. Ezek a regionális éghajlati modellek – miként a rövid távú időjárás-előrejelzésben – kisebb területre készítenek projekciókat a globális modellek eredményeit határfeltételeként felhasználva. A regionális modellek többnyire már csak az éghajlati rendszer légköri komponensének leírását tűzik ki célul, ezért kifejlesztésük általában a rövid távú előrejelzésben is használt időjárási modellek adaptálását és kiterjesztését jelent oly módon, hogy bizonyos folyamatokat (például a felhőképződést, sugárzást) az éghajlati tér- és időskálának megfelelően írják le.

Magyarországon a regionális éghajlati modellezés alapvetően négy modell futtatására terjed ki: a nemzetközi együttműködésben kifejlesztett ALADIN-Climate- és a német REMO-modelleket az OMSZ-ban, míg a brit PRECIS- és az amerikai RegCM-modelleket az ELTE Meteorológiai Tanszékén dolgozták át és alkalmazták hazai környezetre. Fejezetünkben ezeket a modelleket állítjuk a középpontba.

A téma feldolgozása alapvetően a fellelhető szakirodalom alapján történt. A szakirodalmi források összegyűjtésénél elsődleges szempont volt, hogy az egyes, Magyarországon futtatott klímamodellekkel kapcsolatban olyan forrásokat használjunk, amelyek primer forrásnak tekinthetők. Ennek megfelelően a forrásmunkák olyan kutatóktól származnak, akik a modellek hazai futtatásában részt vettek, illetve abban vezető szerepet játszottak.

A klímamodellek felbontása hazai körülmények között alapvetően kétféle. Az ALADIN és a RegCM modellek 10 km-es, míg a PRECIS és a REMO modellek 25 km-es rácshálóból indulnak ki, azonban ettől eltérő felbontásokkal is tesztelték a modelleket. A REMO esetében pl. két felbontással (18, illetve 11 km rácsháló) is ellenőrizték megbízhatóságot, ami azt mutatta, hogy nem minden esetben jelent a részletesebb felbontás pontosabb eredményeket. A tesztfuttatás eredményei alapján

a térbeli rács felbontásának növelése nem javít a Magyarországra vonatkozó eredmények pontosságán, a modellek a 18-25 km-es rácsávolsággal nyújtják térségünkre a legjobb eredményeket. A jövőre vonatkozóan azonban cékitűzés a felbontás, és ezzel párhuzamosan a várható pontosság finomítása, amelynek eredményeképpen – a szándékoknak megfelelően – kisebb léptékű (pl. akár szőlődűlőkre vonatkozó) klímaváltozási előrejelzések is adhatók.

A témakör elméleti háttere

Az éghajlat előrejelzése során arra a kérdésre kell választ találni, hogy az alkalmazott modell mennyire pontosan képes leírni a légkörnek egy hosszabb, de véges időszakra vonatkozó átlagos viselkedését, tehát a kiválasztott időintervallumra érvényes klímaállapotot, illetve annak egy éghajlati kényszer nyomán bekövetkező megváltozását. A feladat megoldásához ki kell jelölni egy vonatkoztatási alapot, amelyet „normál éghajlati állapotnak” tekintünk, és amelyhez a változást viszonyítani tudjuk. Ilyen referencia-éghajlatként a WMO évtizedenként egy 30 éves időszakot választ meg. Jelenleg ezt a szakaszt az 1961 és 1990 közötti évek képviselik, amelyet a magyarországi klímamodellek is alapul vesznek.

A klímamodellekkel kapcsolatban 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 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 az egy feltételezett jövőbeli kényszerre.

A feltételezett jövőbeli kényszerek egyik legfontosabb és legbizonytalanabb eleme az 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 a 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. A 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 állítanak fel, melyek között vannak optimista, pesszimista vagy átlagosnak tekinthető változatok, s ezek figyelembevételével készítenek globális projekciókat a Föld egészére.

Az üvegházhatású gázok várható koncentrációjára vonatkozó statisztikai számítások, matematikai modellezések segítségével az egyes modellszimulációkban az alábbi alapkérdésekre keresik a választ (Bartholy, Pongrácz 2011):

- Hogyan reagál az éghajlati rendszer az emberi tevékenységek alakulására?
- Hogyan reagál az éghajlati rendszer a feltételezett külső kényszerre?
- Hogyan reagál az éghajlati rendszer az antropogén eredetű szennyezőanyagok megnövekedett koncentrációjára?

Ezzel együtt kijelenthető, hogy a nagy klímakutató központokban fejlesztett globális modellek kidolgozottsága napjainkra elérte azt a szintet, hogy a modellek képesek megbízhatóan leírni az éghajlati rendszer elemeinek viselkedését a közöttük lévő összetett kölcsönhatásokkal együtt, továbbá jól használhatók az éghajlatváltozás globális, nagy skálájú jellemzőinek vizsgálatára.

Általános jellemvonás, hogy valamennyi éghajlati modell két kiemelt eleme a hőmérséklet és a csapadék várható alakulása. A kettő közül a csapadék a bizonytalanabb elem, ezért az értékelések során azt is szem előtt kell tartani, hogy a modellfuttatások során a hőmérséklet esetében a fél fokot, csapadék esetében pedig az 50%-ot nem meghaladó eltérés elfogadhatónak tekinthető (Szépszó 2014).

Történeti áttekintés

A Magyarországra alkalmazott regionális modellek eredményei 2008-tól váltak szélesebb körben elérhetővé. A korábbi időszakra a nemzetközi modelleket alkalmazták, elsősorban a Prudence modellt (részletesebben lásd Kovács 2015), amely 2006-os futtatásának megállapításai a következők:

- Magyarországon a globális átlagnál nagyobb mértékű melegedés várható. Ennek mértéke erősen változó, de legerősebb a nyár folyamán és leggyengébb tavasszal. Az éves 1,4°C-os hőmérséklet-emelkedésnél nagyobb mértékű változásra számíthatunk nyáron és ősszel (1,7 illetve 1,5°C), míg télen és tavasszal valamivel kisebb mértékűre (1,3 illetve 1,1°C).
- Az 1 fokos globális felmelegedést kísérő magyarországi csapadékmennyiség éves összege gyakorlatilag változatlan (ugyanolyan valószínűséggel lehet némi növekmény, illetve csökkenés), ugyanakkor a csapadék mennyiségének időbeli eloszlása nagy különbségeket mutat. Nyáron érdemi csökkenés, míg télen hasonló mértékű növekedés várható. Az átmeneti évszakokban a különböző modellek által adott becslések nem ennyire egyértelműek – némelyeknél csökkenés, másoknál növekedés tapasztalható Magyarorszáig térségére (OMSZ, ELTE 2006).

Magyarországon 2003-ban fogalmazódott meg az igény arra, hogy a hagyományos, statisztikai alapú éghajlatkutatás mellett induljon be a dinamikus klímodellezés is. A regionális éghajlati modellezés egy 2005–2007 között megvalósult NKFP-projektrel indult, amelyben az Országos Meteorológiai Szolgálat, az ELTE Meteorológiai Tanszéke, a Pécsi Tudományegyetem, valamint az Env-in-Cent Kft. vett részt. Az együttműködés célja a magyarországi regionális klímodellezési háttér megteremtése volt, amely alapot szolgáltat a Kárpát-medencében várható éghajlatváltozás becslésére.

A jövőre vonatkozóan a hazai modellkísérletekhez az antropogén tevékenység alakulásával kapcsolatos nagy skálájú kényszereket többségében a globális modellek A1B kibocsátási forgatókönyvével előállított eredményei szolgáltatták. Ez a szcenárió a forgatókönyvek között egy átlagos változatnak tekinthető a 21. századra. A PRECIS esetében azonban az A2 és a B2 forgatókönyveket is alkalmazták, melyek az évszázad végi állapotok egy-egy pesszimista, illetve optimista megvalósulását képviselik (Bartholy et al. 2011).

A Magyarországra adaptált klímamodellek eddigi eredményei

A REMO-modell adaptálása és Magyarországra vonatkozó előrejelzései

A Max Planck Intézet az Európai Középtávú Előrejelző Központ globális időjárás-előrejelző modelljén alapuló ECHAM nevű légköri általános cirkulációs modelljét dolgozta ki az 1980-as évek második felében, ezt követte a REMO (REgional MODEL) regionális éghajlati modell (Jacob, Podzun 1997) kidolgozása, amelyet a Német Meteorológiai Szolgálat rövid távú előrejelző modellje, az Europa Modell (Majewski 1991) és az ECHAM4 modell (Roeckner et al. 1996) ötvözésével hoztak létre. Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSz) 2004-ben adaptálta a REMO regionális klímamodelt, amellyel a fő cél a 21. században várható változások feltérképezése volt.

A modellben a felszíni jellemzők közül figyelembe veszik a felszín és a tengervíz hőmérsékletét, a tengeri jég eloszlását, a talajtípust, a domborzatot, a szárazföld és a tenger arányát, valamint a vegetációt (Szépszó 2014). Szerepet játszanak a modellben a talaj hidrológiai paraméterei, amelynek része a hótakaró, a növényzet által felfogott csapadékmennyiség és a talajnedvesség. Utóbbit a lehulló csapadék, a felszíni párolgás, a talajban történő transzspiráció, a hó olvadása és a felszíni lefolyás határozza meg.

A modell validálása rámutatott a REMO egyik jellemző gyengeségére: az évszakok hőmérsékletének föl- és a nedvességi mezők alábecslésére a Duna vízgyűjtő területén. Éppen e hibajelenség miatt a többi modell „pontosságával” összevetve a REMO modell nagyobb mértékben alkalmas pl. az Alpok térségének hőmérsékleti előrejelzésére, mint Magyarországera. A validáció során kitűnt, hogy a Kárpát-medence esetében a hőmérsékleti felülbecslés – a tél kivételével – minden évszakra jellemző, és ezek közül a nyári értékek a 3°C-ot is túllépik, elsősorban az ország déli részein. Ez az érték jelentősen eltúlozhatja a 2050-ig szóló hőmérsékleti változások várható mértékére vonatkozó becsléseket (Szépszó 2014).

A validálásból az is kitűnik, hogy a modell elfogadhatóan írta le a csapadék hazánkban jellemző éves menetét: a nyári maximum, a novemberi másodmaximum, valamint a téli és az októberi minimumok egyaránt megjelentek benne, ami azt sugallja, hogy a csapadékra vonatkozó előrejelzések – éves átlagban – a hőmérsékleti becsléseknél pontosabb értékeket eredményezhetnek. Ami a csapadék és a hőmérsékleti hibák viszonyát illeti, Magyarországra a csapadék alábecslése a legnagyobb hőmérsékleti fölbecslések időszakára, augusztusra és szeptemberre esik.

Hőmérséklet szempontjából a modell eredményei mind éves, mind évszakos szinten az átlaghőmérséklet növekedését jelzik. A következő évtizedekben 1°C-os, míg az évszázad végére 3°C-ot meghaladó melegezés valószínű. A legjelentősebb változásokat a modell nyáron mutatja: ebben az évszakban a déli-délkeleti tájakon 2021–2050-re 1,5–2°C-os, 2071–2100-ra pedig 4–5°C-os hőmérsékletemelkedés várható. A legkisebb növekedésre mindkét időszakban tavasszal és télen lehet számítani (Szépszó 2014).

A modelleredmények alapján megállapítható, hogy az átlagosnál hűvösebb és melegebb évek (évszakok) váltakozása továbbra is jellemző, sőt, a változékonyság a tavasz kivételével minden évszakban kismértékben növekszik.

A napi középhőmérséklet-értékek gyakoriságainak alakulásáról a modell eredményei azt mutatják, hogy 2021–2050-re a 25 és a 30°C-ot meghaladó maximum-hőmérsékletű, ún. nyári napok és hőségnapok számában várhatóan 10–20 napos, míg az évszázad végére 1 hónapot meghaladó növekedéssel kell szembenéznünk. Ugyanígy a napi minimum-hőmérséklet növekedésével is számolnunk kell: míg a referencia-időszakban hazánkban évi átlagban csupán 1–2 olyan éjszaka fordult elő, amikor a hajnali minimum-hőmérséklet nem csökkent 20°C alá, addig a 21. század végére ezek gyakorisága drasztikusan, akár 30 nappal is megnövekedhet (Szépszó 2014). A modell eredményei alapján a legjelentősebb változások az ország keleti tájain várhatók.

A téli napi középhőmérséklet-értékek várhatóan ugyancsak megváltoznak: az alacsony átlaghőmérsékletű napok száma jelentősen csökken, s a jelenleg még előforduló legkisebb értékek bekövetkezési valószínűsége a modelleredmények alapján az évszázad végére nullához közelít. Ez szintén érvényes lesz a napi minimum- és maximum-hőmérsékletre; például míg a -10°C-ot el nem érő minimum-hőmérsékletű napok száma az 1961–1990 időszakban a mérések alapján átlagosan 11 nap volt, 2071–2100-ra várhatóan már ritkán, 5–6 napon fordulnak elő. A fagyos napok száma is 10–40 nappal csökkenhet a 21. század során, különösen az ország északi tájain.

A csapadék éves összegében a REMO-modell eredményei alapján a következő évtizedekben Európában nem várhatók 10%-ot meghaladó szignifikáns változások. A Kárpát-medencétől északra és keletre növekedést, délre és nyugatra csökkenést valószínűsítene az eredmények, a térségünkben pedig ugyanezt a térbeli szerkezetet mutatják a változások. Az éven belüli eloszlás esetében azonban már a 21. század közepére jelentős átrendeződésre számíthatunk: nyáron és tavasszal a referencia-időszak értékeinél kevesebb, télen több csapadékot mutatnak a modelleredmények, ősszel pedig északon növekedésre, délen csökkenésre számíthatunk (Szépszó 2014). A modell alapján a 21. század utolsó évtizedeire a nyári csapadékcsökkenés mértéke megközelítheti, a téli növekedése pedig meghaladhatja a 30%-ot.

Az ALADIN-Climate-modell adaptálása és Magyarországra vonatkozó előrejelzései

Az ALADIN-Climate-modell a nemzetközi együttműködésben kifejlesztett ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International) rövid távú, korlátos tartományú előrejelző modell (Csima, Horányi 2008; Horányi et al. 2006) klímaváltozata. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál az ALADIN-Climate 4.5. verzióját adaptálták.

A modell éghajlati verziójának kifejlesztéséhez döntően a sugárzás, a nagy skálájú felhő- és csapadékképződés, a mélykonvekció és a talajban lejátszódó folyamatokat leíró sémák módosítására volt szükség:

- külön kezelik a felhős, illetve felhőtlen területek sugárzási viszonyait,
- a sugárzással ellentétben a nagy skálájú felhő- és csapadékképződés leírására a klímaverzióban egyszerűbb sémákat használnak,
- a konvektív folyamatokhoz köthető felhő- és csapadékképződés jellemzése során feltételezik, hogy a konvekció szempontjából aktív rácsdoboz három részre osztható: feláramlási és leáramlási, valamint a környezet által kitöltött területre,
- a talajban lejátszódó legfontosabb hidro-termodinamikai folyamatok leírásakor becslést adnak a földfelszín és a légkör közötti hő- és nedvességcserére, figyelembe véve a felszín-, a talaj- és a vegetációtípusokat, hó esetében pontosabb sémát alkalmazva (Bartholy et. al. 2011).

Az ALADIN-modell a Kárpát-medence térségére a hőmérséklet éves átlagának változásában északnyugatról délkelet felé egyre nagyobb mértékű növekedést prognosztizál (Zsebeházi 2011). Évszakos átlagokat tekintve a hőmérséklet-változás télen nem jelenik meg, a legnagyobb változás a nyári évszakban mutatkozik. Az éves és évszakos átlagok időbeli menetében a hőmérséklet hosszabb időszakon emelkedő tendenciát mutat, ugyanakkor az egyes évek átlagait nagyobb ingadozások jellemzik (Zsebeházi 2011). Tehát a melegedés ellenére a jövőben is szép számmal lesznek az átlagnál hűvösebb évek. Az évszázad közepe felé haladva a változékonyság megnő, és a legnagyobb változékonyság egyöntetűen a nyári időszakban mutatkozik.

A csapadékkal kapcsolatban a modell Magyarország keleti és délkeleti részén szárazodást prognosztizál, míg a nyugati területek nedvesebbé válhatnak. Az éves csapadékösszegek kismértékű csökkenést jeleznek, de az évszakos eltérések jelentősek. Az átmeneti évszakokban csapadéknövekedés várható, télen és nyáron csökkenés, a változékonyság növekedésére pedig nyáron és ősszel lehet számítani (Zsebeházi 2011).

A PRECIS-modell adaptálása és Magyarországra vonatkozó előrejelzései

A PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studies) regionális klímamodellt az 1990-es évek második felében az angliai Hadley Központban fejlesztették ki a központ kapcsolt óceán-légkör általános cirkulációs modelljének légköri komponensét

alapul véve. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén jelenleg a modell 1.8. verziója fut (Pieccka 2012).

A regionális modell kialakításakor – az adaptáció során – főként a fizikai parametrizációs csomagokat módosították, az alábbiak szerint:

- a sugárzásnál a felhőzet mellett figyelembe veszik a vízgőz, a szén-dioxid, az ózon és a különböző nyomgázok hatását is,
- a nagy skálájú felhőzet víztartalma és a felhőfedettség minden rácspontban a teljes vízmennyiségtől függ, amit a hőmérsékletből és a relatív nedvességből határoznak meg,
- a konvekcióval kapcsolatban modellezik a feláramló légrések környezettel történő keveredését, a leáramlást, a légtömegek be- és kiáramlását, valamint a modell leírja a konvektív csapadék párolgását is,
- a talaj termodinamikai folyamatainak leírásakor négyrétegű sémát (0,1, 0,25, 0,65 és 2 méter) alkalmaznak; a hidrológiai folyamatok esetében a növényzet párolgotatását, intercepcióját, valamint a felszíni, illetve felszín alatti lefolyást és párolgást is figyelembe veszik,
- a határreteg folyamatainak reprezentálására egy elsőrendű turbulens keveredési sémát használnak (Bartholy et al. 2011).

A PRECIS-modell validációja során az 1961–1990 közötti időszakra való futtatás azt az eredményt mutatta, hogy a modell hazánk éghajlatának főbb jellegzetességeit helyesen írja le, ugyanakkor jelentős a hőmérsékleti felülbecslés a nyári, kora őszi hónapokban (Pieccka 2012). A többi évszakban a hibák lényegesen kisebbek, és a kapott hibaértékek azonos nagyságrendbe esnek a Magyarországon adaptált három másik regionális klímamodell (ALADIN, RegCM, REMO) eredményeivel (Bartholy et al. 2011), melyekben néhány szimulációnál szintén fellelhető a jelentős tavaszi csapadék- és nyári hőmérsékleti felülbecslés.

A modellel – a többi, Magyarországra adaptált klímamodelltől eltérően – az A1B scenárió mellett az A2 és a B2 emissziós forgatókönyvek alapján is végeztek futtatásokat. Az egyes scenáriókhoz tartozó várható hőmérséklet-változásokat az 1. táblázat szemlélteti.

1. táblázat: A várható átlagos évszakai hőmérséklet-változás (°C) a magyarországi rácspontok átlagában (referencia-időszak: 1961–1990)

| Évek | Scenárió | Hőmérséklet-változás (°C, 1961–1990 átlagához képest) | | | |
|-----------|----------|---|------|-----|-----|
| | | Tavasz | Nyár | Ősz | Tél |
| 2021–2050 | A1B | 1,9 | 3,7 | 2,2 | 2,5 |
| 2071–2100 | B2 | 3,1 | 6,0 | 3,9 | 3,2 |
| | A1B | 3,7 | 6,7 | 5,0 | 4,1 |
| | A2 | 4,2 | 8,0 | 5,2 | 4,2 |

Forrás: Pieccka 2012.

A hőmérséklet emelkedése folyamatosnak tekinthető, a közelebbi jövőre kisebb hőmérséklet-változást (éves átlagban 2,6°C-ot) valószínűsít a modell, mint a távolabbi időszakra (éves átlagban 4,0–5,4°C-ot). A különböző emissziós forgatókönyvek közötti változékonyság nyáron a legnagyobb, a magyarországi várható átlaghőmérsékletben a scenáriótól függően 2°C is lehet a különbség. A többi évszakban csak mintegy feleakkora, 1–1,3°C az ebből fakadó bizonytalanság.

A PRECIS-moddal végzett szimulációk alapján várhatóan a nyári átlaghőmérsékletek emelkednek a legnagyobb mértékben. Ehhez azonban hozzá kell tenni, hogy a Magyarországon a különböző modellekkel elvégzett kísérletek kiértékelésekor (Bartholy et al. 2011; Krüzselyi et al. 2011) az évszakos hőmérséklet-változások között ennek mértéke volt a legbizonytalanabb, itt tértek el leginkább az egyes modellek eredményei.

Az évszázad végére a változékonyság az átmeneti évszakokban megnő, télen pedig lecsökken. Az A1B forgatókönyv esetén a változékonyság kismértékű módosulására számíthatunk; a modellfuttatások alapján összességében melegebb ősziakra számíthatunk (Piecza 2012).

A klímaváltozás egyik leginkább érzékelhető jele az extrém hőmérsékleti indexek alakulása. A modellfuttatások szerint a fagyos napok száma csökken, míg a nyári napok, hőségnapok és forró napok száma egyaránt növekszik. Az 1961–1990 közötti időszakhoz viszonyítva a növekedés mértéke 2021–2050 között pl. a hőségnapok (napi hőmérsékleti maximum > 30 °C) esetében mintegy háromszoros, 2071–2100 között kb. hatszoros (Piecza 2012) – ennek klímasérülékenységi és egészségügyi következményeiről lásd: Király (2015) és Uzzoli (2015).

A csapadékértékek alakulása nem csupán a különböző modellek esetében mutat jelentős eltéréseket, hanem az egyes kibocsátási forgatókönyvekhez kapcsolódó futtatások során is. Míg az A2 és B2 scenáriók kb. 20%-os éves csapadékcsökkenést jeleznek előre a 21. század végére, addig az A1B forgatókönyvnél ilyen nem tapasztalható (Piecza 2012). Az eltérések ellenére a különböző szimulációk egységesen a csapadék éven belüli eloszlásának módosulását és a térség szárazabbá válását prognosztizálják a nyári időszakban. A modell alapján a várható évszakos változásokat a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: Az átlagos évszakos csapadékváltozás (mm/hónap) a magyarországi rácsponatok átlagában (referencia-időszak: 1961–1990)

| Évek | Scenárió | Csapadékváltozás (mm/hónap, 1961–1990 átlagához képest) | | | |
|-----------|----------|---|------------|-----------|----------|
| | | Tavaszi | Nyár | Ősz | Tél |
| 2021–2050 | A1B | 1 (2%) | -10 (-17%) | 4 (8%) | 6 (13%) |
| 2071–2100 | B2 | -5 (-8%) | -28 (-43%) | -8 (-18%) | -2 (-6%) |
| | A1B | 3 (5%) | -19 (-33%) | -2 (-4%) | 15 (34%) |
| | A2 | -8 (-13%) | -37 (-58%) | -4 (-8%) | 5 (14%) |

Forrás: Pieczka 2012.

Alapvetően a tél csapadékviszonyainak jövőbeli alakulása a nyáránál bizonytalanabb. A PRECIS-modell szimulációi az évszak nedvesebbé válását jelzik. Erre utalnak a szignifikáns változások: az A1B 2071–2100-ra vonatkozó eredményei szerint az egész országban, a másik két esetben (A1B, 2021–2050, illetve A2, 2071–2100) pedig elsősorban a Dunántúl térségében (Pieccka 2012). Az átmeneti évszakok várható csapadékváltozásai viszonylag kicsik, nem szignifikánsak, és az egyes szimulációkból adódó eredmények különböző előjelűek. Változás várható a modell alapján a legszárazabb hónapokban, amelyek többé nem a téli hónapok lesznek, hanem a nyáriak, július és augusztus, 20–30 mm körüli átlagos csapadékösszeggel: tehát a modell nyárra egyértelműen az éghajlat szárazabbá válását valószínűsíti a Kárpát-medencében. Valószínűleg a jövőben sokkal kevesebb kiugróan csapadékos nyárra számíthatunk. Az egyes években várhatóan az átlaghoz közeli értékek lesznek jellemzők, melyek között váltakozva előfordulnak majd szárazabbak és kevésbé szárazak.

A modelleredmények szerint a jövőben éves szinten kevesebb csapadékos napra számíthatunk, emellett a leghosszabb csapadékmentes időszak hossza is növekedni fog, így az aszályhajlam megerősödésére, szárazodásra kell számítani (ennek földhasználati következményeiről lásd Farkas, Lennert 2015). Ugyanakkor nem egyértelműek a változások a nagyobb csapadékok esetében. Az A1B szimuláció alapján a csapadékos napok éves számának csökkenésével egy időben a nagy csapadéku helyzetek gyakorisága megnő, így a csapadék intenzitása is növekszik. Ezt a másik két forgatókönyvvel készített futtatás viszont nem jelzi: a kevesebb és több csapadékkal járó időjárási helyzetek száma egyaránt csökken, az éves intenzitás pedig nem változik (Pieccka 2012).

A RegCM-modell adaptálása és Magyarországra vonatkozó előrejelzései

A RegCM (Regional Climate Model) regionális skálájú hidrosztatikus éghajlati modellt az amerikai Légköri Kutatások Nemzeti Központjában fejlesztették ki. A modellt regionális klímakutatásokhoz és évszakos előrejelzésekhez használják világszerte. A RegCM-modell fejlesztése során folyamatosan több szempontot építettek be a modellbe:

- figyelembe veszik a vízgőz, az ózon, az oxigén és a szén-dioxid gázok hatásait is,
- újabb üvegházhatású gázokat (N_2O , CH_4 , CFC) is figyelembe vesznek,
- pontosabban írják le a felhőzet hatását,
- leírják az aeroszol-részecskék, illetve a felhő-jég hatásokat,
- jelentős előrelépés történt a felhőzetet és csapadékfolyamatokat leíró részekben,
- bemeneti adatként alkalmazzák a finom felbontású domborzati és felszínborítottsági adatbázist (Bartholy et al. 2011).

Ezen kívül a RegCM-modell magyarországi adaptálása során az ELTE Meteorológiai tanszékén a tapasztalt szisztematikus modellhiba elhárítására a modell parametrizációját megváltoztatták (Torma 2011).

A modell 21. századra vonatkozó hőmérsékleti előrejelzése emelkedő tendenciát mutat. Az átlaghőmérséklet várható emelkedése természetesen nem azt jelenti, hogy minden rákövetkező év átlaghőmérséklete melegebb lesz az azt megelőzőnél, hanem hogy a vizsgált 30 éves időszakok (2021–2050; 2071–2100) átlagban várhatóan melegebbek lesznek az azt megelőző 30 év átlagánál. A felmelegedés várhatóan a 21. század végére ölt drasztikus mértéket, amikor 3°C körüli éves középhőmérséklet-emelkedés valószínűsíthető a Kárpát-medencében és közvetlen környezetében (Torma 2011). Területi különbségeket tekintve a század közepére a legkisebb mértékű éves középhőmérséklet-változás az ország északnyugati területén (Kisalföld), míg a század végére a délnyugati területeken valószínűsíthető (Mecsek és környéke).

Az évszakos átlaghőmérsékletek várható alakulásában a legnagyobb mértékű változás a század közepén tavaszra ($1,7^{\circ}\text{C}$), míg a legcsekélyebb változás nyárra ($0,7^{\circ}\text{C}$) tehető. Az évszázad végére azonban fordított eredmények adódnak, nyáron várható a legnagyobb mértékű melegedés ($3,5^{\circ}\text{C}$), a legcsekélyebb pedig tavasszal ($2,8^{\circ}\text{C}$), amely megközelíti a téli és őszi várható melegedések mértékét ($3,0^{\circ}\text{C}$). Télen a hidegrekordok száma várhatóan csökkenni fog, míg nyáron a klíma egyértelműen változékonyabb lesz. A napi középhőmérsékletek átlaga a magasabb hőmérsékletek irányába fog eltolódni $3\text{-}4^{\circ}\text{C}$ -kal, és a melegrekordok gyakoribbakká fognak válni (Torma 2011).

A modelleredmények alapján az éves csapadékösszegekben nem mutatkozik lényeges változás. Ez az eredmény abból is fakad, hogy Magyarország a szárazabbá, illetve csapadékosabbá válás képzeletbeli határzónáján helyezkedik el (Torma 2011).

Az éves csapadékösszeggel ellentétben az évszakos csapadékösszegekben jelentős változások várhatók. A 2021–2050 közötti időszakban a legjelentősebb változás nyáron, míg a legkisebb télen valószínű. Télen és tavasszal a csapadékösszeg csökkenése egyöntetű, azonban nyáron és ősszel egy nyugat-kelet megosztottság mutatkozik. Nyugaton és délnyugaton a nyári és őszi csapadékösszegek akár $20\text{-}30\%$ -kal csökkenhetnek, míg ugyanezen időszakokban a keleti, északkeleti területek $10\text{-}20\%$ -kal csapadékosabbá válhatnak. A magasabb fekvésű helyeken (Bakony, Mátra, Bükk) az évszakok szárazabbá válása valószínűsíthető. A 2071 és 2100 közötti időszakban minden évszakban átlagosan kismértékben ugyan, de növekedni fog az évszakos csapadékösszeg, kivéve nyáron (Torma 2011), tehát a modell igen jelentős változást valószínűsít a század közepétől kezdődően a század végéig.

Röviden összefoglalva: Magyarországon az 21. század végén enyhébb, de csapadékosabb telek, valamint forróbb és szárazabb nyarak valószínűsíthetőek az A1B éghajlati forgatókönyv alapján integrált RegCM regionális klímamodell szerint.

A hőmérsékleti extrémumok alakulásával kapcsolatban a modell nagymértékű emelkedést mutat. A 21. század közepére a nyári napok (napi hőmérsékleti maximum $> 25^{\circ}\text{C}$) számának növekedése közel 29% , míg a század végére 200% -ot is meghaladó lehet (Torma 2011). A várhatóan legnagyobb fokú melegedésnek kitett területek az ország déli részén, a legkisebb fokú változást elszenvedő területek az ország

északi részén lesznek. A fagyos napok (napi hőmérsékleti minimum ≤ 0 °C) száma ugyanakkor várhatóan csökkenni fog, a 2021–2050 közötti időszakban az 1961–1990 időszakhoz viszonyítva országos átlagban 24%-kal, az évszázad végére közel 66%-kal (Torma 2011).

A csapadékkal kapcsolatos szélsőségek egyik markáns mutatója a száraz napok (napi csapadékösszeg nem haladja meg az 1 mm-t) várható alakulása. A RegCM-modell alapján a század közepére az ország déli részén várható az egymást követő száraz napok maximális számának növekedése, a század végére pedig már az ország teljes területén az egymást követő száraz napok maximális számának emelkedésével kell számolni. Az eredmények azt mutatják, hogy az évenkénti csapadékos napok átlagos száma kismértékben csökkenni fog az évszázad közepére, közel 10%-kal. A 21. század végére a csökkenő tendencia folytatódni, illetve valamelyes erősödni fog, mértéke várhatóan 13% körülire tehető (Torma 2011).

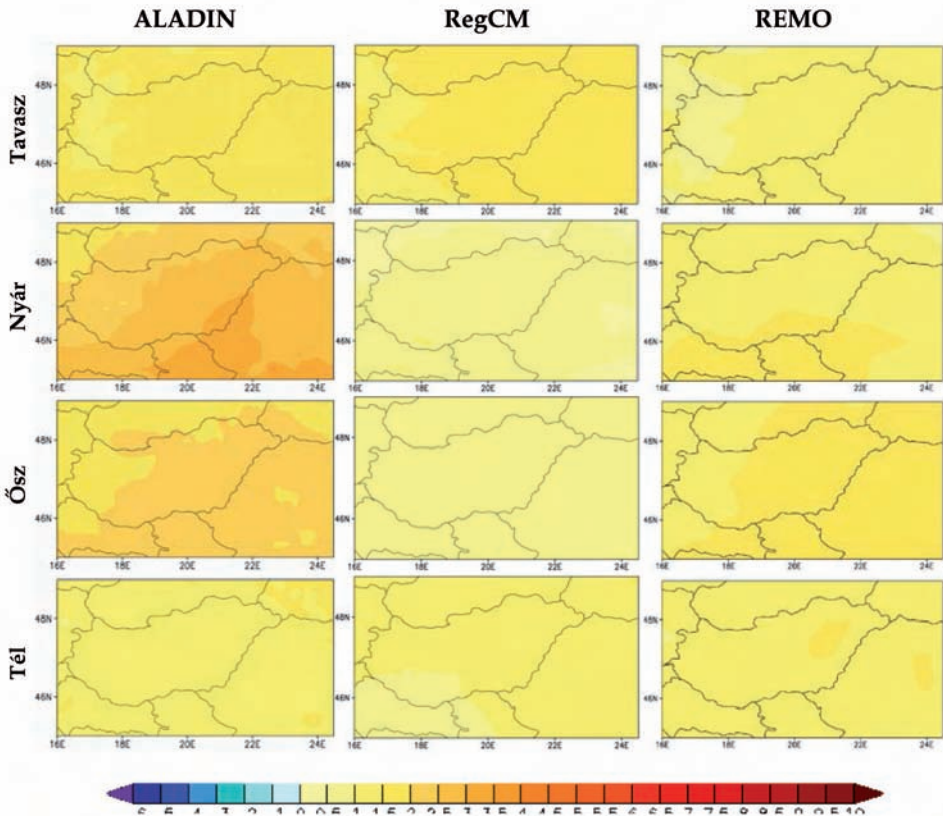
A modell érdekes eredményeket adott az extrém csapadékos napok (napi csapadékösszeg meghaladja a 20 mm-t) számának várható változásairól. A 2021–2050 közötti időszakig a magasabb területeken az extrém csapadékos napok számának kismértékű csökkenését jelzi előre (pl. a Bakonyban), míg az évszázad végére az ország döntő többségén e napok számának növekedését mutatja. A modell eredményei alapján a napi csapadékontenzitás növekedni fog. A RegCM-modell tehát azt valószínűsíti, hogy a jövőben kevesebb alkalommal, de több csapadék fog hullani napi átlagban Magyarország területén (Torma 2011).

A Magyarországra adaptált modellek eredményeinek összegző jellemzése

Magyarországon négy regionális klímamodellt alkalmaznak napjainkban az éghajlatváltozás hazai jellemzőinek vizsgálatára: az ALADIN-Climate- (Csima, Horányi 2008; Zsebeházi 2011), a PRECIS- (Pieczka 2012), a RegCM- (Torma 2011) és a REMO-modelleket (Szépszó, Horányi, 2008). Mindegyik modellel kétféle kísérletet hajtottak végre. A szimulációkat 10-25 km-es felbontáson végezték el, a finomabb felbontás esetén egy szűkebb, a Kárpát-medencét magában foglaló tartományon, a durvább felbontás esetén pedig egy nagyobb, Közép- és Kelet-Európát lefedő tartományon (Bartholy et al. 2011).

A modellek a magyarországi hőmérséklet évszakos jellemzőit realiztikusan és hasonló nagyságú hibákkal írják le. A csapadék esetében a különböző kísérletek eredményei jóval nagyobb eltéréseket mutatnak. Egyes modellek (pl. az ALADIN-modell) az évszakos menetet megfelelően, a mennyiséget ugyanakkor nagy hibával jellemzik. Látható példa olyan szimulációra (pl. RegCM), amely a csapadék éven belüli eloszlását nem képes leírni; illetve vannak olyan modellek, melyek kisebb fölé- vagy alábecsléssel, de realiztikusan jellemzik a csapadék éven belüli menetét – a REMO és a PRECIS ezek közé tartozik (Szépszó 2014).

1. ábra: A modelleredmények alapján várható évszakas átlaghőmérséklet-változás (°C) a 2021–2050 időszakban (referencia-időszak: 1961–1990)

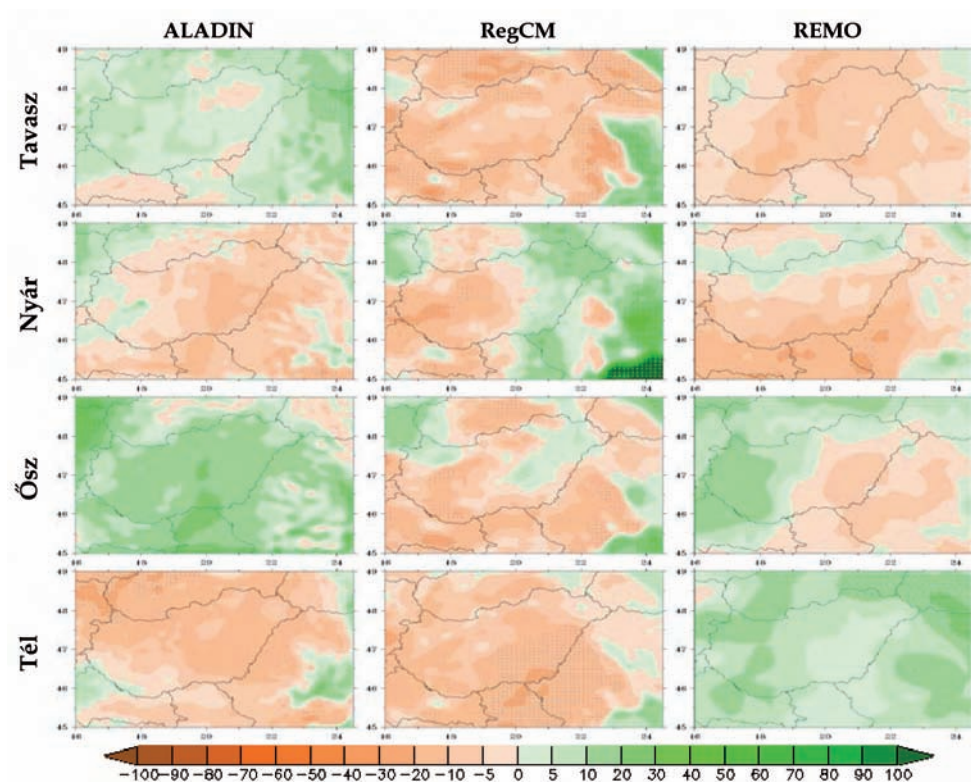


Forrás: Bartholy, Bozó, Haszpra 2011.

A 21. században várható hőmérséklet-változás irányában a különböző regionális modellek eredményei megegyeznek: a szimulációk az ország teljes területére és minden évszakra szignifikáns hőmérsékletemelkedést mutatnak. Az 1. ábrán a társadalmi-gazdasági modellezési munkánk szempontjából fontos 2021–2050 közötti időszak várható évszakas átlaghőmérséklet-változása látható az egyes modelleredmények alapján.

Ugyanakkor a jelzett növekedés mértékében 2021–2050-re 1, 2071–2100-ra 2,5°C eltérés is lehet az egyes modellek között. A modellek a különböző hőmérsékleti indexek jövőbeli előfordulására is ugyanolyan irányú változásokat jeleznek: az eredmények alapján hazánkban 2021–2050-re és 2071–2100-ra egyaránt a magas napi közép- és maximumhőmérséklet-értékek (pl. hőségriadós napok, forró napok) gyakoribbá válásával és az alacsony minimum-hőmérsékletű (pl. a fagyos) napok ritkább előfordulásával kell számolnunk.

2. ábra: A modelleredmények alapján várható évszakos csapadékösszeg-változás (%) a 2021–2050 időszakban (referencia időszak: 1961–1990)



Forrás: Bartholy, Bozó, Haszpra 2011.

A csapadék várható alakulásáról a kép az egyes modellek alapján összetett, például az átlagos csapadékösszegre vonatkozó eredmények már a változások irányában is eltéréseket mutatnak. Egyedül nyáron mutat mindegyik modell (2021–2050-re 5% alatti, 2071–2100-ra pedig 18–43%-os) csapadékcsökkenést, a többi évszakban csökkenés és növekedés egyaránt lehetséges (Szépszó 2014). Alapvető jellemvonás, hogy a változások nagysága, de sok esetben a bizonytalanság is növekszik az évszázad végére. Ebből következően a regionális klímamodellek csapadék-előrejelzései kevésbé megbízhatók, mint a hőmérsékleti előrejelzések. A 2. ábra a munkánk szempontjából fontos, 2050-ig várható évszakos csapadékösszeg várható relatív megváltozását mutatja az egyes modelleredmények alapján.

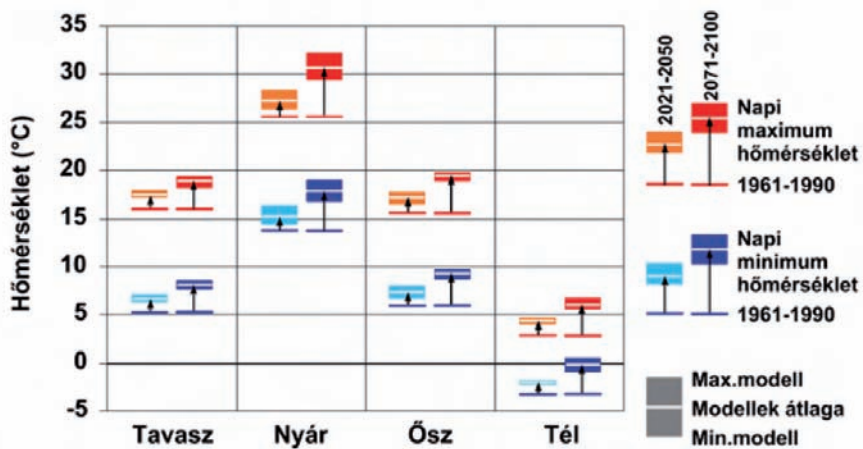
A klímaváltozás Magyarországon elsősorban a szélsőséges időjárási események (hőhullámok, forró napok, heves esőzések, zivatarok, aszály, villámárvizek, erősödő szelek stb.) gyakoriságának növekedésében – amelyeket már napjainkban is tapasztalhatunk – érhető tetten, amelynek társadalmi-gazdasági következményei intenzíven jelentkeznek, mint az átlagos hőmérsékleti és csapadékértékek változásának

hatásai. Az ehhez történő alkalmazkodás a társadalom egészére nézve nagy kihívást jelent. Emiatt fontosak a regionális klímamodellek azon eredményei, amelyek a szélsőségek várható változásait igyekeznek megbecsülni.

A hőmérsékleti szélsőségek elemzéséhez kézenfekvő változók a napi maximum- és minimum-hőmérsékletek idősorai (3. ábra). Mind a napi maximum-, mind a napi minimum-hőmérsékletek legnagyobb mértékben várhatóan nyáron fognak növekedni, ugyanakkor erre az évszakra esik a modellbecslések legnagyobb bizonytalansága is. A maximum-hőmérsékletek minden évszak és mindkét időszak esetében valamelyest jobban növekednek (0,1–0,3°C-kal), mint a minimum-hőmérsékletek. A negatív extrémumok várhatóan csökkenni (ami szintén melegedésre utal).

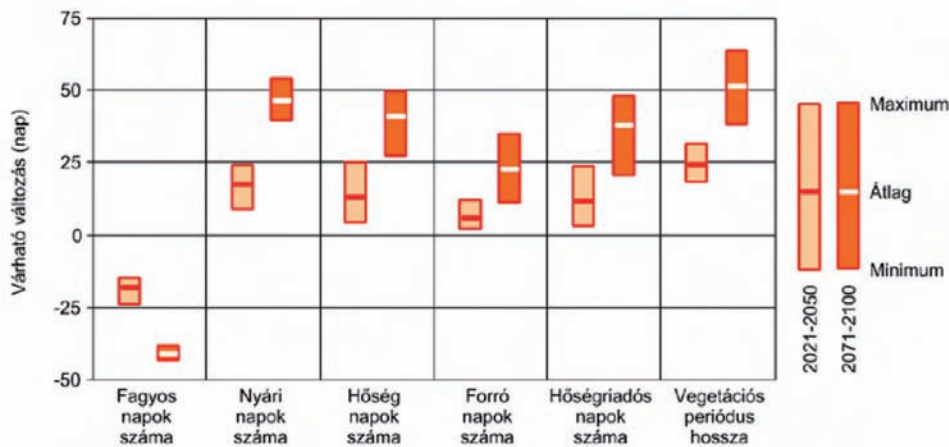
A napi minimum- és maximumértékek alakulása mellett lényeges a szélsőséges hőmérsékleti értékek várható változásának modellezése is, amelyet a 4. ábra szemléltet.

3. ábra: A napi maximum-hőmérsékletek (narancs és piros szín) és a napi minimum-hőmérsékletek (világoskék és sötétkék szín) Magyarország területére várható értékei 2021–2050-re és 2071–2100-ra. (Referencia: az E-OBS adatbázis 1961–1990-es átlagos értékei)



Forrás: Bartholy, Bozó, Haszpra 2011.

4. ábra: Hőmérsékleti indexek várható változása 2021–2050-re és 2071–2100-ra.
Referencia-időszak: 1961–1990



Forrás: Bartholy, Bozó, Haszpra 2011.

A várható változás mértéke a meleg szélsőségek (nyári, hőség-, forró és hőségriadós napok) esetében a közeljövőre átlagosan 12 nap, a távolabbi jövőre 37 nap, amely a különböző indexek esetén jelentősen eltérő százalékos mértéket jelent.

Míg a kis csapadékú napok száma általában várhatóan gyengén csökken a jövőben, addig a nagyobb napi csapadékú indexek a nyarat kivéve növekvő tendenciát jeleznek. A száraz időszakok maximális hossza esetén szintén növekvő tendenciára számíthatunk. Ez a tendencia már a 21. század közepén is érzékelhető, s a század végére jelentősen erősödik. A csapadékindeks várható változásai arra utalnak, hogy hazánk klímája kismértékben szárazabbá válik: mind az őszi és nyári száraz időszakok, mind a nagyobb, intenzívebb csapadékok előfordulásának (a nyár kivételével) kismértékű növekedésére számíthatunk. A heves csapadékesemények gyakoriságának ilyen évszakos különbségei némiképp meglepők, tekintve, hogy az intenzív viharokat többnyire a nyári konvektív eseményekkel hozzuk összefüggésbe.

Az ismertetett modellek mellett a klímaváltozással foglalkozó hazai kutatók más, Európában futó projektekben is részt vettek, amelyek több országra – közöttük Magyarországra – kiterjedő előrejelzéseket eredményeztek. Ilyen pl. a 2006–2009 között futó CECILIA (Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment – Halenka 2007), amelyben az ELTE Meteorológiai Tanszéke aktívan közreműködött, hozzájárulva a regionális klímadinamikai kutatásokhoz. A program elsődleges célja volt, hogy szélesítse ismereteinket a Közép- és Kelet-Európában várható helyi klímaváltozásról és annak erdészetre, mezőgazdaságra, vízháztartásra és levegőminőségre gyakorolt hatásairól. Az elmúlt évek nemzetközi munkáihoz kapcsolódik a CLAVIER (Climate Change and Variability: Impact on Central and Eastern Europe) programban való részvétel (Torma 2011), valamint a PRUDENCE-projekt,

amelynek keretében végzett korábbi modellszimulációk – a négy hazai modellhez hasonlóan – a Kárpát-medence térségére valószínűsített változások közül szintén a nyári időszak szárazabbá válását jelezték (Bartholy et al. 2008).

A modellek eredményeinek egymás mellé tétele rávilágít arra, hogy az előrejelzések bizonytalanságával is foglalkozni kell. A bizonytalanságok csökkentésére kifejlesztett módszer lényege, hogy kiterjesztik a vizsgálatokat további regionális klímamodellszimulációkkal, majd több modell eredményeinek segítségével számítják ki az egyes lehetőségek bekövetkezési valószínűségét. Így valószínűségi térkép állítható elő, amely elegáns eszköz a szimulációk bizonytalanságainak számszerűsítésére.

Következtetések

Mára nyilvánvaló, hogy az éghajlat változékonysága és változása befolyásolja az európai és hazai termelési (pl. mezőgazdaság, erdészet és halászat) és gazdasági ágazatok (pl. energiatermelés, turizmus), valamint a természeti környezet tulajdonságait és szerepét. A hatások némelyike előnyös, de a becslések szerint a legtöbb esetben a várható következmény kedvezőtlen (EEA 2004).

A klímaváltozás társadalmi-gazdasági hatásainak vizsgálatakor célszerű onnan elindulni, hogy az egyes területek – országok, régiók, kistérségek vagy járáások – az őket érő hatásokra különbözőképpen reagálnak, eltérő jellegzetességeket mutatnak az éghajlatváltozással kapcsolatban. Ennek feltárásához módszerként a CIVAS-modellt (Climate Impact and Vulnerability Assessment Scheme) alkalmazzák, amellyel az egyes területi szintek sérülékenysége modellezhető az éghajlatváltozás szempontjából (Bartholy et al. 2011).

A lokális éghajlati hatások a társadalmi-gazdasági-környezeti térben egyaránt jelentkeznek (pl. aszály, terméshozam-kiesés, mezőgazdasági jövedelmek csökkenése). Ezért a klímaváltozás területi hatásait a kitettség (exposure) → érzékenység (sensitivity) → várható hatás (impact) → adaptivitás (adaptive capacity) → sérülékenység (vulnerability) láncolatban kell vizsgálni.

A Magyarországon futtatott klímamodellek – bizonyos esetekben egymásnak ellentmondó megállapításaikkal is – együttesen arra hívják fel a figyelmet, hogy már a 21. század közepére olyan éghajlati változásokkal kell számolni, amelyek a társadalmi-gazdasági folyamatokra is erőteljes hatást gyakorolnak. Annak érdekében, hogy a várható negatív hatásokat mérsékelni, az esetleges pozitív hatásokat erősíteni tudjuk, a klímamodellekből származó eredmények megbízhatóságának fokozására és az ezekre az eredményekre épülő társadalmi-gazdasági adaptációs lehetőségek, módszerek kidolgozására van szükség.

Irodalom

- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy., Szabó, P. (2008): Analysis of expected climate change in the Carpathian basin using the PRUDENCE results. *Időjárás*, 3–4., 249–264.
- Bartholy J., Bozó L., Haszpra L. (szerk.) (2011): *Klímaváltozás – 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére*. MTA, ELTE, Budapest
- Bartholy J., Pongrácz R. (2011): *Regionális éghajlatváltozás – Modelleredmények elemzése a Kárpát-medence térségére*. <http://nimbus.elte.hu/oktatas/metfuzet/EMF024/PDF/01-Bartholy-Pongracz-EMF24.pdf> (Letöltés: 2015. augusztus 6.)
- Csima, G., Horányi, A. (2008): Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 3–4., 155–177.
- EEA (2004): *Impacts of Europe's Changing Climate: An Indicator-Based Assessment*. EEA Report No 2/2004. European Environment Agency, Copenhagen
- Farkas J. Zs., Lennert J. (2015): *A földhasználat-változás modellezése és előrejelzése Magyarországon*. Jelen kötetben.
- Horányi, A., Kertész, S., Kullmann, L., Radnóti, G. (2006): The ARPEGE/ALADIN mesoscale numerical modeling system and its application at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 3–4., 203–228.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007): *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf (Letöltés: 2015. szeptember 1.)
- Jacob, D., Podzun, R. (1997): Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1., 119–129.
- Király G. (2015): *A magyarországi népesség „status quo” morbiditási és mortalitási jövőképe 2016 és 2051 között*. Jelen kötetben.
- Kovács A. D. (2015): *A klímamodellezés nemzetközi eredményei*. Jelen kötetben.
- Krüzseli, I., Bartholy, J., Horányi, A., Pieczka, I., Pongrácz, R., Szabó, P., Szépszó, G., Torma, Cs. (2011): The future climate characteristics of the Carpathian Basin based on a regional climate model mini-ensemble. *Advances in Science and Research*, 6., 69–73.
- Majewski, D. (1991): The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst. In: *ECMWF Seminar on numerical methods in atmospheric models. Vol. 2*. Reading. pp. 147–191.
- OMSZ, ELTE (2006): *Klímapolitika. Éghajlatváltozási forgatónyvek a Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiához*. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium
- Pieczka I. (2012): *A Kárpát-medence térségére vonatkozó éghajlati scenáriók elemzése a PRECIS finom felbontású regionális klímamodell felhasználásával*. Doktori értekezés. ELTE, Budapest
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dumenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U., Schulzweida, U. (1996): *The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate*. Report 218., Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg https://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/MPI-Report_218.pdf (Letöltés: 2015. szeptember 1.)
- Szépszó, G., Horányi, A. (2008): Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary. *Időjárás*, 3–4., 203–231.
- Szépszó G. (2014): *A REMO regionális éghajlati modellen alapuló klímadinamikai vizsgálatok a Kárpát-medence éghajlatának jellemzésére*. Doktori értekezés. ELTE, Budapest

- Torma Cs. (2011): Átlagos és szélsőséges hőmérsékleti és csapadék viszonyok modellezése a Kárpát-medencére a XXI. századra a RegCM regionális klímamodell alkalmazásával. Doktori értekezés. ELTE, Budapest
- Uzzoli A. (2015): *Klímamodellek a társadalmi alkalmazkodásban – a sérülékenységvizsgálatok hazai eredményei és tapasztalatai*. Jelen kötetben.
- Zsebeházi G. (2011): *Magyarország éghajlatának jellemzése az ENSEMBLES projektbeli és a hazai regionális modelleredmények együttes vizsgálatával*. Szakdolgozat. ELTE, Budapest