



**MAGYARORSZÁG HOSSZÚ TÁVÚ TÁRSADALMI ÉS
GAZDASÁGI FEJLŐDÉSI PÁLYÁJÁNAK ELŐREJELZÉSE**

WP2 Szakirodalmi áttekintés

D2.2 MAGYARORSZÁGI KLÍMAMODELLEK



MTA Közgazdaság- és Regionális Tudományi Kutatóközpont

Regionális Kutatások Intézete

2015

Készítette:

Név: dr. Hoyk Edit

MTA KRTK RKI ATO

<http://nater.rkk.hu>

A jelen tanulmány kiadása Izland, Liechtenstein és Norvégia EGT-támogatásokon és a REC-n keresztül nyújtott anyagi hozzájárulásával valósult meg. A jelen dokumentum tartalmáért az MTA KRTK felelős.

A Projekt izlandi, liechtensteini és norvégiai támogatásból valósul meg.

A szerződés azonosítószáma: EEA-C12-11



REGIONAL ENVIRONMENTAL CENTER

Tartalomjegyzék

WP2 Szakirodalmi áttekintés.....	1
Bevezetés	4
Problémafelvetés, a téma jelentősége.....	4
Célok.....	4
Módszerek.....	5
A témakör elméleti háttere	6
Történeti áttekintés	7
A Magyarországra adaptált klímamodellek eddigi eredményei	8
A REMO modell adaptálása és Magyarországra vonatkozó előrejelzései	8
Az ALADIN-Climate modell adaptálása és Magyarországra vonatkozó előrejelzései	10
A PRECIS modell adaptálása és Magyarországra vonatkozó előrejelzései	11
A RegCM modell adaptálása és Magyarországra vonatkozó előrejelzései.....	14
A Magyarországra adaptált modellek eredményeinek összegző jellemzése... ..	16
Következtetések – A klímamodellek által kirajzolt sérülékenység Európában és Magyarországon.....	21
Irodalom	25
Tartalomjegyzék	Hiba! A könyvjelző nem létezik.

Bevezetés

Problémafelvetés, a téma jelentősége

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

Az alkalmazott – nemzetközi és hazai – klímamodellek kiinduló lépése az IPCC jelentése az emissziós forgatókönyvekről (SRES), amelynek keretében valójában az antropogén tevékenység mértékét igyekeznek megbecsülni. A felvázolt forgatókönyvek közül a hazai klímamodellek elsősorban az A1B szcenáriót veszik alapul, amely 1499 GtC összesített szén-dioxid kibocsátással számol 1990-2100 között. Ezen kívül gyors gazdasági növekedéssel, a globális népesség kezdetben növekvő, majd csökkenő számával kalkulál, illetve a fosszilis és a nem fosszilis energiaforrások felhasználása közötti egyensúlyra épít. Ez a megközelítés bemeneti értéként egy közepesen optimista becslést jelent a klímamodellek számára.

A nemzetközi klímamodellek megjelenését a számítógépes technika fejlődése tette lehetővé, amelynek eredményeképpen az első éghajlati jellegű szimulációra 1967-ben került sor (Götz, 2004). Az azóta eltelt időben a nemzetközi klímamodellek sorozata látott napvilágot, amelyek közül pár modellt hazai körülményekre adaptáltak. Ez az adaptáció lehetőséget ad az eredmények nemzetközi összehasonlítására, valamint alkalmazásukkal megkezdődött az éghajlat változásának magyarországi modellezése. Erre építve – az eredményes alkalmazkodási feladatok megtervezése érdekében – képzelhető el a gazdaság és a társadalom jövőbeli alakulásának felvázolása.

Célok

A fejezet fő célkitűzése a nemzetközi adaptáció alapján Magyarországon lefuttatott klímamodellek bemutatása, fontosabb eredményeik összefoglalása.

A létező klímamodellek közül számunkra nem a planetáris szintű modellezés vezet eredményre, hanem a regionális, illetve az országos léptékű modelleredmények azok, amelyek célkitűzéseinkhez alkalmazhatók. Ezek a regionális éghajlati modellek – miként a rövidtávú időjárás-előrejelzésben – egy kisebb tartományra készítenek projekciókat a globális modellek eredményeit határfeltételekként felhasználva. A regionális modellek többnyire már csak az éghajlati rendszer légköri komponensének leírását tűzik ki célul, ezért kifejlesztésük általában a rövidtávú előrejelzésben is használt időjárási modellek adaptálását és kiterjesztését jelenti 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.

Módszerek

A téma feldolgozása alapvetően a fellelhető szakirodalom adaptációjával 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 négy magyarországi klímamodellből három esetben doktori értekezés született, emellett az eredményekről számos cikk is megjelent. A REMO regionális éghajlati modell hazai eredményeiről Szépszó Gabriella (OMSZ), a PRECIS modellről Pieczka Ildikó (ELTE), míg a RegCM modellfuttatásról Torma Csaba Zsolt (ELTE) készített PhD dolgozatot. Az ENSEMBLES modellek közé tartozó ALADIN-Climate modell futtatásának eredményeit Zsebeházi Gabriella (ELTE) egy szakdolgozat keretei között foglalta össze.

A fejezetben konkrétan bemutatásra kerülő klímamodellekre vonatkozó szakirodalmon kívül azokat a nemzetközi irodalmakat is feldolgoztuk, amelyek a hazai adaptáció hátterét adják meg, illetve a nemzetközi eredményekkel való összehasonlíthatóságot biztosítják. A feldolgozott nemzetközi és hazai szakirodalom aránya – enyhe hazai túlsúly mellett – megközelíti az 50 %-ot (46 % nemzetközi irodalom).

A témához kapcsolódó PhD értekezések és szakcikkek mellett releváns szakpolitikai dokumentumok is feldolgozásra kerültek, amelyek közül kiemelhető az IPCC negyedik és ötödik helyzetértékelő jelentése. A fejezetben – és a modellezés során – elsősorban a 2007-es negyedik Helyzetértékelő Jelentés megállapításaira támaszkodunk, tekintve, hogy a teljes NaTÉR projekt is ennek a jelentésnek a megállapításait veszi alapul bemenetként.

A klímamodellek felbontása hazai körülmények között alapvetően kétféle. Az ALADIN és a RegCM modellek 10, 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 kisebb területegységre vonatkozóan. A tesztfuttatás eredményei alapján a térbeli rács felbontásának növelése nem javít a Magyarországra vonatkozó eredmények pontosságán, így az eredményekből következően a modellek a 18-25 km-es rácstávolsággal 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, amit „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 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 energia-felhasználás, az ipari és mezőgazdasági szerkezet stb. változásainak) az éghajlati rendszerre gyakorolt „sugárzási kényszerét” (azaz mennyiben módosulnak ezáltal a földi sugárzási viszonyok), s kiszámítjuk a hatással egyenértékű szén-dioxid kibocsátást, valamint az ennek megfelelő koncentrációt. 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 nézve.

Napjainkra a nagy klímakutató központokban fejlesztett globális éghajlati modellek kidolgozottsága elérte azt a szintet, hogy ezek a modellek képesek megbízhatóan leírni az éghajlati rendszer elemeinek viselkedését a közöttük lévő összetett kölcsönhatásokkal együtt, továbbá jól használhatók az éghajlatváltozás globális, nagyskálájú jellemzőinek vizsgálatára (Szépszó 2014).

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, 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 Magyarország térségére (OMSz-ELTE 2006).

Magyarországon 2003-ban fogalmazódott meg az igény, hogy a hagyományos, statisztikai alapú éghajlatkutató mellett induljon be a dinamikus klímamodellre is. A regionális éghajlati modellezés egy 2005-2007 között megvalósult NKFP projekttel 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 klímamodelllezési háttér megteremtése volt, ami alapot szolgáltat a Kárpát-medencében várható éghajlat-változás becslésére.

A jövőre vonatkozóan a hazai modellkísérletekhez az antropogén tevékenység alakulásával kapcsolatos nagyskálájú kényszereket többségében a globális modellek A1B kibocsátási forgatókönyvével előállított eredményei szolgáltatták. Ez a scenárió a forgatókönyvek között egy átlagos változatnak tekinthető a XXI. századra vonatkozóan. A PRECIS esetében azonban az A2 és a B2 forgatókönyveket is alkalmazták, melyek az évszázadvégi állapotok egy-egy pesszimista, illetve optimista realizációját 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-erőjelző modelljén alapuló ECHAM nevű légköri általános cirkulációs modellt dolgozott ki az 1980-as évek második felében, ezt követte a REMO (REgional MOdel) regionális éghajlati modell (Jacob es Podzun, 1997) kidolgozása, amelyet a Német Meteorológiai Szolgálat rövidtávú előrejelző modellje, az Europa Modell (Majewski 1991) es 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 XXI. 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 fölé- és a nedvességi mezők alábecslésére a Duna vízgyűjtő-területén. Éppen emiatt a hibajelenség miatt állapítható meg, hogy a többi modell „pontosságával” összevetve a REMO modell nagyobb mértékben alkalmas pl. az Alpok térségének hőmérsékleti előrejelzésére, mint Magyarországra. 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 csapadéokra 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 fölébecslések 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 fokot meghaladó melegedés valószínű. A legjelentősebb változásokat a modell nyáron mutatja: ebben az évszakban a déli-délkeleti tájakon 2021–2050-re 1,5-2 fokos, 2071–2100-ra pedig 4-5 fokos 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 marad, sőt, a változékonyság a tavasz kivételével minden évszakban kismértékben növekszik.

A napi középhőmérséklet-értékek gyakoriságainak alakulására vonatkozóan a modell eredményei azt mutatják, hogy 2021–2050-re a 25 és a 30 fokot meghaladó maximumhőmérsékletű, ún. nyári napok és hőségnapok számában várhatóan 10-20 napos, míg az évszázad végére 1 hónapot meghaladó növekedéssel kell szembenéznünk. Ugyanígy a napi minimumhőmérséklet növekedésével is számolnunk kell: míg a referencia-időszakban hazánkban évi átlagban csupán 1-2 olyan éjszaka fordult elő, amikor a hajnali minimumhőmérséklet nem csökkent 20 fok alá, addig a XXI. 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 minimumhőmérsékletű 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 XXI. 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 valószínűsítenek az eredmények, a térségünkben pedig ugyanezt a térbeli szerkezetet mutatják a változások. Az éven belüli eloszlás esetében azonban már a XXI. 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 XXI. utolsó évtizedekre a nyári csapadékcsökkenés mértéke megközelítheti, a téli növekedésé 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) rövidtávú, korlátos tartományú előrejelző modell (Horányi et al., 2006; Csima és Horányi, 2008) klímaváltozata. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál az ALADIN-Climate 4.5 verzióját adaptálták.

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

- Külön kezelik a felhős, illetve felhőtlen területek sugárzási viszonyait,
- a sugárzással ellentétben a nagyskálájú 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 egy pontosabb sémát alkalmazva (Bartholy et. al., 2011).

Az ALADIN modell a Kárpát-medence térségére a hőmérséklet éves átlagának változásában észak-nyugatról dél-kelet felé egyre nagyobb mértékű növekedést prognosztizál (Zsebeházi, 2011). Évszakos átlagokat tekintve a hőmérsékletváltozás télen nem jelenik meg, a legnagyobb változás a nyári

évszakban mutatkozik. Az éves és évszagos átlagok időbeli menetét tekintve az is látható, hogy 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 átlagosnál 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 – dél-keleti részén szárazodást prognosztizál, míg a nyugati területek nedvesebbé válhatnak. Az éves csapadékösszegek kismértékű csökkenést jeleznek, de az évszagos 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 (Piecška, 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 nagyskálájú 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 környezetükkel 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 párologtatását, intercepcióját, valamint a felszíni, illetve felszín alatti lefolyást és párolgást is figyelembe veszik,
- a határréteg folyamatainak reprezentálására egy elsőrendű turbulens keveredési séma használatos (Bartholy et al., 2011).

A PRECIS modell validációja során az 1961-1990 közötti időszakra futtatás azt az eredményt mutatta, hogy a modell hazánk éghajlatának főbb jellegzetességeit helyesen írja le, ugyanakkor jelentős a hőmérsékleti felülbecslés a nyári, kora

ősz hónapokban (Piecza, 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 klímamodellől eltérően – az A1B scenárió mellett az A2 és a B2 emissziós forgatókönyvek alapján is végeztek futtatásokat. Az egyes scenáriókhöz tartozó várható hőmérsékletváltozásokat az 1. táblázat szemlélteti.

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

Hőmérsékletváltozás (°C, 1961–1990 átlagához képest)		tavas	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: Pieczka, 2012)

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

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

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

A klímaváltozás egyik leginkább érzékelhető jele az extrém hőmérsékleti indexek alakulása. A modellfuttatások eredménye azt mutatja, hogy a fagyos napok száma csökken, míg a nyári napok, hőség napok és forró napok száma egyaránt növekszik. Az 1961-1990 közötti időszakhoz viszonyítva a növekedés mértéke 2021-50 között pl. a hőségnapok (napi hőmérsékleti maximum > 30 °C) esetében mintegy háromszoros, 2071-2100 között kb. hatszoros (Piecza, 2012).

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 XXI. 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 rácspontok átlagában (referencia-időszak: 1961–1990)

Változás (1961–1990 átlagához képest)		tavas	nyár	ősz	tél
Csapadék (mm/hónap)					
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 nyárénál 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 (Piecza, 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 hónapokkal kapcsolatban, 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-medence térségében. Valószínűleg a jövőben sokkal kevesebb kiugróan csapadékos nyárra számíthatunk. Az egyes években várhatóan az átlagoshoz

közeli értékek lesznek jellemzők, melyek között váltakozva előfordulnak majd szárazabbak és kevésbé szárazak egyaránt.

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. Ugyanakkor nem egyértelműek a változások a nagyobb csapadékok esetében. Az A1B szimuláció alapján a csapadékos napok éves számának csökkenésével egy időben a nagy csapadékú 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 (Piecza, 2012).

A RegCM modell adaptálása és Magyarországra vonatkozó előrejelzései

A RegCM (Regional Climate Model) regionális skálájú hidrosztatikus éghajlati modellt eredetileg 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 közötti 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 elhárítása érdekében a modell parametrizációján változtatásokat végeztek (Torma, 2011).

A modell XXI. sz.-ra 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 (2021-50; 2071-2100) átlagban várhatóan melegebbek lesznek az azt megelőző 30 év átlagánál. A felmelegedés várhatóan a XXI. 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 észak-nyugati területén (Kisalföld), míg a század végére a dél-nyugati területeken valószínűsíthető (Mecsek és környéke).

Az évszakos átlaghőmérsékletek várható alakulásában a legnagyobb mértékű változás a század közepén tavaszra (1,7 °C), míg a legcsekélyebb változás nyárra (0,7 °C) tehető. Az évszázad végére azonban pont fordított eredmények adódnak, nyáron várható a legnagyobb mértékű melegedés (3,5 °C), a legcsekélyebb pedig tavasszal (2,8 °C), amely megközelíti a téli és őszi várható melegedések mértékét (3,0 °C). Télen a hideg rekordok száma várhatóan csökkenni fog, míg nyáron az eredmények azt mutatják, hogy a klíma egyértelműen változékonyabb lesz. A napi középhőmérsékletek átlaga a magasabb hőmérsékletek irányába fog eltolódni 3-4 °C-kal és a meleg rekordok 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 legjelentősebbnek mondható változás nyáron, míg a legkisebb télen valószínű. Télen és tavasszal a csapadékösszeg csökkenése egyöntetű, azonban nyáron és ősszel egy nyugat-kelet irányú megosztottság mutatkozik. Nyugaton és dél-nyugaton a nyári és őszi csapadékösszegek akár 20-30 %-kal csökkenhetnek, míg ugyanezen időszakokban a keleti, észak-keleti területek 10-20 %-kal csapadékosabbá válhatnak. A magasabb fekvésű helyeken (Bakony, Mátra, Bükk) az évszakok szárazabbá válása valószínűsíthető az eredmények alapján. 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 századvégre vonatkozóan.

Röviden összefoglalva: Magyarországon az XXI. 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 XXI. század közepére a nyári napok (napi hőmérsékleti maximum > 25 °C) számának növekedése közel 29 %, míg a század végére 200 %-ot is meghaladó lehet (Torma, 2011). 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 kis mértékben csökkenni fog az évszázad közepére, közel 10 %-kal. A XXI. század végére a csökkenő tendencia folytatódni, illetve valamelyes erősödni fog, mértéke várhatóan 13 % körülire tehető (Torma, 2011).

A modell érdekes eredményeket adott az extrém csapadékú napok (napi csapadékösszeg meghaladja a 20 mm-t) számának várható változásaival kapcsolatosan. A 2021-2050 közötti időszakig a magasabb területeken az extrém csapadékú napok számának kis mértékű csökkenését jelzi előre (pl. a Bakonyban), míg az évszázad végére az ország döntő többségén ezen napok számának növekedését mutatja. A modell eredményei alapján a napi csapadék intenzitás 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

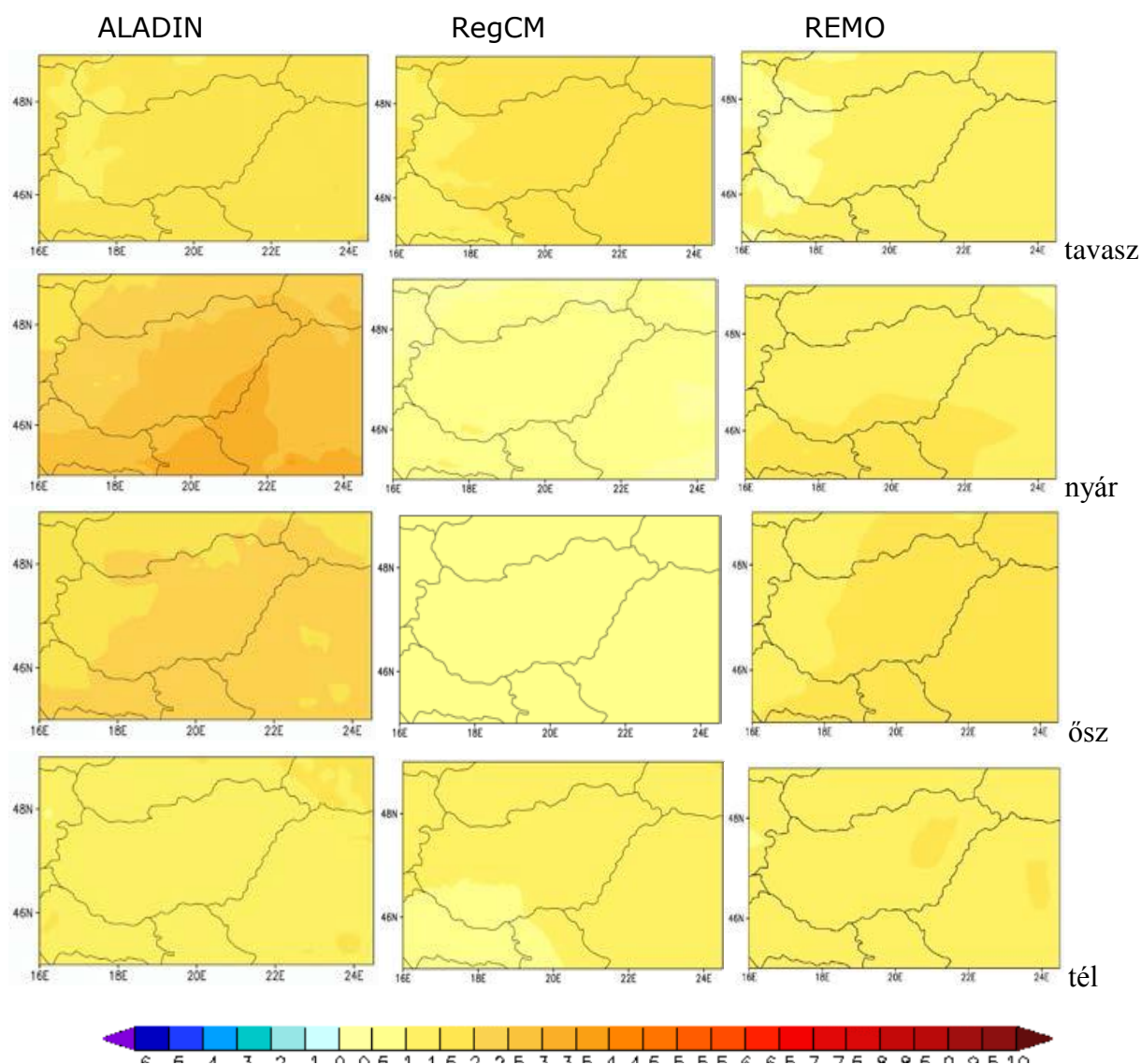
Magyarországon négy regionális klímamodellt alkalmaznak napjainkban az éghajlatváltozás hazai jellemzőinek vizsgálatára: az ALADIN-Climate (Csima és Horányi, 2008; Zsebeházi, 2011), a PRECIS (Piecza, 2012), a RegCM (Torma, 2011) és a REMO (Szépszó és Horányi, 2008) modelleket. Mindegyik modellel kétféle 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. a RegCM esetében), 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).

A XXI. században várható hőmérsékletváltozás irányát illetően a különböző regionális modellek eredményei megegyeznek: a szimulációk az ország teljes területére és minden évszakra szignifikáns hőmérsékletemelkedést mutatnak. A 3. ábrán a társadalmi-gazdasági modellezési munkánk szempontjából fontos 2021-2050 közötti időszak várható évszakas átlaghőmérséklet-változása látható az egyes modelleredmények alapján.

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



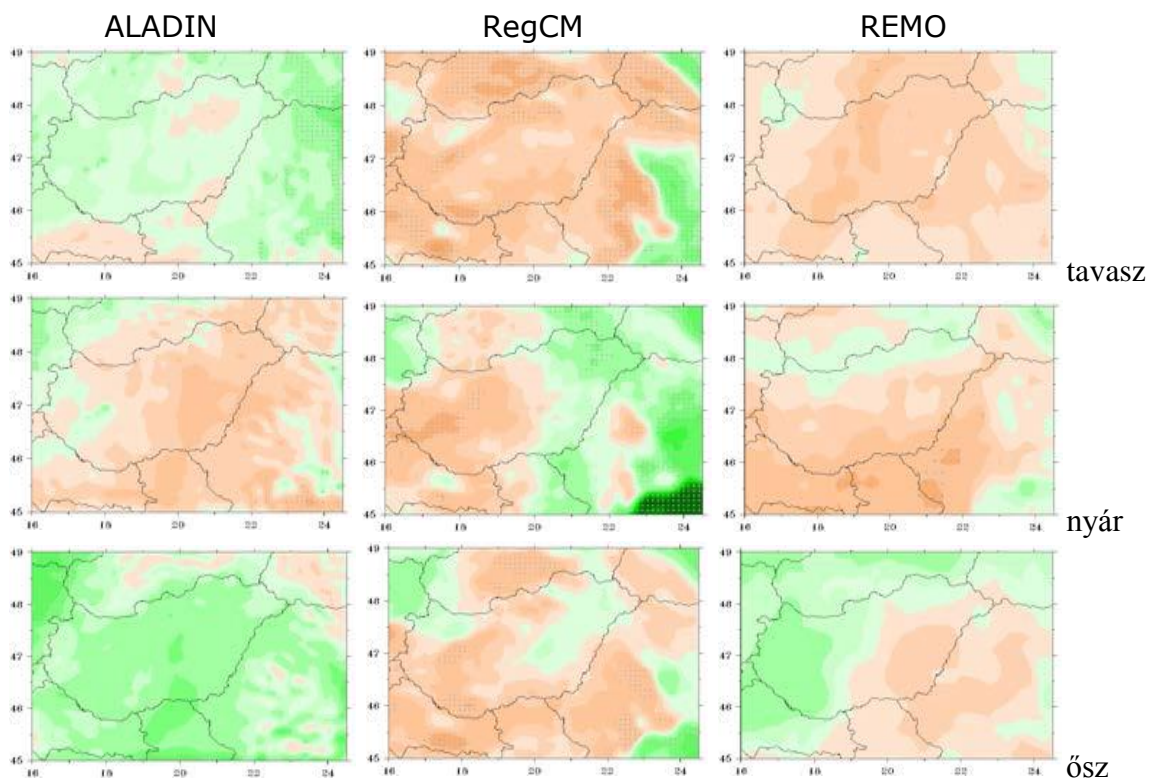
(Forrás: Bartholy et. al., 2011)

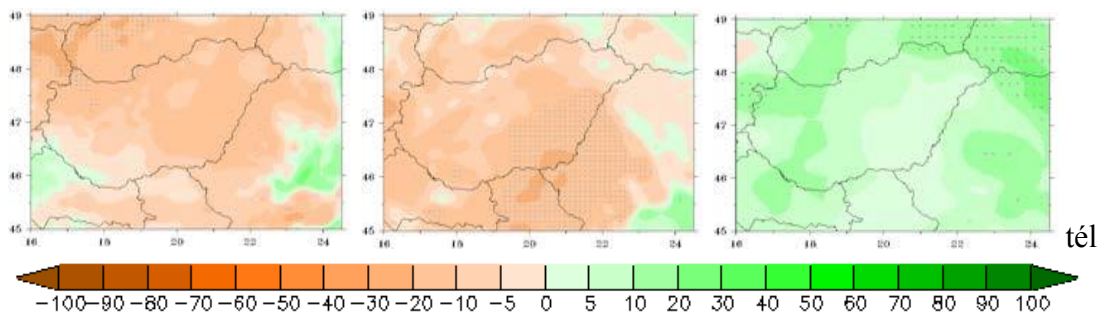
Ugyanakkor a jelzett növekedés mértékében 2021–2050-re 1, 2071–2100-ra 2,5 fok eltérés is lehet az egyes modellek között. A modellek a különböző hőmérsékleti indexek jövőbeli előfordulására is ugyanolyan irányú változásokat

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 minimumhőmérsékletű (pl. a fagyos) napok ritkább előfordulásával kell számolnunk.

A csapadék várható alakulásával kapcsolatban a kép az egyes modelleredmények alapján meglehetősen 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 a csökkenés és a 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 csapadékra vonatkozó előrejelzései kevésbé tekinthetők megbízhatónak, mint a hőmérsékleti előrejelzések. A 4. ábra a munkánk szempontjából fontos, 2050-ig várható évszakai csapadékösszeg várható relatív megváltozását mutatja az egyes modelleredmények alapján.

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



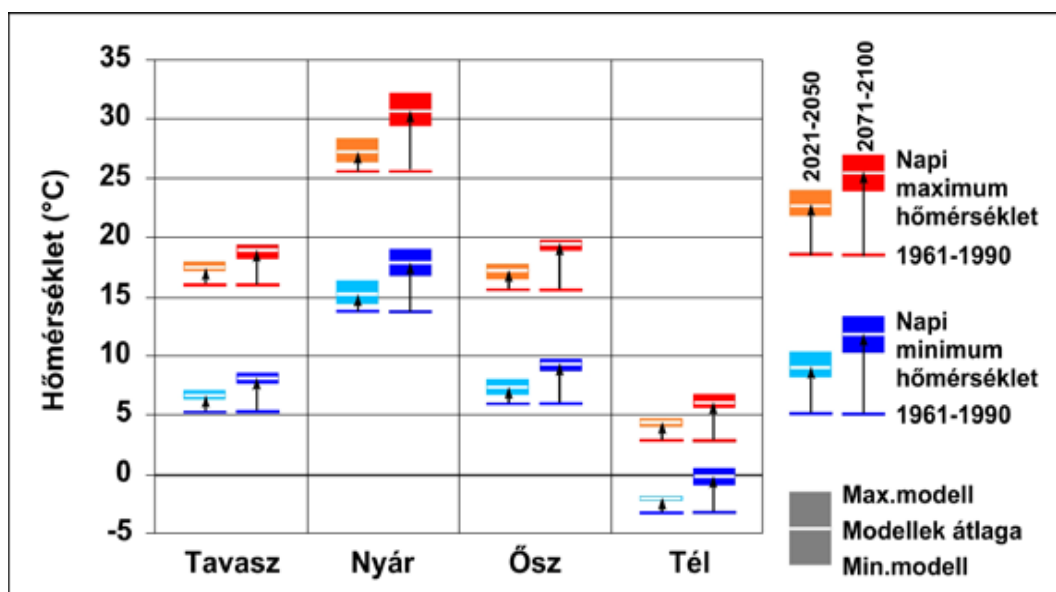


(Forrás: Bartholy et al., 2011)

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 intenzívebben 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 előre jelezni.

A hőmérsékleti szélsőségek elemzéséhez legkézenfekvőbb változók a napi maximum- és minimumhőmérsékletek idősorai (5. ábra).

5. ábra: A napi maximumhőmérsékletek (narancs és piros szín) és a napi minimumhőmérsékletek (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)



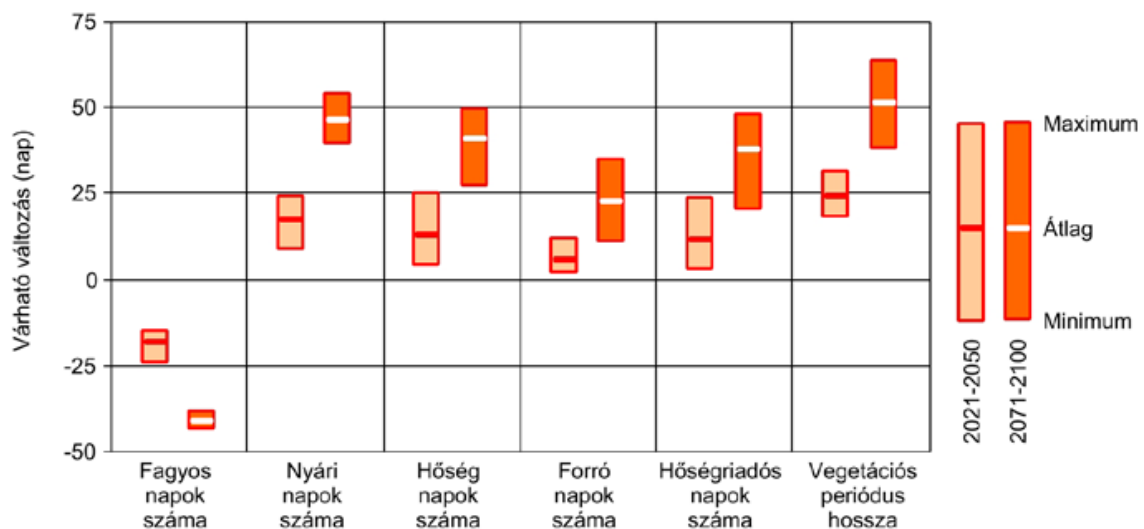
(Forrás: Bartholy et al., 2011)

Mind a napi maximum-, mind a napi minimumhőmérsékletek legnagyobb mértékben várhatóan nyáron fognak növekedni, ugyanakkor erre az évszakra esik a modellbecslések legnagyobb bizonytalansága is. A maximumhőmérsékletek minden évszak és mindkét időszak esetében valamelyest jobban növekednek (0,1–0,3 °C-kal), mint a minimumhőmérsékletek. A negatív extrémumok várhatóan csökkennek (ami szintén melegedésre utal).

A napi minimum és maximum értékek alakulása mellett lényeges a szélsőséges hőmérsékleti értékek várható változásának modellezése is, amelyet a 6. ábra szemléltet.

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

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



(Forrás: Bartholy et al., 2011)

A csapadék indexek esetében, 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 XXI. század közepén is érzékelhető, s a század végére jelentősen erősödik. A csapadékindexek várható változásai arra utalnak, hogy hazánk klímája kis mértékben szárazabbá válik: mind az őszi és nyári száraz időszakok, mind a nagyobb, intenzívebb csapadékok előfordulásának (a nyár kivételével) kismértékű növekedésére számíthatunk. A heves csapadékesemények

gyakoróságának ilyen jellegű évszakos különbségei némiképp meglepők, tekintve, hogy az intenzív viharokat többnyire a nyári konvektív eseményekkel hozzuk összefüggésbe.

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 klímamodell-szimulációkkal, majd immár több modell eredményeinek segítségével számítják ki az egyes lehetőségek bekövetkezési valószínűségét. Így valószínűségi térkép állítható elő, amely elegáns eszköz a szimulációk bizonytalanságainak számszerűsítésére.

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 erdőszetre, 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 a nyári időszak szárazabbá válását szintén jelezték (Bartholy et al., 2008).

A hazai futtatású klímamodellek közül a NaTÉR a RegCM modell eredményeit vette alapul, ezért munkánk későbbi fejezetei, amelyek a gazdasági-társadalmi modellezés eredményeit mutatják be 2050-ig, a RegCM regionális klímamodell előrejelzéseire építenek.

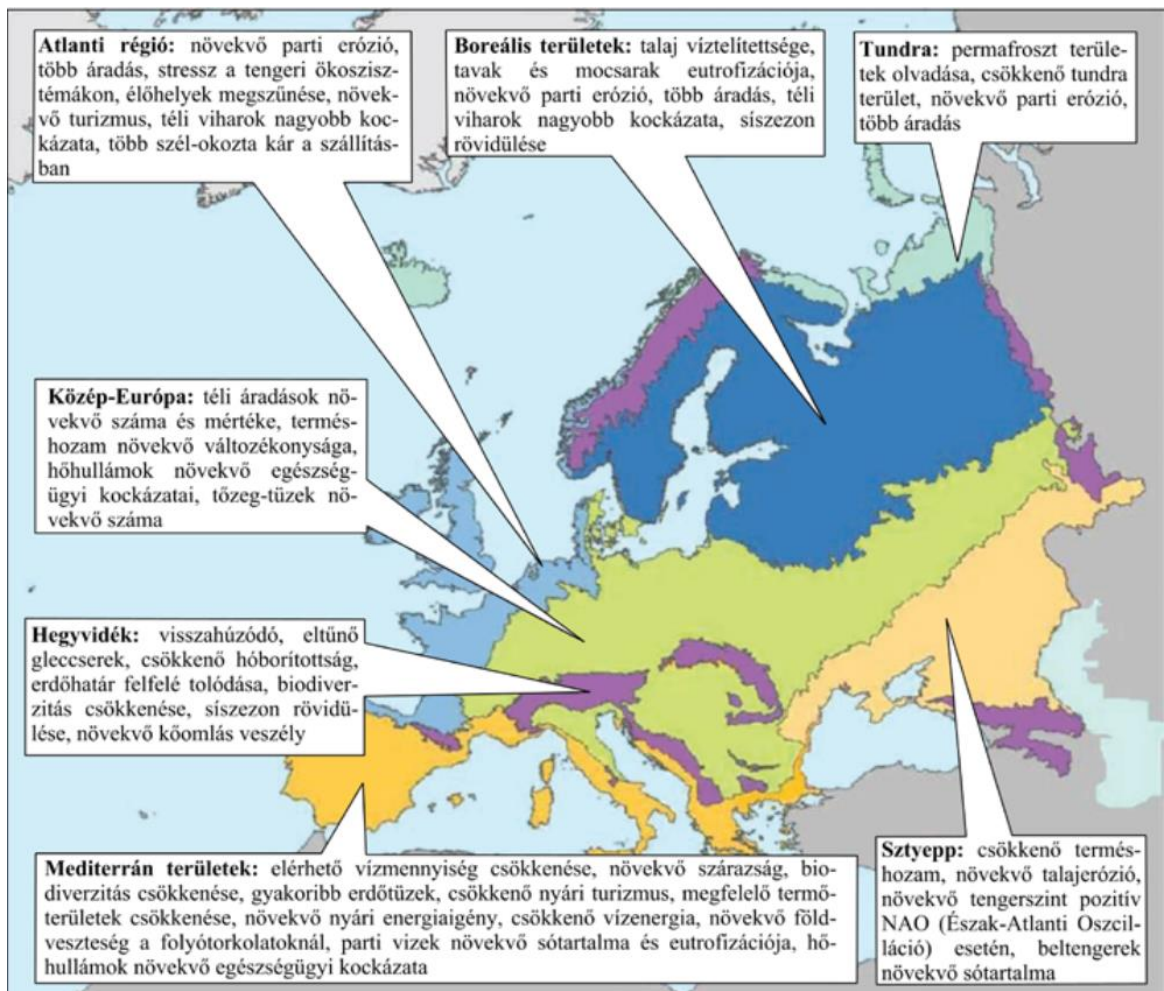
Következtetések – A klímamodellek által kirajzolt sérülékenység Európában és Magyarországon

Mára már nyilvánvaló, hogy az éghajlat változékonysága és változása befolyásolja az európai termelési (pl. mezőgazdaság, erdőszet 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). Európában kimutatható, hogy az északi és déli régiók között jelentős eltérés van az éghajlatváltozás hatásaira való érzékenység tekintetében. Az eddig is melegebb és szárazabb Dél-Európát várhatóan súlyosabban érintik a változások, mint Észak-Európát (EEA, 2004). A különböző szektorok esetén eltérő mértékű érzékenység valószínűsíthető Európa egyes régióiban, amelyet a 7. ábra foglal össze.

Az éghajlatváltozás várhatóan súlyosítja majd a természeti erőforrásokban megjelenő regionális különbségeket. Várhatóan növekszik a folyóvizeken levonuló árhullámok kockázata. A tengerszint-emelkedés, valamint a viharok gyakoriságának várható növekedése miatt egyre gyakoribbá válnak a tengerparti áradások is, így intenzívebb parti erózióra számíthatunk. E szempontból Hollandia kifejezetten sérülékeny térségnek számít, hiszen területének 26 %-a a tengerszint alatt fekszik. Egy másik példa szerint 2050-re egyes területeken a kisebb alpesi gleccserek eltűnése, s a nagyobbak 30–70 %-kal történő visszaszorulása várható (Schneeberger et al., 2003; Paul et al., 2004). A hótakaró nagymértékű csökkenése egyértelműen negatívan hat a téli turizmusra.

7. ábra: Az egyes szektorok és rendszerek sérülékenysége a XXI. század során várható változások hatására Európa különböző régióiban



(Forrás: Bartholy et al., 2011)

Az A1 forgatókönyv alapján 2080-ra a helyi növényfajok akár 62 %-a is eltűnhet a mediterrán területek hegységeiben (Thuiller et al., 2005). A kontinensen Dél-Európa számít a legsérülékenyebb régióknak. A hőmérséklet várható növekedése és a szárazság fokozódása csökkenti a rendelkezésre álló vízkészletet. A 2070-es évekre a vízenergia-potenciál mintegy 20–50 %-os csökkenése prognosztizálható (szemben a 15–30 %-os emelkedéssel Észak- és Kelet-Európában).

Az 50 éven belül megvalósuló, igen jelentős, közel 3 °C-os július havi középhőmérséklet emelkedés valószínűsíthetően komoly kihívást fog majd jelenteni a jövő mezőgazdasága számára. Ezen felül már a 2007-es IPCC jelentés is megállapítja, hogy az éven belüli hőmérsékleti- és csapadékviszonyok megváltozása többek között a jövő turizmusára lesz jelentős hatással. Az egyre forróbbá és szárazabbá váló nyarak a mediterrán térségben a turizmus csökkenését, míg a tavaszi és őszi turizmus fellendülését vonhatják maguk után. Ugyanakkor turisztikai szempontból kedvezőbb feltételek fognak megjelenni Európa északi és nyugati területein (IPCC, 2007). A déli területeken a nyári turizmusra gyakorolt negatív hatások az intenzív, hosszabban elhúzódó hőségeknek tulajdoníthatók, ami miatt csökken a komfortérzet. Az intenzívebbé váló hőhullámok miatt növekszik az egészségügyi kockázat, valamint az erdőtüzek gyakorisága is.

Közép- és Kelet-Európában a csapadékmennyiség időbeli eloszlásában várható változás nyáron vízhiányt, míg télen áradásokat okozhat (Bartholy et al., 2008). A gyakoribb hőhullámok miatt ebben a régióban is növekszik az egészségügyi kockázat (Pongrácz et al., 2011). A térségben az erdők termelékenysége várhatóan csökken, míg az erdő- és tűzertüzek gyakorisága növekszik. Észak-Európában az éghajlatváltozás esetenként egymással ellentétes hatásokat okoz, ami bizonyos előnyökkel is járhat. Ilyen pozitív hatású lehet például a csökkenő fűtési igény, a nagyobb terméshozam és az erdőállományok gyorsuló növekedése. Az éghajlatváltozás fokozódásával a negatív hatások kerülhetnek túlsúlyba, például a gyakoribb téli árvizek, a veszélyeztetett ökoszisztémák és a növekvő felszíni instabilitás révén. Térségünk sérülékenységére jó példa volt a 2003-as hőhullám, amikor Európa nagy részén mintegy 3–5 °C-kal volt melegebb az átlagosnál. Ez a jelenleg még nagyon szélsőségesnek tekinthető hőhullám az A2 scenárió szerint a XXI. század végén teljesen általánosnak számít majd (Beniston, 2004). A hőhullámhoz társult csapadékhiány éves szinten elérte átlagosan a 300 mm-t. Az így kialakult szárazság az ökoszisztémák mintegy 30 %-os GPP csökkenését okozta, ami 0,5 Pg1C/(m²·év) nettó széndioxid forrásnak felel meg (Ciais et al., 2005). A hőhullám hatására 2003-ban az ökoszisztémák által négy év alatt megkötött szénnek megfelelő mennyiség került a légkörbe. A forró és száraz éghajlati viszonyok hatására kiterjedt erdőtüzek

jelentkeztek (például Portugáliában mintegy 390 000 ha-on). A folyók (Duna, Loire, Pó, Rajna) rekord alacsony vízszintje zavart okozott a belvízi hajózásban, az öntözésben és az erőművek hűtésében. A hőhullám hatására mintegy 35 000-rel több haláleset fordult elő 2003 nyarán az érintett régióban (Kosatsky, 2005).

A klímaváltozás társadalmi-gazdasági hatásainak vizsgálatakor célszerű onnan elindulni, hogy az egyes területek – országok, régiók, kistérségek/járások – az őket érő hatásokra különbözőképpen reagálnak, eltérő jellegzetességeket mutatnak az éghajlatváltozással kapcsolatban. Ennek feltárásához módszerként a CIVAS (Climate Impact and Vulnerability Assessment Scheme) modellt alkalmazzák, amellyel az egyes területi szintek (esetünkben járáások) 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 az éghajlatváltozás területi hatásait a kitétség (exposure) → érzékenység (sensitivity) → várható hatás (impact) → adaptivitás (adaptive capacity) → sérülékenység (vulnerability) kontextusban kell vizsgálni.

Az éghajlatváltozási sérülékenység komplex mutatóként írható le, amely integrálja a kitétséget, az éghajlati érzékenységet, valamint az alkalmazkodóképességet (Bartholy et al., 2011). Magyarország klímaváltozással szembeni sérülékenységének meghatározása során kiindulásként az alábbi öt komplex természeti, társadalmi, gazdasági problémát határozták meg:

1. Aszály és szárazodás okozta mezőgazdasági és vidékfejlesztési kockázatok
2. Erdőtűz veszély
3. Városi hőhullámok közegészségügyi kockázatai
4. Biológiai sokféleség csökkenése, különösen a természetvédelmi oltalom alatt álló területek veszélyeztetettségére
5. Szélsőséges vízjárás: árvíz kockázatok az épített környezetben

Ezek közül az aszály és szárazodás, az erdőtűzveszély, valamint a városi hőhullámok problémáira vonatkozó éghajlati sérülékenységvizsgálat hozott eddig olyan eredményeket, amelyek kevésbé bizonytalan előrejelzéseknek tekinthetők.

Az aszálysérülékenységgel kapcsolatban megállapítható, hogy Magyarország területének 35 %-át alkotják az éghajlatváltozás hatására bekövetkező aszályosodással szemben kiemelten és fokozottan sérülékeny régiók. Ez a leghátrányosabb helyzetű járáások 45 %-a, ahol Magyarország lakosságának 22 %-a él. Feltehetően legkevésbé sérülékenyek az ország fejlettebb térségei, valamint a csekély mezőgazdasági potenciállal rendelkező, egyben leginkább urbanizált területek (Bartholy et al., 2011).

Erdőtüzek szempontjából az ország területének 36 %-a kiemelten és fokozottan sérülékeny, ami a védett területek és lakosság esetében is közel 30 %-os arányt tesz ki (Bartholy et al., 2011).

A városi hőhullámok jelentik az ország legnagyobb területén jelentkező kockázatot. A modellvizsgálatok eredményeiből kiolvasható, hogy a kiemelten és fokozottan sérülékeny területek az ország területének 52 %-át fedik le, jelenleg e területeken él a lakosság 37 %-a (Bartholy et al., 2011).

A Magyarországon futtatott klímamodellek – bizonyos esetekben egymásnak elentmondó megállapításaikkal is – együttesen arra hívják fel a figyelmet, hogy már a XXI. 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* 112. évf. 249–264.

Bartholy J. – Bozó L. – Haszpra L. (szerk.) (2011): *Klímaváltozás – 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére*. Bp. 281.

Beniston, M. (2004): The 2003 heatwave in Europe: a shape of things to come? An analysis based on swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters* Vol. 31.

<http://www.unige.ch/climate/Publications/Beniston/GRL.Beniston.2004.pdf>

Letöltés ideje: 2015. szeptember 1.

Ciais, Ph. - Reichstein, M. - Viovy, N. - Granier, A. - Ogée, J. - Allard, V. - Aubinet, M. - Buchmann, N. - Bernhofer, C. - Carrara, A. - Chevallier, F. - de Noblet, N. - Friend, A.D. - Friedlingstein, P. - Grünwald, T. - Heinesch, B. - Keronen, P. - Knohl, A. - Krinner, G. - Loustau, D. - Manca, G. - Matteucci, G. - Miglietta, F. - Ourcival, J.M. - Papale, D. - Pilegaard, K. - Rambal, S. - Seufert, G. - Soussana, J.F. - Sanz, M.J. - Schulze, E.D. - Vesala, T. - Valentini, R. (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* Vol. 437. 529–533.

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

EEA (2004): EEA Report No 2/2004: *Impacts of Europe's Changing Climate: An Indicator-Based Assessment*. European Environment Agency, Copenhagen. 107.

Götz G. (2004): *A klímadinamika alapjai*. Kézirat, meteorológiai Tudományos Bizottság, Légekördinamikai Munkabizottság. 41.

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* 110. évf. 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 ideje: 2015. szeptember 1.

Jacob, D. - Podzun, R. (1997): Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics* 63. 119–129.

Kosatsky, T. (2005): The 2003 European heatwave. *Euro Surveill* 10. 148–149.

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*. ECMWF Seminar on numerical methods in atmospheric models 2. 147–191.

OMSz-ELTE (szerző nélkül) (2006): *Klímapolitika. Éghajlatváltozási forgatónyvek a Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiához*. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium 42.

Paul, F. – Käab, A. - Maish, M. - Kellengerger, T. - Haeberli, W. (2004): Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophysical Research Letters* Vol. 31.

http://folk.uio.no/kaeaeb/publications/grl04_paul.pdf Letöltés ideje: 2015. szeptember 1.

Pieczka I. (2012): *A Kárpát-medence térségére vonatkozó éghajlati scenáriók elemzése a PRECIS finom felbontású regionális klímamodell felhasználásával*. Doktori értekezés ELTE Bp. 95.

Pongrácz R. – Bartholy J. - Bartha B.E. - Törék O. - Pieczka I. - Torma Cs. (2011): *Projected changes of regional heat waves in Central/Eastern Europe using climate model simulations*. 91st AMS Annual Meeting on „Communicating Weather and Climate”. Seattle, WA. Paper 161. 7.

<https://ams.confex.com/ams/91Annual/webprogram/Paper185816.html> Letöltés ideje: 2015. szeptember 1.

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 ideje: 2015. szeptember 1.

Schneeberger, C. - Blatter, H. - Abe-Ouchi, A. - Wild, M. (2003): Modelling change in the mass balance of glaciers of the northern hemisphere for a transient 2xCO₂ scenario. *Journal of Hydrology* 274. 62–79.

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

Szépszó G. (2014): *A REMO regionális éghajlati modellen alapuló klímadinamikai vizsgálatok a Kárpát-medence éghajlatának jellemzésére*. Doktori értekezés ELTE Bp. 162.

Thuiller, W. - Lavorel, S. - Araújo, M.B. – Sykes, M.T. - Prentice, I.C. (2005): Climate change threats plant diversity in Europe. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102. 8245–8250.

<http://www.pnas.org/content/102/23/8245.full.pdf> Letöltés ideje: 2015. szeptember 1.

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 Bp. 125.

Zsebeházi G. (2011): *Magyarország éghajlatának jellemzése az ENSEMBLES projektbeli és a hazai regionális modelleredmények együttes vizsgálatával*. Szakdolgozat ELTE Bp. 38-41, 48-50.