

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

A hőségriadók várható tendenciája Magyarországon a PRECIS modell korrigált hőmérsékleti szimulációi alapján



Készítette: Bartha Enikő Boglár
II. éves meteorológus MSc hallgató

Témavezető: Dr. Pongrácz Rita
(ELTE Meteorológiai Tanszék)

Budapest, 2012.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Hőhullámok egészségügyi hatásai	5
2.1. A hőségriasztás hazai fokozatai	9
3. Felhasznált adatok, módszerek.....	11
3.1 PRECIS modell	11
3.2 E-OBS adatbázis.....	12
3.3 A PRECIS modell validációja az ERA-40 által vezérelt futtatás alapján	13
3.4 Hibakorrekción	15
4. A hőségriadók elemzése.....	22
4.1 A hőségriasztások átlagos éves számának várható tendenciái	22
4.1.1 I. fokozatú hőségriasztások	22
4.1.2 II. fokozatú hőségriasztások.....	25
4.1.3 III. fokozatú hőségriasztások	27
4.1.4 A hőségriasztások átlagos éves száma Magyarország rácspontjaira	29
4.2 A hőségriadó éven belüli átlagos előfordulási időszakának várható tendenciái ...	31
4.2.1 I.fokozatú hőségriasztások előfordulási időszaka az éven belül.....	31
4.2.2 II.fokozatú hőségriasztások előfordulási időszaka az éven belül	33
4.2.3 III.fokozatú hőségriasztások előfordulási időszaka az éven belül	35
4.2.4 A hőségriadó átlagos előfordulási időszaka Magyarország rácspontjaira ...	37
5. Összefoglalás.....	39
Irodalomjegyzék	41
Köszönetnyilvánítás.....	45

1. Bevezetés

A világ kutatóinak döntő többsége egyetért abban, hogy megkezdődött a globális felmelegedés időszaka. Nemzetközi mérési programok szerint 1950 és 2003 között a Föld felszínének átlaghőmérséklete 13,87 °C-ról 14,52 °C-ra, azaz 0,65 °C-kal növekedett (Láng et al., 2006). Míg a fosszilis energiaforrásokból 1950-ben 1612 millió tonna szén jutott a légkörbe, addig 2003-ban már 6999 millió tonna (IPCC, 2007). Ez a nagy mértékű kibocsátás-növekedés egyre jobban érezteti hatását földi környezetünkben.

A globális felmelegedés egyik következménye a szélsőséges meteorológiai események számának és intenzitásának növekedése (IPCC, 2012, Lakatos et al., 2012), ami a globális vagy regionális klíma megváltozását eredményezheti. A földi klímaváltozásnak a környezetre, ökoszisztémára, gazdaságra és a társadalomra gyakorolt hatása mellett komoly egészségügyi hatásai is lehetnek (pl.: Confalonieri et al., 2007). A korábbi éghajlati viszonyokhoz szokott embert, s az egész emberi kultúrát új helyzet elé állítja a gyorsuló éghajlatváltozás és annak hatásai. A lakosság egészségi állapotát a jövőben nagymértékben közvetlenül befolyásolni fogják az egyre gyakrabban, intenzívebben előforduló szélsőséges időjárási események, amelyek közül elsősorban az újabb és újabb melegrekordok, valamint hirtelen emelkedő hőmérséklet érinti negatívan a lakosság egészségügyi állapotát.

Korábban a hőhullámokat nem tekintették igazán komoly, emberi egészségre veszélyes kockázatnak, amelynek sok embert egyidejűleg érintő, „járványszerű” hatása lehet egy-egy földrajzi régióban, mint ahogy ez 2003-ban Európában is megtörtént például (Luterbacher et al., 2004). A globális felmelegedés folyamata egyre többször, egyre intenzívebben megnyilvánuló hőhullámokat eredményez világszerte (IPCC, 2007).

Jelen dolgozatban a BSc-tanulmányaim során választott témakör vizsgálatát terjesztettem ki. Az elemzés célja, hogy becslést kapjunk a hőhullámok XXI. század során várható változására Magyarország térségére. Témaválasztásom fő motivációja az volt, hogy számszerűsítsük a hőség események intenzitás- és gyakoriságnövekedését, amely az éghajlatváltozás egyik közvetlen klimatikus következménye, s komoly próbára teszi az emberi szervezet tűrőképességét (Confalonieri et al., 2007).

Korábbi vizsgálataink során (Bartha, 2010) a hőhullámok jelenlegi és várható tendenciáit Magyarország térségére a 10 km-es horizontális felbontású RegCM klímamodell szimulációit felhasználva elemeztük. Meghatároztuk a különböző fokozatú

hőségriasztások havi és éves számát az 1961–1990 referencia időszakra, valamint a XXI. század két harmincéves időszakára (2021–2050, 2071–2100). A jövőre vonatkozóan egyetlen közepesnek tekinthető (A1B) scenáriót vettük figyelembe, mely a légköri széndioxid koncentrációjának valamelyest lassuló ütemű növekedését feltételezi, s a 2100-ra becsült koncentráció értéke 717 ppm. Később vizsgálatainkat kiegészítettük az 1961–1990 időszak szimulációs eredményeinek validációjával, továbbá a 2021–2050, illetve 2071–2100 időszakra várható változások statisztikai szignifikanciájának vizsgálatával (Bartha, 2011).

Ezen MSc-szakedolgozathoz a RegCM-futtatások helyett egy másik regionális klímamodellt, a PRECIS-t vettük alapul, melyből rendelkezésre áll három különböző (A2, A1B, B2) emisszió scenárió figyelembevételével készült modellszimuláció. A nyers napi hőmérsékleti outputokra végrehajtottunk egy hibakorrekciós eljárást (Formayer and Haas, 2010) az E-OBS referencia adatbázis (Haylock et al., 2008) felhasználásával. A korrigált napi hőmérsékleti mezőkre elvégeztük a hőségriadós időpontok számának és hosszának várható változására vonatkozó összehasonlító elemzést. Az eredményeket térképek, illetve szimulált idősorokat tartalmazó grafikonok segítségével értékeljük. Végül az összefoglalásban összegezzük a vizsgálatainkból levonható következtetéseket.

2. Hőhullámok egészségügyi hatásai

Mivel a hőségriadók gyakoriságában és hosszában várható változások ismerete humán-egészségügyi szempontból elengedhetetlen, a dolgozat elején röviden összefoglaljuk a hőhullámok egészségügyi hatásait.

A hőhullám meghatározása nemzetközi szinten nem egységes. Általában a kimagasló hőmérsékleti értékek hosszabb ideig való fennállását tekintik hőhullámnak, amikor súlyosbító tényező lehet a magas páratartalom, valamint a magas éjszakai hőmérsékletek állandósulása. A WMO¹ meghatározása szerint hőhullámról akkor beszélünk, ha a napi maximumhőmérséklet több mint öt egymást követő napon át 5 °C-kal meghaladja az arra a naptári napra jellemző hőmérsékleti maximumértéket (Frich et al., 2002).

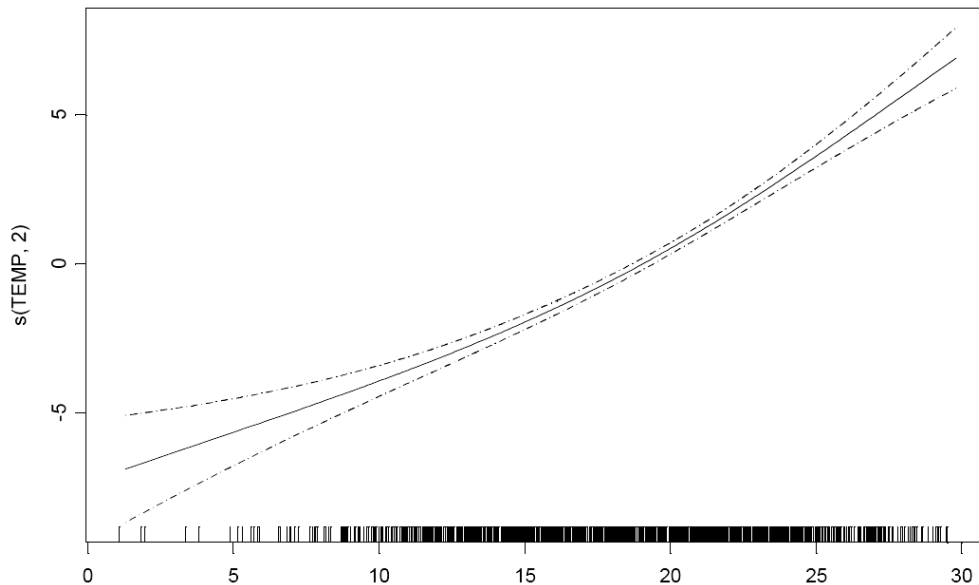
A francia és az amerikai meteorológusok akkor beszélnek hőhullámról, ha a maximum hőmérsékleti értékek a 30 °C, illetve 32,2 °C-os küszöbértéket meghaladják (IVS, 2003; Sheridan és Kalkstein, 2004). Angliában definíció szerint akkor van hőhullám, ha a hőmérséklet az adott hely adott hónapra vonatkozó 30 éves átlagánál legalább 4 °C-kal magasabb (Robinson, 2001). Magyarországon hőhullámnak tekintjük azt az időszakot, amikor a napi középhőmérséklet legalább 3 egymást követő napon meghaladja a 25 °C-ot (Páldy et al., 2005).

Kaiser és munkatársai (2007) az Egyesült Államok egészségügyi ellátó szerveinek adatait elemezték, elsősorban a napi sürgősségi kórházi betegfelvételeket. Eredményeik azt mutatják, hogy a hőhullámok hatására egyértelműen megnövekszik a sürgősségi kórházi betegfelvételek száma. Ez az arány a neveztes 1995-ös Chicago-i hőhullám idején 11%-kal nőtt a teljes lakosság körében, a 65 évnél idősebbeknél pedig 35%-kal (Kaiser et al., 2007). A betegfelvételek 59%-a a hőmérséklettel kapcsolatos kórképek (kiszáradás, hőkimerülés és hóguta) miatt következett be olyan egyéneknél, akik valamilyen krónikus betegségben szenvedtek.

Magyarországon Páldy és Bobvos (2008) vizsgálták a hőmérséklet és a napi sürgősségi mentőhívások közötti összefüggést. 1998–2004 időszakra vonatkozó regressziós elemzéseikben megállapították, hogy a mentőhívások esetszámai a

¹ World Meteorological Organization, Meteorológiai Világszervezet

hőmérséklettel közel lineáris kapcsolatot mutatnak (Páldy et al., 2005), amit a 1. ábra illusztrál.

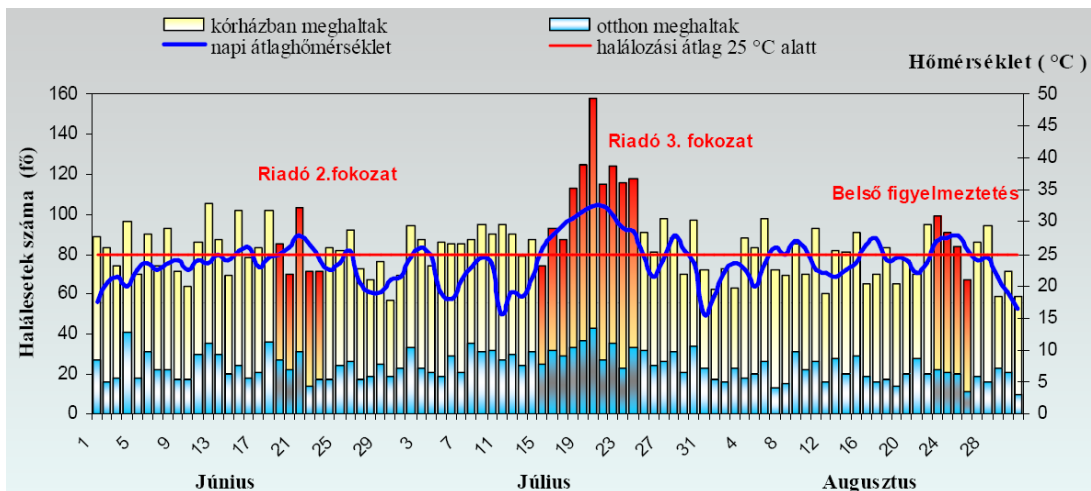


1. ábra: A hőmérséklet és a napi sürgősségi mentőhívások összefüggése budapesti adatok alapján, 1998–2004 (Páldy et al., 2005)

Semenza és munkatársai (1999) által végzett klinikai tanulmány szerint a hőhullámokat követően a mortalitás jelentősen megemelkedett a vesebetegek és a cukorbetegség körében. Hasonló jellegű növekedést regisztrált a hőhullámok után néhány nappal Braga és munkatársai (2002) a szívinfarktus és a krónikus légzőszervi megbetegedések miatti halálozásban. Szintén kiemelten veszélyeztetettek az idősek, különösen a magányosan, hátrányos társadalmi-gazdasági feltételek között élők. Kaiser és munkatársai az 1995-ös Chicago-i hőhullám esetét vizsgálva megállapították, hogy a fekete bőrű lakosság körében is magasabb volt a halálozás, ami nagy valószínűséggel az általában rosszabb szociális körülményeknek a következménye (Kaiser et al., 2007).

A kutatók valószínűsítik, hogy a hőség okozta halálesetek egy része olyan embereket érintett, akik eredetileg is kritikus egészségi állapotban voltak, és ezért a hőhullám nélkül is meghaltak volna (Grize et al., 2005). A hőhullámok időpontjához kapcsolódó erősen megnövekedett halálozási arány azonban nem magyarázható egyedül ezekkel az egyébként is kritikus egészségi állapotú esetekkel. Ha csak ez az ún. „harvesting” hatás – azaz a súlyos betegek idő előtti halála – jelentkezne, akkor a hőség utáni mortalitás már jelentősen lecsökkenne a hosszú idejű átlagokhoz képest. A valóságban azonban ez nem következik be, mivel sok olyan ember is meghal, akinek a

halála a hőhullám előtti hetekben nem várható (Thommen-Dombois, 2005). Hasonló következtetésre jutott Páldy és Bobvos (2008) is az otthoni és kórházi halálozások naponkénti számát a napi átlaghőmérséklet függvényében vizsgálva. A 2. ábrán jól látható, hogy a 2007. júliusi hőhullám alatt tartósan és jelentősen megemelkedett a napi halálozások száma, melyet nem követett azonnali halálozási arány csökkenés a hőhullám megszűnésével. A legtöbb halálozást július 20-án regisztrálták, amikor otthon 43 fő, a kórházakban 115 fő hunyt el – ez az arány a 25 °C alatti középhőmérsékletű napokon jellemző átlagos halálozási esetszámnak majdnem a kétszerese.

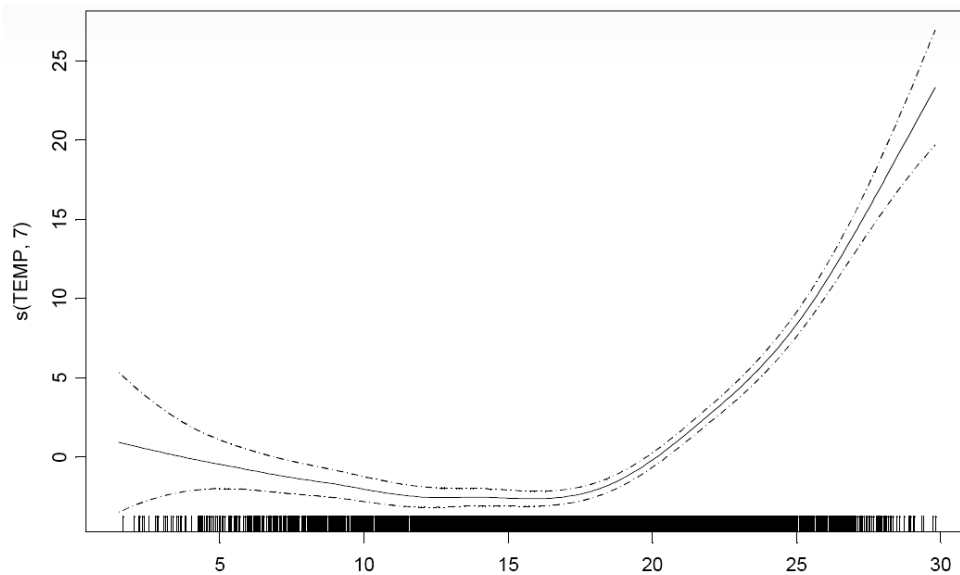


2. ábra: Az otthoni és kórházi halálozások naponkénti száma a Középmagyarországi Régió területére a napi átlaghőmérséklet függvényében 2007 nyarán (Páldy és Bobvos, 2008)

Az egyes hőhullámoknak nem teljesen egyforma a hatásuk a mortalitásra. A hőhullám intenzitása mellett döntő tényező a hőhullám időtartama és az éven belüli megjelenése (Smoyer, 1998). Például a kora nyáron fellépő nagy hőségnek nagyobb hatása van a morbiditásra és halálozásra, mint azoknak a hőhullámoknak, amelyek a nyár vége felé fordulnak elő (Hajat et al., 2002). Ez valószínűleg azzal magyarázható, hogy az év korábbi szakaszában fellépő hőhullámok áldozatai a különösen érzékeny emberek, akiknek kisebb az alkalmazkodóképességük, például a szív- és érrendszeri betegségben vagy a légúti megbetegedésben szenvedő személyek, az idős és szegény emberek, valamint a kisgyerekek (Hajat et al., 2006).

Budapesti 31 éves (1970–2000) hőmérsékleti és halálozási idősorok elemzése alapján Páldy és Bobvos (2008) megállapították, hogy a napi összes halálozást és a napi középhőmérséklet közötti összefüggés nyáron a legszorosabb. A 3. ábrán jól látható, hogy

a legalacsonyabb halálozási arány a 18 °C-os napi átlaghőmérsékletéhez kapcsolódik. E fölött a hőmérsékleti érték fölött meredeken emelkedik a napi halálesetszám. 20–25 °C között az összefüggés nagyjából lineáris. Majd 25 °C felett már jóval nagyobb napi többlet-halálozást regisztrálhatunk: a hőség okozta halálozási arány akár a 15%-ot is meghaladhatja (Páldy et al., 2005). Páldy és Bobvos (2008) eredményei alapján tehát a nagyon meleg időszakokban egy 5 °C-os napi átlaghőmérséklet-emelkedés közel 10%-kal növeli meg a keringési rendszer összeomlásából következő halálozás kockázatát. A hőmérséklet változékonysága az összhalálozás esetében 7%-os kockázatnövekedést jelent, a szív- és érrendszeri halálozás kockázata pedig 6%-kal nő a nyári hónapokban. A többi meteorológiai elem jóval kisebb kockázati tényezőt jelent. Például a relatív páratartalom növekedése csak kb. 1%-kal növeli meg a légzőszervi halálozás kockázatát, azt is elsősorban a téli időszakban. A légnyomás emelkedését viszont kifejezetten kedvezőnek tekinthetjük: a magas nyomású légtömegek kimutathatóan csökkentik az összhalálozást (Páldy et al., 2003).



3. ábra: A hőmérséklet és a napi halálozás összefüggése budapesti adatok alapján, 1970–2000 (Páldy et al., 2005)

2.1. A hőségriasztás hazai fokozatai

Magyarországon 2004-ben a hőségriasztás egyes fokozatait a hőmérséklet szignifikáns egészségkárosító hatása alapján az OKI² az ÁNTSZ³ Budapest Főváros Intézetével, valamint az OMSZ⁴-szal együttműködve dolgozta ki (Bujdosó és Páldy, 2006). A három fokozatból álló rendszer alapjául Budapest 31 éves (1970–2000) halálozási és meteorológiai adatainak idősor-analízise szolgált. A hőségriasztás egyes fokozatai a hőmérsékleti küszöbérték meghaladásának szintjétől és az előrejelzett időtartamtól függenek. Így megkülönböztetjük az alábbi három fokozatot:

- I. fokozatú hőségriadó, amikor az előrejelzések szerint a napi középhőmérséklet meghaladja a 25 °C-ot. Ilyenkor a mentőszolgálat felkészül a várhatóan megnövekvő betegforgalomra.
- II. fokozatú hőségriadó az az időszak, amikor az előrejelzések szerint a napi középhőmérséklet legalább 3 egymást követő napon keresztül meghaladja a 25 °C-ot. Ekkor szükség van média (TV, rádió) közlemények kiadására, a forgalmas helyszíneken vizet osztanak, megnyitják a légkondicionált helyiségeket, valamint a víz- és elektromos művek felfüggesztik a nem fizető ügyfelek kikapcsolását.
- III. fokozatú hőségriadó lép életbe, ha az előrejelzések szerint a napi középhőmérséklet legalább 3 egymást követő napon keresztül meghaladja a 27 °C-ot. Ebben az esetben szigorúan ellenőrzik a II. fokozatnál megtett intézkedéseket.

Az OMSZ honlapjáról⁵ letöltött Budapest állomási méréseiből megadott napi középhőmérsékletek alapján megállapítottuk, hogy az 1961–1990 időszakban Budapesten 315 napot nyilváníthatunk I. fokozatú hőségriasztásnak, melyből 49 alkalom felelt meg a II. fokozatú hőségriasztás feltételének, s 3 eset a III. fokozatú hőségriasztásának. Az 1960-as években évente átlagosan 11 nap volt I. fokozatú hőségriasztási nap (összesen

² Országos Környezet-egészségügyi Intézet

³ Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat

⁴ Országos Meteorológiai Szolgálat

⁵http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/eghajlati_adatsorok_1901-2000/Budapest/

111 nap), a '70-es években ez az érték átlagosan évi 8 napra csökkent (összesen 81 nap), míg a '80-as években az I. fokozatú hőségriasztások átlagos éves száma 12 napra növekedett (összesen 123 nap). Az OMSZ Budapest állomási mérései szerint a II. fokozatú hőségriasztások esetén az 1961–1990 múltbeli időszakban hasonló tendencia volt tapasztalható. Ekkor összesen 49 alkalommal rendelhetek el II. fokozatú hőségriasztást, melynek átlagos időtartama 4 nap volt. Az 1960-as évek, valamint a '80-as évek II. fokozatú hőségriasztások átlagos éves száma 2 (összesen 20, illetve 17 eset) volt, a 1970-es években pedig átlagosan évente egyszer fordulhatott elő a II. fokozatú hőségriasztás (összesen 12 eset). Az 1961–1990 referencia időszakban az OMSZ budapesti állomásán mindössze 3 alkalom felelt meg a III. fokozatú hőségriasztás feltételének, melynek átlagos időtartama 4 nap volt. 1961, illetve 1968 nyarán volt egy-egy 4 napos III. fokozatú hőségriasztásnak megfelelő hőhullám, valamint 1990.07.30-ától kezdve 3 egymást követő napon keresztül haladta meg a 27 °C-ot a budapesti állomáson mért napi középhőmérséklet.

3. Felhasznált adatok, módszerek

A hőségriadók elemzéséhez a PRECIS regionális klímamodell szimulációit használtuk fel, illetve a validáció és a korrekció során az E-OBS adatbázissal (Haylock et al., 2008) vetettük össze a szimulált eredményeket. Ebben a fejezetben röviden bemutatjuk a PRECIS modellt és az E-OBS adatbázist. Majd ezt követően a hibakorrekciós eljárással kapcsolatos fő tudnivalókat foglaljuk össze. Az eljárás szükségét, illetve eredményességét grafikonos formában mutatjuk be.

3.1. PRECIS modell

A PRECIS⁶ regionális klímamodellt a Brit Meteorológiai Szolgálat Hadley Központjában fejlesztették ki a HadCM3 globális klímamodellbe (Gordon et al., 2000) beágyazva. A PRECIS egy olyan korlátos tartományú, finom felbontású, légköri és felszíni részeket tartalmazó modell, mely a Föld bármely térségére alkalmazható. A modellel lefedhető térség horizontális kiterjedésének felső korlátja $5000 \times 5000 \text{ km}^2$ (Jones et al., 2004).

A PRECIS regionális klímamodell e vizsgálatban alkalmazott futtatásaiban a horizontális felbontás $0,22^\circ \times 0,22^\circ$, amely 25 km-es felbontásnak felel meg a tartomány közepén (Jones et al., 2004). A finom térbeli felbontás miatt 5 perces időlépcsőre van szükség a numerikus stabilitás megőrzéséhez. A PRECIS regionális éghajlati modell vertikálisan hibrid koordinátarendszert használ, melyben összesen 19 szint található. A felszín közelében a legalsó négy szinten a domborzatot követő szigma-koordináták, a néhány hPa-os felső szinteken tisztán nyomási koordináták alkotják a modell-légkört. A hazai szimulációk integrálási tartománya 123×96 rácspontot tartalmaz, mely magába foglalja a Kárpát-medencét (Bartholy et al., 2006), s a teljes célterületből összesen 229 rácspont helyezkedik el Magyarország határain belül. A modell prognosztikai változói a felszíni légnyomás, a zonális és a meridionális szélkomponens, a potenciális hőmérséklet, valamint a légkör teljes nedvességtartalma.

⁶ Providing REgional Climates for Impact Studies, Regionális klímabecslés hatásvizsgálatokhoz

A 2071–2100 jövőbeli időszakra két futtatás történt (Bartholy et al., 2009, Pieczka et al., 2009): az A2, illetve a B2 forgatókönyv (Nakicenovic és Swart, 2000) figyelembevételével. Ezeken kívül rendelkezésünkre áll az 1951–2100 időszakra az A1B szcenárióra vonatkozó tranziens szimuláció eredménye. A vizsgált szcenáriók közül az A2 szcenárióhoz társul a legmagasabb századvégi CO₂-koncentráció – 856 ppm –, ezt követi az A1B – 717 ppm –, s végül a legalacsonyabb koncentráció szint – 621 ppm – a B2 esetén várható (Nakicenovic és Swart, 2000).

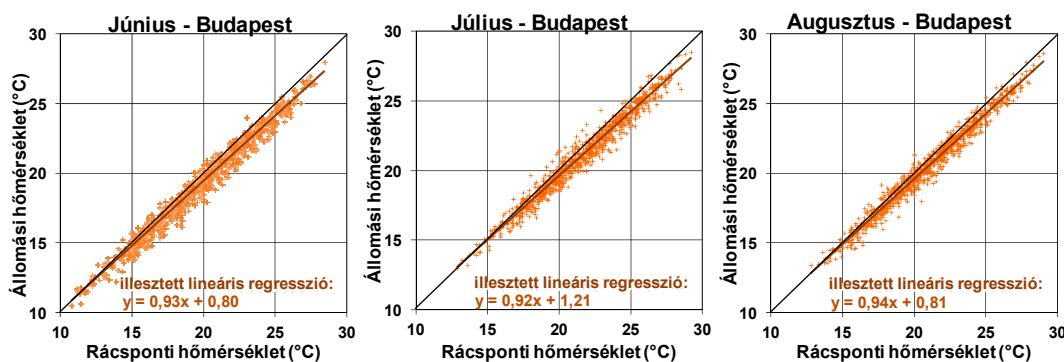
3.2. E-OBS adatbázis

A regionális klímamodellek validációja során a modelleket egy múltbeli időszakra futtatják, és az eredményeket különböző megfigyelési adatbázisokkal hasonlíthatják össze. Mivel a szimulációk eredményeképpen rácspontokban értelmezett mezősorokat kapunk, ezért a modellek validációjakor szintén rácsponti mezőkre van szükség (Osborn és Hulme, 1998). Egy ilyen adatbázis például az ún. E-OBS adatbázis (Haylock et al., 2008), melyet az ENSEMBLES (van der Linden és Mitchell, 2009) Európai Unió által támogatott projekt keretében fejlesztettek ki a regionális modellek validációja, valamint egyéb éghajlatváltozási kutatások céljából.

Az E-OBS adatbázis horizontális felbontása 25 km, s Európa teljes szárazföldi területére megadott rácspontokban tartalmazza a napi csapadékösszeg, valamint a napi közép-, minimum- és maximumhőmérsékleti adatokat az 1950–2011 időszakra. Ennek az adatbázisnak a legfontosabb újdonsága a finom térbeli felbontás és a nagy egybefüggő területi kiterjedés. A korábbi rácsponti adatbázisokhoz képest sokkal több (több mint 2000) európai mérőállomás meteorológiai idősorait használja fel. Az interpolációhoz figyelembe vett állomásokra az átlagos állomásközi távolság kb. 75 km (Klok és Klein, 2008).

Annak megítélésére, hogy mennyire elfogadható az E-OBS adatbázis a PRECIS modell validációjához, a 4. ábrán összehasonlíthatjuk az OMSZ budapesti állomási méréseiből és az E-OBS Budapesthez legközelebbi rácspontban (é. sz. 47° 34', k. h. 19° 02') megadott napi középhőmérsékleteket az 1961–1990 időszakra. Az állomási méréseket tartalmazó adatsort az OMSZ honlapjáról töltöttük le. Terjedelmi okokból a 4. ábra csak a júniusra, júliusra és augusztusra vonatkozó összehasonlításokat tartalmazza. Választásunk azért esett a három nyári hónapra mivel elsősorban ezekben a hónapokban

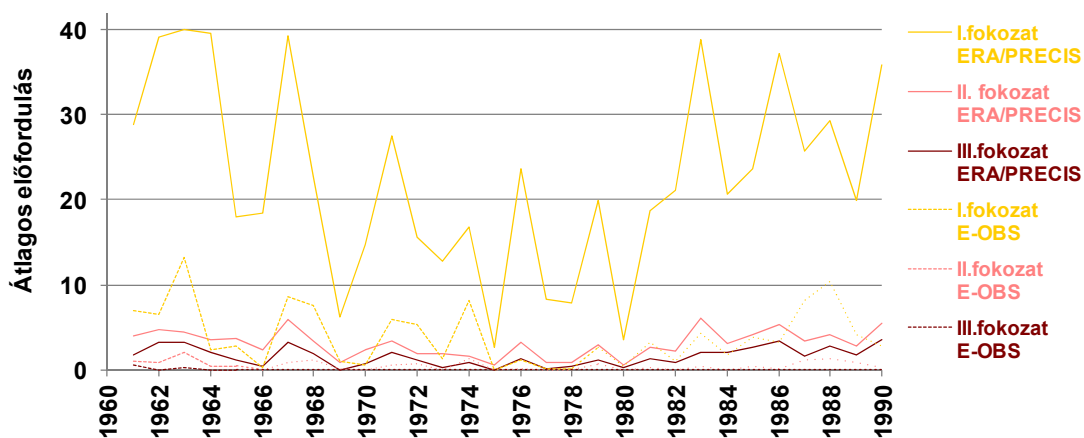
számíthatunk hőségriadóra. A grafikonokon feltüntettük az illesztett lineáris regresszió egyenesét, s ezek egyértelműen jelzik, hogy az E-OBS adatbázis a nyári hónapokban kisebb hibával alulbecsli az állomáson mért napi középhőmérsékleteket. A nyári alulbecslés átlagos mértéke csupán 0,5 °C körüli, a 25 °C-nál magasabb hőmérsékletek esetén az átlagos eltérés mértéke ennek csaknem kétszerese: júniusban 0,9 °C, júliusban és augusztusban pedig 0,8 °C körüli. Az eltérés ellenére a két idősor nagyon jól korrelál egymással, hisz az éves menetet tekintve, az anomália-idősorok közötti korrelációs együttható meghaladja a 0,98-at.



4. ábra: Az OMSZ állomási méréseiből és az E-OBS rácsponti adatbázisból származó napi középhőmérsékletek összehasonlítása a nyári hónapokra Budapest (legközelebbi rácspont: é. sz. 47° 34', k. h. 19° 02') esetén, 1961–1990.

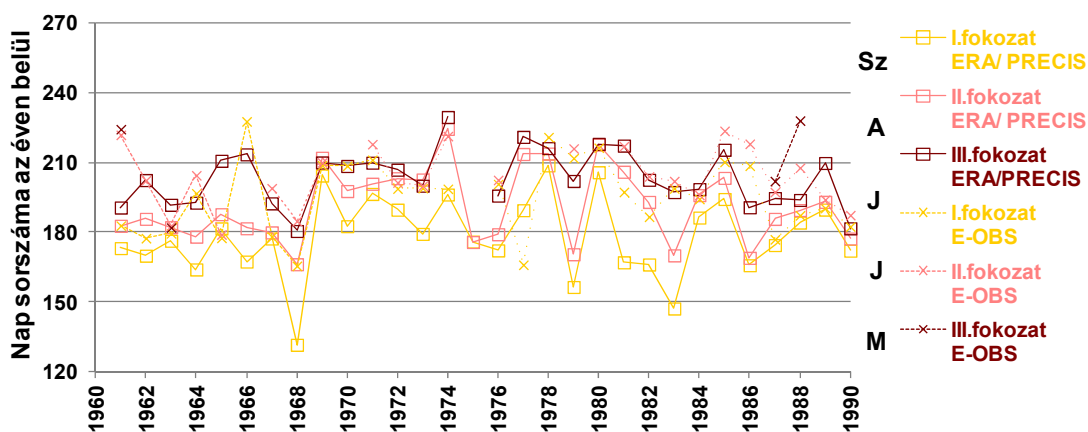
3.3. A PRECIS modell validációja az ERA-40 által vezérelt futtatás alapján

A vizsgálatok során elsőként a modellvalidálást kell elvégezni, amely során az E-OBS adatsor, valamint az ERA-40 meghajtású PRECIS szimulációk outputjaiból számolt hőségriasztások számának átlagos éves értékeit hasonlítjuk össze az 1961–1990 múltbeli időszakra vonatkozóan. Az 5. ábrán egyértelműen látszik, hogy az azonos színű folytonos és szaggatott vonalak (melyek rendre a szimulált és a megfigyelt idősor alapján számított értékeket jelölik) nagyjából együtt futnak. Az idősorok közötti korrelációs együttható értéke az I. fokozat esetén 0,57, amely 95%-os szinten statisztikailag szignifikáns. Továbbá az is megfigyelhető az 5. ábrán, hogy a PRECIS szimulációk felülbecslik a mérések alapján kapott idősort, s ez főleg az I. fokozatnál a legszembetűnőbb, hiszen ekkor a legnagyobb a hőségriasztások esetszáma.

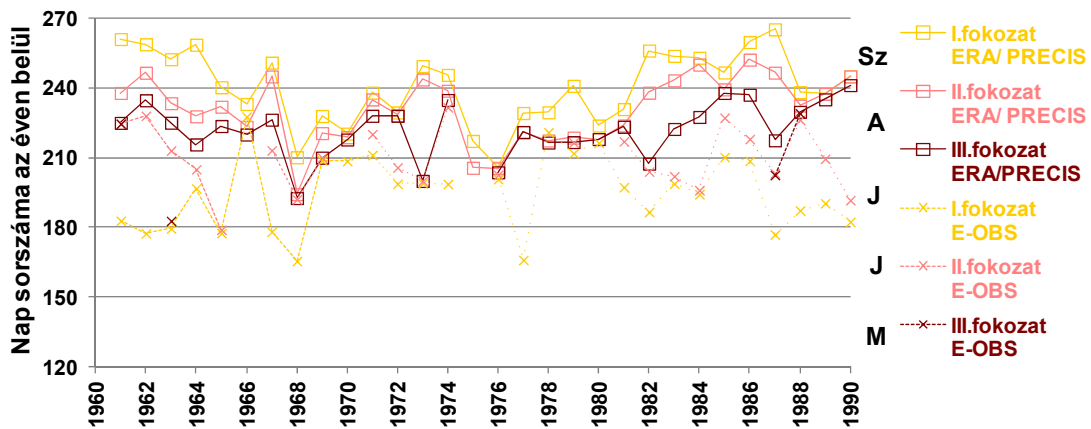


5. ábra: Hőségriasztások területi átlaga Magyarországon, 1961–1990.

A hőségriadók gyakoriságának elemzése mellett ezek előfordulási időpontjaira is elvégeztük a validációt, ennek grafikonon bemutatott eredményei az éven belüli első előfordulásra vonatkozóan a 6. ábrán, az utolsó előfordulás esetén a 7. ábrán található. A szimulált és megfigyelt idősből számított hőségriadók összehasonlításából kitűnik, hogy az ERA-40 meghajtású PRECIS szimulációk eredményei alapján kapott előfordulási időpontok alakulása csak nagyjából korrelál az E-OBS megfigyelési adatbázis eredményeivel. Például az I. fokozatú hőségriadók első előfordulási időpontjai esetén a korrelációs együttható értéke 0,35, az utolsó előfordulási időpontokra 0,19, melyek statisztikailag nem szignifikánsak 95%-os szinten.



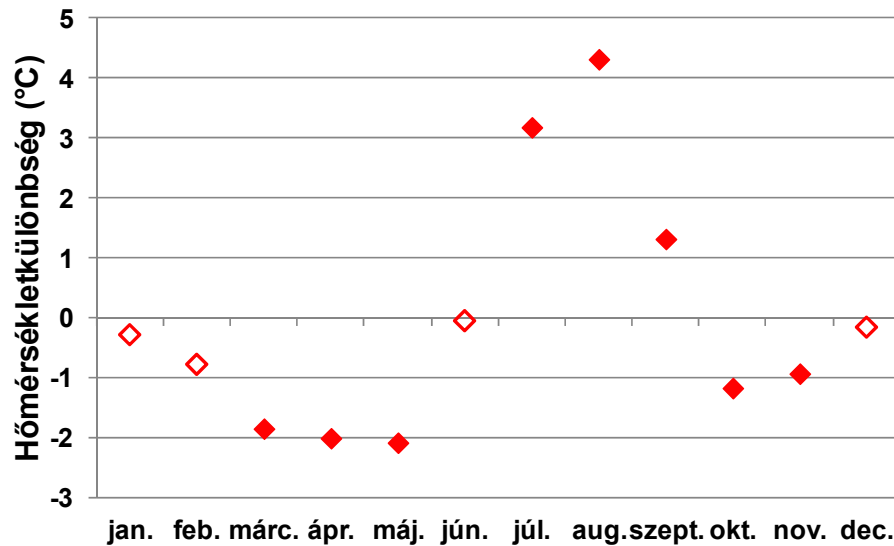
6. ábra: Első előfordulási időpontok területi átlaga Magyarországon, 1961–1990.



7. ábra: Utolsó előfordulási időpontok területi átlaga Magyarországon, 1961–1990.

3.4. Hibakorrekció

Elemzéseink során vizsgáltuk a szimulált havi középhőmérsékletek eltérését a mérésekből származó középhőmérsékleti értékekhez viszonyítva. A 8. ábrán az eredeti modell-outputok és az E-OBS adatbázis alapján számolt havi átlaghőmérsékletek eltérése látható a budapesti állomáshoz legközelebbi rácspontban (é. sz. $47^{\circ} 34'$, k. h. $19^{\circ} 02'$), az 1961–1990 múltbeli időszakra vonatkozóan. Az eredmények azt jelzik, hogy a PRECIS szimuláció az év nagyobb részében alulbecsli a hőmérsékletet. A tavaszi hónapokban a szignifikáns alulbecslés mértéke -2°C körüli, júniusban statisztikailag nem szignifikáns a havi átlaghőmérsékletek közötti eltérés, majd júliusban $3,18^{\circ}\text{C}$, augusztusban $4,32^{\circ}\text{C}$, szeptemberben pedig $1,32^{\circ}\text{C}$ a szignifikáns felülbecslés mértéke. A legnagyobb eltérés a szimulált és a mért értékek között augusztusban jelentkezett. A nyári időszakban detektált jelentős felülbecslés miatt az eredeti modell-outputok nem alkalmasak a hőségriadók fokozatainak felhasználásával a hazai változások korrekt elemzésére. Mindenképpen szükséges a hőmérsékletben jelentkező hibák korrigálása.



8. ábra: Az eredeti modell-outputok és az E-OBS adatbázis alapján számolt havi átlaghőmérsékletek eltérése Budapesti állomáshoz legközelebbi rácspontban (é. sz. 47° 34', k. h. 19° 02'), 1961–1990. A 95%-os szinten szignifikáns hibákat beszínezett szimbólumok jelzik.

A vizsgálatok során statisztikai módszeren alapuló hibakorrekciót végeztünk, mivel a klímamodellek szimulációi kisebb-nagyobb hibával terheltlen képesek megadni az éghajlati változók várható értékét (Christensen et al., 2008). A hibakorrekciós eljárással csökkentettük a középhőmérsékleti mezősor hibáit. Erre a célra egy olyan módszert alkalmaztunk, mely a meteorológiai változók havi percentilis értékeinek kiszámításán, és a modellezett eloszlásnak a megfigyelt eloszláshoz való illesztésén alapul (Formayer és Haas, 2010). A módszer lényege, hogy két adathalmaz statisztikai szempontból közel egyezőnek tekinthető, amennyiben eloszlásuk megegyezik (Déqué, 2007). Az eloszlások illesztéséhez használt függvényt a következő additív összefüggéssel definiáltuk:

$$f_a(y) = F_o^{-1}(y) - F_m^{-1}(y) = x_o - x_m,$$

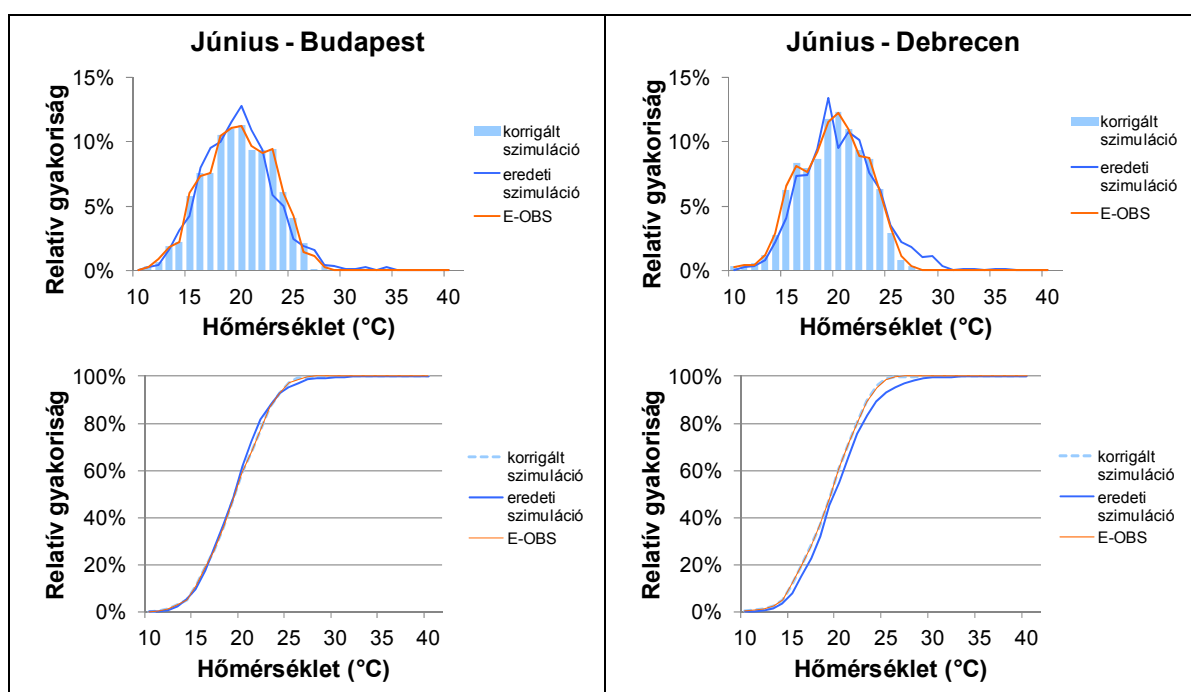
ahol x_o és x_m rendre a megfigyelési adatokból és a szimulált értékekből számított percentilis.

Ha a modellszimulációkból származó eredeti output adatsort korrigáljuk, akkor a következő összefüggést kapjuk az x_c korrigált percentilis értékre (ami megegyezik az x_o megfigyelt percentilis értékkel):

$$x_c = x_m + f_a = x_m + x_o - x_m = x_o$$

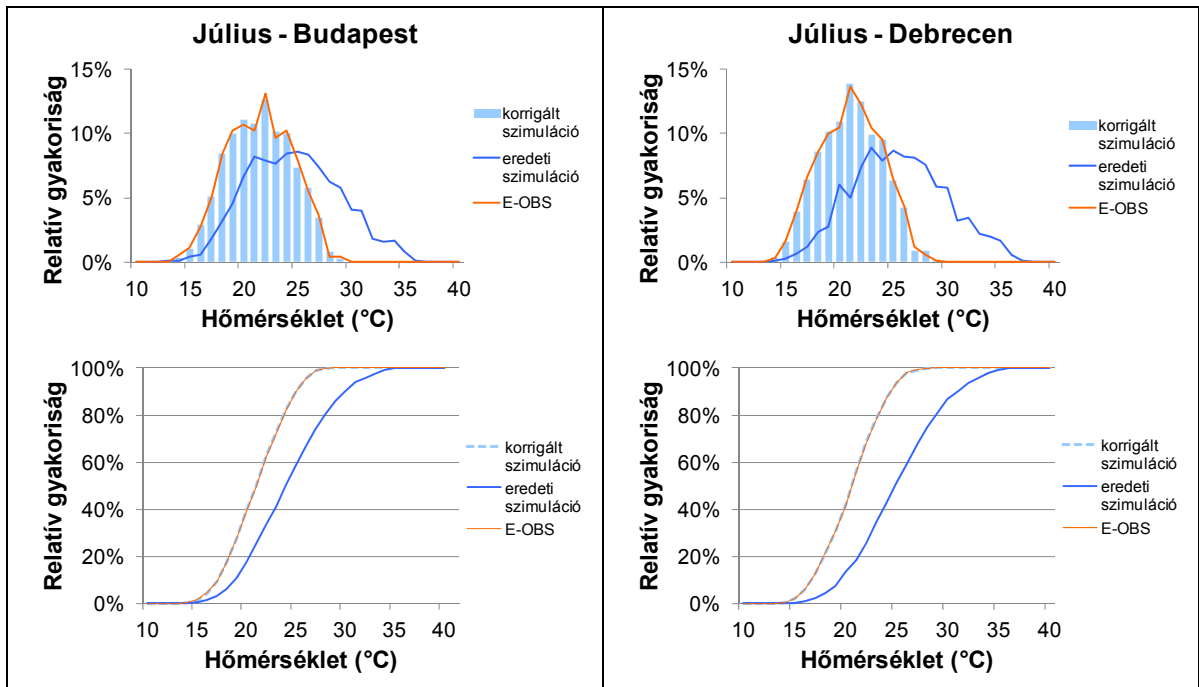
A korrekciós faktorokat minden rácspontra, az év 12 hónapjára külön-külön meghatároztuk. Példaként a 9–11. ábrán bemutatjuk két kiválasztott rácspontra (Budapest és Debrecen) a nyári középhőmérséklet korrekciójának eredményességét.

A 9. ábrán a júniusi középhőmérséklet empirikus sűrűség- és eloszlásfüggvényei láthatók, amelyeket a korigálatlan és a korigált szimuláció, valamint az E-OBS adatbázis alapján határoztunk meg Magyarország két nagyvárosához legközelebbi rácspontban Budapestre (é. sz. 47° 34', k. h. 19° 02') és Debrecenre (é. sz. 47° 34', k. h. 21° 44') vonatkozóan. Mivel júniusban statisztikailag nem szignifikáns a havi átlaghőmérsékletek közötti eltérés, mint azt a korábbi 8. ábrán is láthattuk Budapest esetén, ezért júniusban mindkét kiválasztott rácspontban csak kismértékű korrekcióra van szükség.

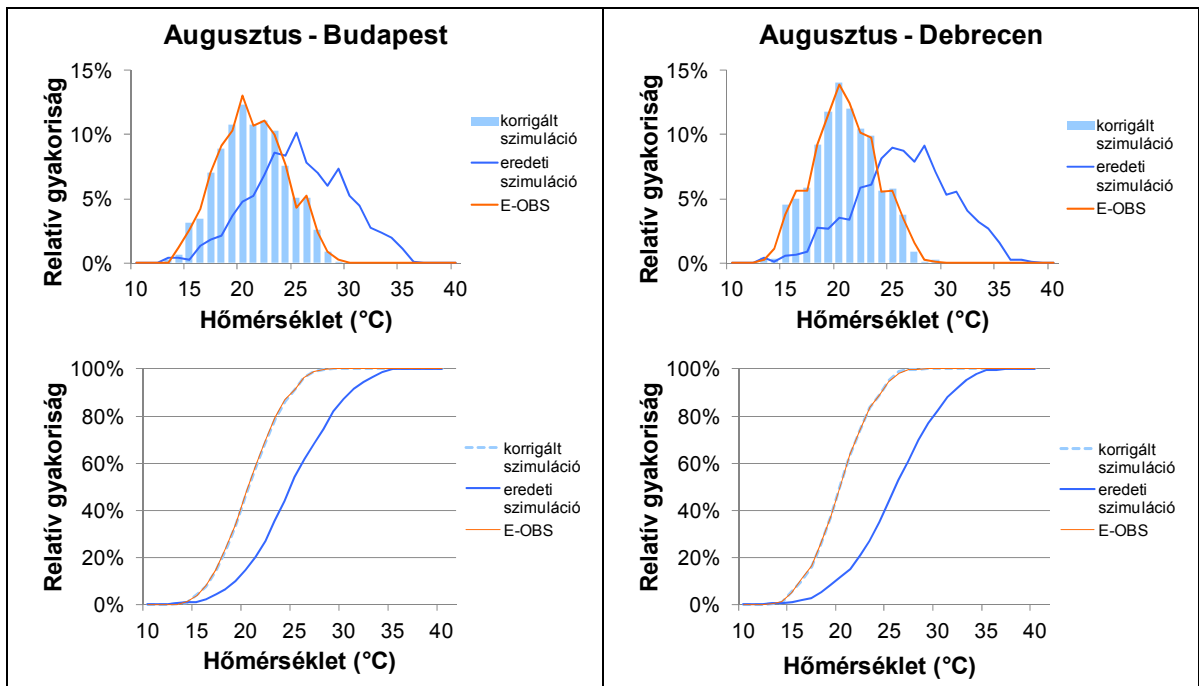


9. ábra: A júniusi középhőmérséklet empirikus sűrűség- és eloszlásfüggvényei a korigálatlan és korigált szimulációk, valamint az E-OBS adatbázis alapján két kiválasztott rácspontra, Budapestre (é. sz. 47° 34', k. h. 19° 02') és Debrecenre (é. sz. 47° 34', k. h. 21° 44') vonatkozóan, 1961–1990.

Más a helyzet júliusban és augusztusban, melyekre vonatkozóan a középhőmérsékleti idősor empirikus sűrűség- és eloszlásfüggvényeit rendre a 10. és 11. ábra tartalmazza. A grafikonokon egyértelműen látszik, hogy az eredeti PRECIS szimulációk mindkét hónapban és mindkét rácspontban felülbecsülték a 25 °C-nál magasabb, s alulbecsülték a 15–25 °C közötti napi középhőmérsékletek előfordulási gyakoriságát. A korrekció alkalmazása után már jó egyezést érhetünk el a hisztogramok esetén, s az empirikus eloszlásfüggvények tökéletesen fedik egymást mindkét rácspontban.



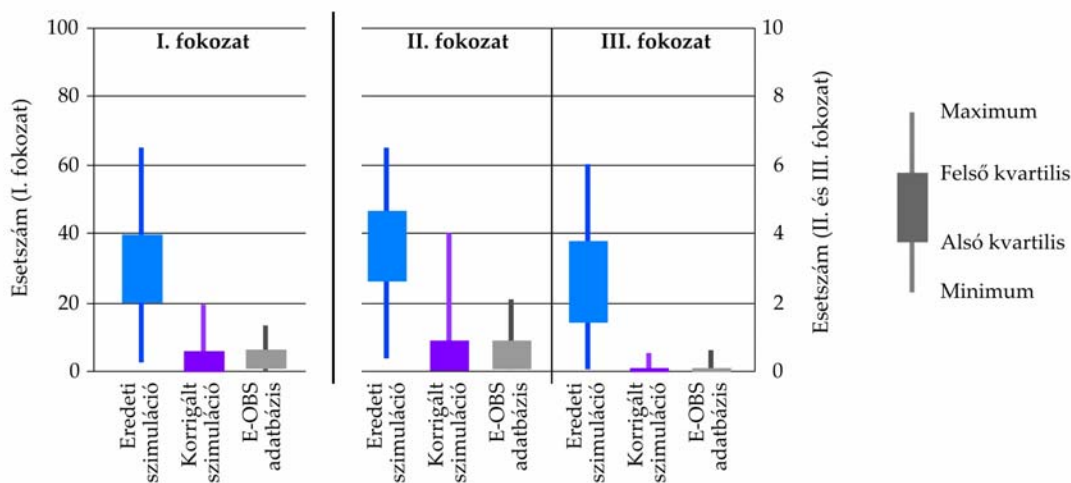
10. ábra: A júliusi középhőmérséklet empirikus sűrűség- és eloszlásfüggvényei a korigálatlan és korigált szimulációk, valamint az E-OBS adatbázis alapján két kiválasztott rácspontra, Budapestre (é. sz. 47° 34', k. h. 19° 02') és Debrecenre (é. sz. 47° 34', k. h. 21° 44') vonatkozóan, 1961–1990.



11. ábra: Az augusztusi középhőmérséklet empirikus sűrűség- és eloszlásfüggvényei a korigálatlan és korigált szimulációk, valamint az E-OBS adatbázis alapján két kiválasztott rácspontra, Budapestre (é. sz. 47° 34', k. h. 19° 02') és Debrecenre (é. sz. 47° 34', k. h. 21° 44') vonatkozóan, 1961–1990.

A hibakorrekciós eljárás eredményességére elvégeztük a validálást, amely során a méréseket tartalmazó E-OBS adatbázis, valamint a korrigálatlan és korrigált ERA-40 meghajtású PRECIS szimulációk outputjaiból számolt hőségriasztások számának átlagos éves értékeit hasonlítjuk össze az 1961–1990 múltbeli időszakra.

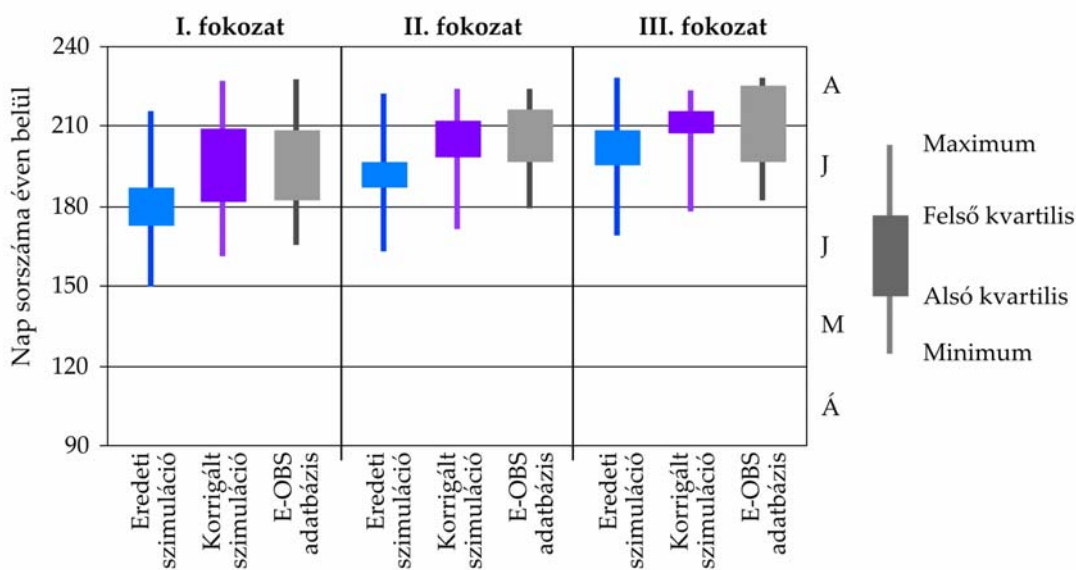
A 12. ábrán jól megfigyelhető a hibakorrekciós eljárás eredményessége, hisz míg a PRECIS szimuláció eredetileg felülbecsülte a hőségriasztások számának átlagos éves értékeit, a korrekció alkalmazása után már jó egyezést mutat a megfigyelt adatok alapján számított értékekkel. Míg a korrigálatlan hőmérsékleti szimulációk alapján az I. fokozatú hőségriasztások átlagos éves száma 31 volt, a korrigált modell-outputok alapján ez az érték lecsökken a tizedére: 3,1 esetszámmra. A II. fokozatú hőségriadó esetében is hasonló csökkenés tapasztalható: az eredeti outputok alapján kapott 3,5 átlagos éves esetszám, a hibakorrekciós eljárás következtében 0,5-re csökken, ami megegyezik az E-OBS adatbázis alapján számított hőségriasztások számával. A III. fokozatú hőségriasztások átlagos éves száma a korrekció előtt 2,6 volt, korrigálva a modellt ez az érték lecsökken a mérések alapján is kapott 0,03 átlagos éves esetszámmra.



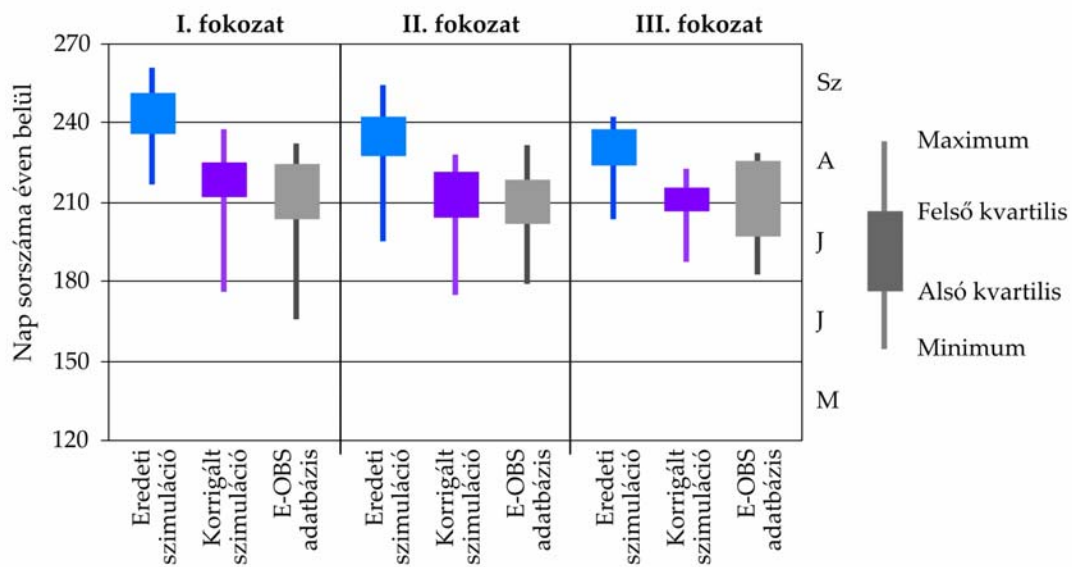
12. ábra: A korrigálatlan és a korrigált PRECIS szimuláció, valamint a méréseket tartalmazó E-OBS adatbázis alapján számított hőségriasztások területi átlaga Magyarországon, 1961–1990.

A hőségriadók előfordulási időpontjaira vonatkozó grafikonon bemutatott validálási eredmények az éven belüli első előfordulásra vonatkozóan a 13. ábrán, az utolsó előfordulás esetén a 14. ábrán található. A hibakorrekciós eljárást alkalmazva a referencia időszakban a hőségriasztások első előfordulási időpontja várhatóan később, az utolsó előfordulási időpont viszont korábban következik be az évben, mint az eredeti éghajlati

szimulációk alapján. A korrigált PRECIS szimulációk alapján az I. fokozatú hőségriadó a referencia időszakban átlagosan 15 nappal később jelenik meg, illetve 28 nappal korábban az utolsó előfordulás, mint a korrigálatlan értékek alapján. A II. fokozatú hőségriadó átlagosan 12 nappal később jelenik meg, az utolsó riasztás pedig átlagosan 23 nappal korábban következik be az évben. A III. fokozatú hőségriadó esetében a korrigált A1B tranziens futtatás alapján az éven belüli első előfordulási időpont átlagosan 6 nappal későbbre tolódik, illetve 20 nappal korábbra az utolsó előfordulás. Mindhárom fokozat esetén a hibakorrekció jelentősen közelítette a Magyarországra jellemző területi átlagértékeket a referenciának tekintett E-OBS adatbázis alapján meghatározott éven belüli első és utolsó előfordulási időpontokhoz. Így hazánk területén az I. fokozatú hőségriasztás jellemzően július elejétől augusztus közepéig, a II. és III. fokozatú hőségriasztás július közepétől augusztus közepéig jelentett reális kockázatot az 1961–1990 időszakban.



13. ábra: A korrigálatlan és a korrigált PRECIS szimuláció, valamint a méréseket tartalmazó E-OBS adatbázis alapján számított hőségriasztások első előfordulási időpontjainak területi átlaga Magyarországon, 1961–1990



14. ábra: A korrigálatlan és a korrigált PRECIS szimuláció, valamint a méréseket tartalmazó E-OBS adatbázis alapján számított hőségriasztások utolsó előfordulási időpontjainak területi átlaga Magyarországon, 1961–1990

4. A hőségriadók elemzése

Ebben a fejezetben a hazai gyakorlatban alkalmazott hőségriadó fokozatokhoz tartozó időtartamok Magyarországra várható változásait elemezzük a 2021–2050 és 2071–2100 jövőbeli időszakokra az 1961–1990 referencia időszakhoz viszonyítva, a 25 km-es horizontális felbontású PRECIS modell korrigált hőmérsékleti szimulációit felhasználva. Az évszázad végére vonatkozóan megvizsgáltuk a pesszimistább A2 és az optimistább B2 scenárió szerinti várható változásokat is.

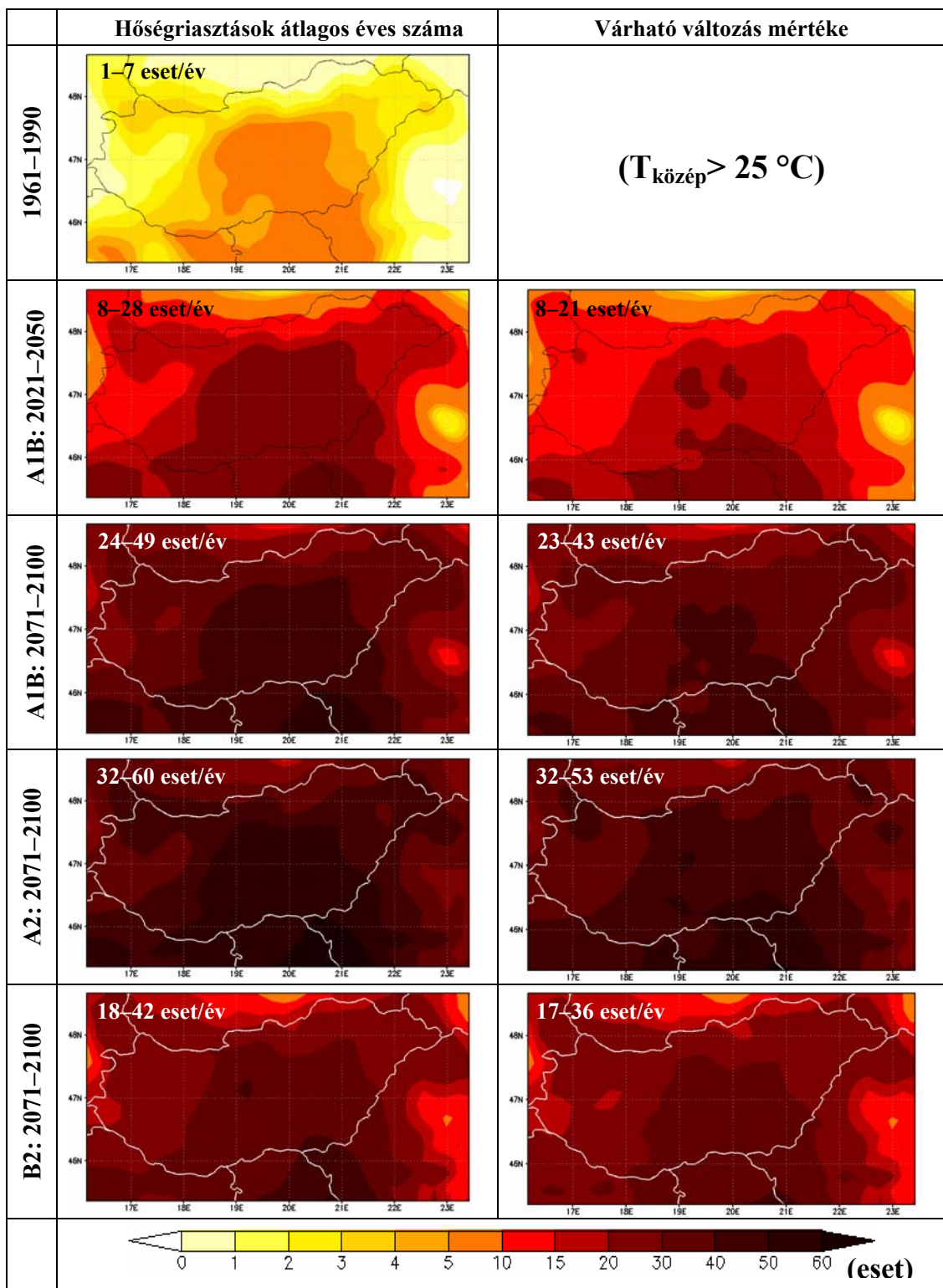
4.1. A hőségriasztások átlagos éves számának várható tendenciái

Ebben az alfejezetben elemezzük a hőségriasztások számának korrigált éghajlati szimulációk alapján meghatározott átlagos éves értékeit, valamint a jövőbeli időszakokra várható változások mértékét. Az I. fokozatú hőségriasztások esetén a térképes formában bemutatott eredményeink bal oldali oszlopában a vizsgált 30 éves időszakokra vonatkozó átlagos érték szerepel, a jobb oldalon pedig a várható változások mértéke. Mivel a II., illetve III. fokozatú hőségriasztások definíció szerint minimum 3 egymást követő nappól állnak, meghatároztuk ezek átlagos éves időtartamát is, s az eredményeket megjelenítő táblázatban található térképsorozatot bal oldalon kibővítettük ezzel az információval.

4.1.1. I. fokozatú hőségriasztások

Amikor a napi középhőmérséklet meghaladja a 25 °C-ot, I. fokozatú hőségriadó lép életbe. A 15. ábrán az I. fokozatú hőségriadó 30 éves átlaga, illetve az 1961–1990 referencia időszakhoz viszonyított különbsége látható Magyarország területére. Mint ahogyan azt már korábbi vizsgálataink során is tapasztaltuk a RegCM szimulációk esetén (Bartha, 2010), ugyanúgy a korrigált PRECIS modell esetén is észrevehető a zonális szerkezet hazánk térségében mindhárom időszakban, mivel az ország déli és északi-északkeleti tájai között igen jelentős különbségek vannak, például az 1961–1990 időszakban északon a hőségriasztások átlagos éves száma 1–3 nap, délen ugyanakkor ez az érték 5–6 nap. A 15. ábra jobb oldalán lévő térképek az időszakok közötti különbséget

szemléltetik. Ezek alapján észrevehető, hogy a 2021–2050 időszakban az 1961–1990 időszakhoz képest (15. *ábra* jobb felső térképe) átlagosan 8–21 nappal növekedhet a hőségriasztások gyakorisága, míg a 2071–2100 időszakra ez a növekedés átlagosan 23–43 nap körüli az A1B tranziens futtatás alapján. Sőt a jövőre vonatkozó A2 pesszimista scenárió alapján a várható változás mértéke átlagosan 10 nappal nagyobb (32–53 nap/év), mint az A1B esetén, s a B2 optimistább forgatókönyv alapján 6–7 nappal kisebb az átlagos növekedés mértéke (17–36 nap/év), mint az A1B esetén, ahogyan azt a 15. *ábra* jobb alsó két térképe is szemlélteti. A várható változások elemzésekor elvégeztük a statisztikai t-próbát (Dévényi és Gulyás, 1988), mely alapján az itt bemutatott változások mindegyik időszakra az országon belüli összes rácspontra 95%-os szinten szignifikánsnak bizonyultak.



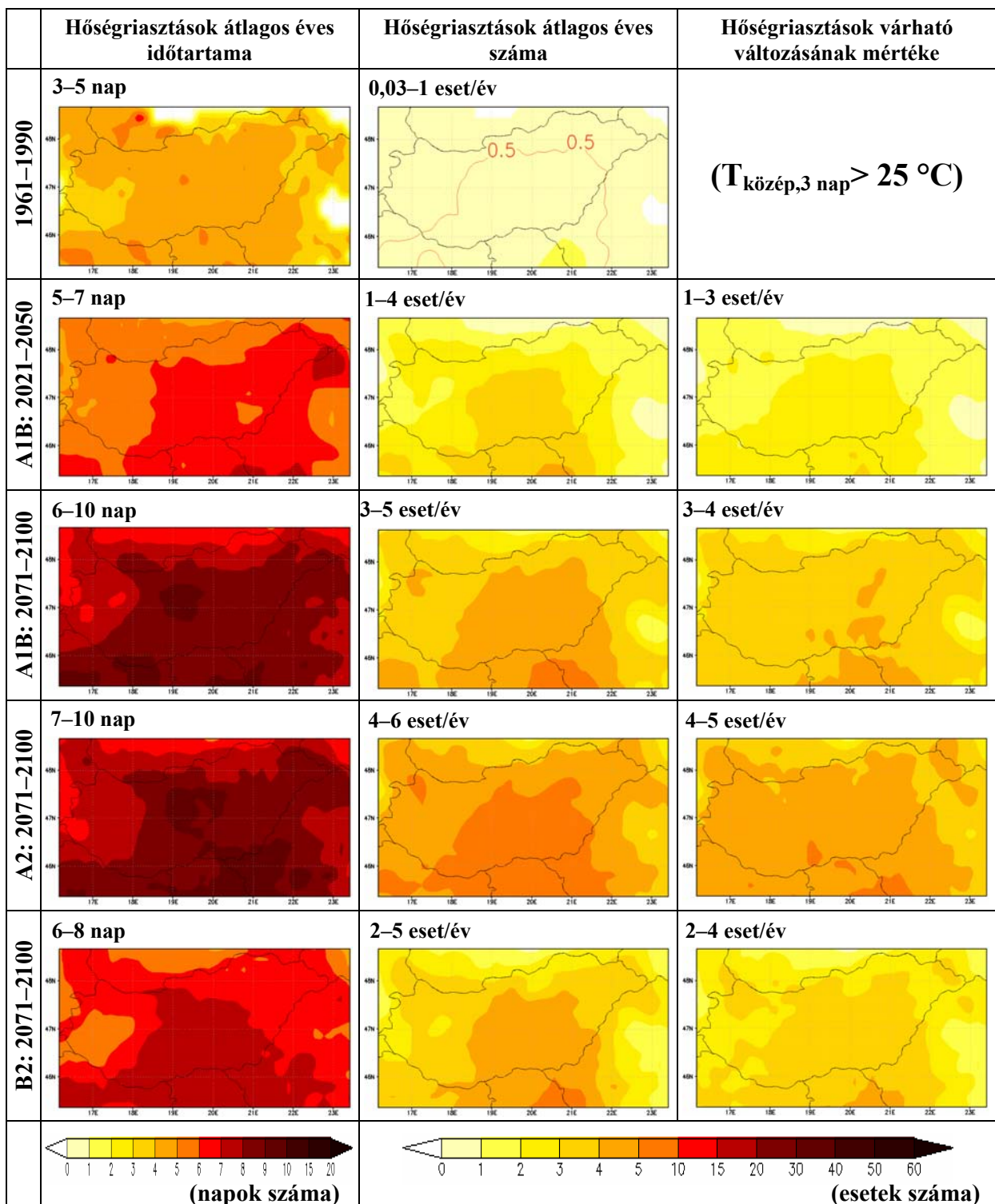
15. ábra: I. fokozatú hőségriasztások átlagos éves előfordulási gyakorisága, illetve ezek különbsége (esetszám) a PRECIS modellszimuláció korrigált eredményei alapján az 1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100 időszakra.

A várható változások az összes hazai rácspontra szignifikánsak 95%-os szinten.

4.1.2. II. fokozatú hőségriasztások

Amikor a napi középhőmérséklet legalább 3 egymást követő napon meghaladja a 25 °C-ot, akkor II. fokozatú hőségriadót rendelnek el. A *16. ábrán* a II. fokozatú hőségriadó várható gyakoriságváltozása, valamint a hőségriasztások átlagos éves időtartama látható a táblázat bal oldali oszlopában. A korrigált PRECIS szimulációk alapján II. fokozatú hőségriadó az 1961–1990 referencia időszakban az ország egész területén átlagosan évente 1 alkalommal fordul elő. 2021–2050-es időszakra az ország északi felében évente 1 alkalommal több hőségriadó következhet be, délen pedig 2 a várható változás mértéke (*16. ábra* jobb felső térképe). Az 1961–1990-beli évi átlagos egyszeri alkalom 2071–2100 időszakra az ország nagy részében 4–5-ra növekszik a tranziens futtatás alapján. Az A2 forgatókönyv alapján 2071–2100 időszakban az 1961–1990 időszakhoz képest átlagosan 4–5 esettel növekedhet a hőségriasztások gyakorisága, míg a B2 szerint ez a növekedés átlagosan 2–3 eset körüli (*16. ábra* jobb alsó két térképe). A várható változások minden hazai rácspontban 95%-os szinten szignifikánsak.

A regionális melegedési tendencia (Bartholy et al., 2009) miatt a hőségriasztások átlagos éves időtartamában is megjelenik a várható növekedő trend, mint ahogyan ezt a *16. ábra* bal oldali oszlopában lévő térképek is szemléltetik. Megfigyelhető, hogy a korrigált PRECIS szimuláció alapján az 1961–1990 időszakban a II. fokozatú hőségriasztások átlagosan 3–5 napig tartottak, 2021–2050-ben már 5–7 napon át is elrendelhetnek hőségriadót, sőt, a XXI. század végén az ország középső részén akár 10 napos is lehet a hőségriasztások átlagos éves időtartama (*16. ábra* bal oldali oszlopa).

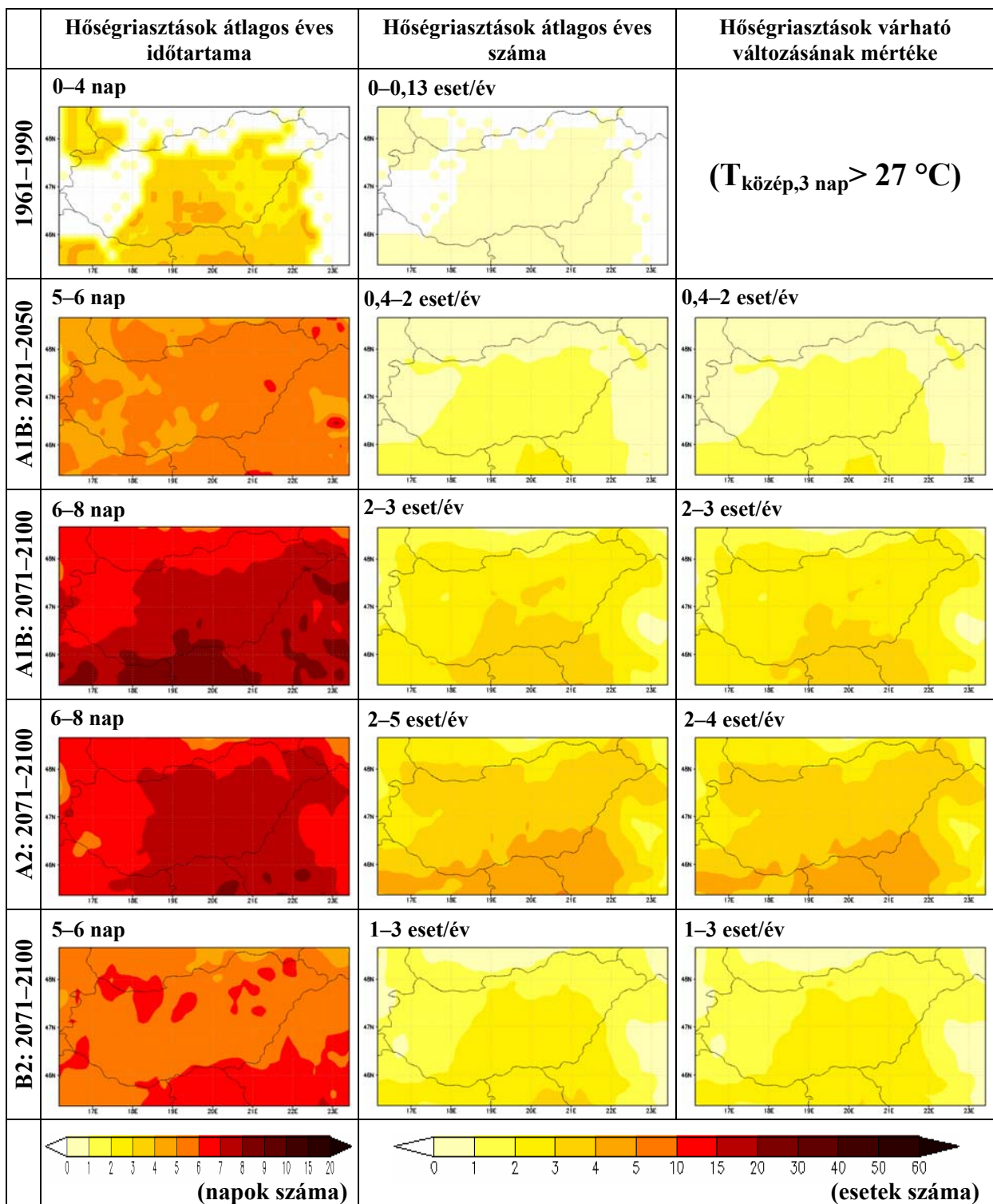


16. ábra: II. fokozatú hőségriasztások átlagos időtartama, átlagos éves előfordulási gyakorisága, illetve ezek különbsége (esetszám) a PRECIS modellszimuláció korrigált eredményei alapján az 1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100 időszakra.

A várható változások az összes hazai rácspontra szignifikánsak 95%-os szinten.

4.1.3. III. fokozatú hőségriasztások

Amikor a napi középhőmérséklet legalább 3 egymást követő napon keresztül meghaladja a 27 °C-ot, akkor III. fokozatú hőségriadóról beszélünk. A 17. ábrán megfigyelhető, hogy a korrigált PRECIS szimulációk alapján a referencia időszakban a vizsgált kivágaton belül a domb- és hegyvidékeken egyáltalán nem fordult elő III. fokozatú hőségriadó, 2071–2100-ban ilyesmi már várhatóan egyik scenárió szerint sem valószínű. 2021–2050-es időszakra az ország északi felében évente 1 alkalommal több hőségriadó következhet be, délen pedig 2 a várható változás mértéke (17. ábra jobb felső térképe). Az 1961–1990-beli egyszeri alkalom 2071-2100 időszakra az ország nagy részében 2-re növekszik, délen pedig 3 alkalommal is lehet majd számolni. A t-próba (Dévényi és Gulyás, 1988) alkalmazásával a várható változás az összes hazai rácspontban statisztikailag szignifikáns 95%-os szinten. Szintén megfigyelhető a III. fokozatú hőségriasztások átlagos éves időtartamában a változás: a múltbeli átlagosan 3–4 napos hőségriasztás 2021–2050-ben, valamint a B2 optimistább forgatókönyv szerint, 5–6 napos lesz, míg 2071–2100-ra mind az A1B, mind az A2 figyelembevételével 6–8 napig tartanak átlagosan a III. fokozatú hőségriasztások (17. ábra bal oldali oszlopa).

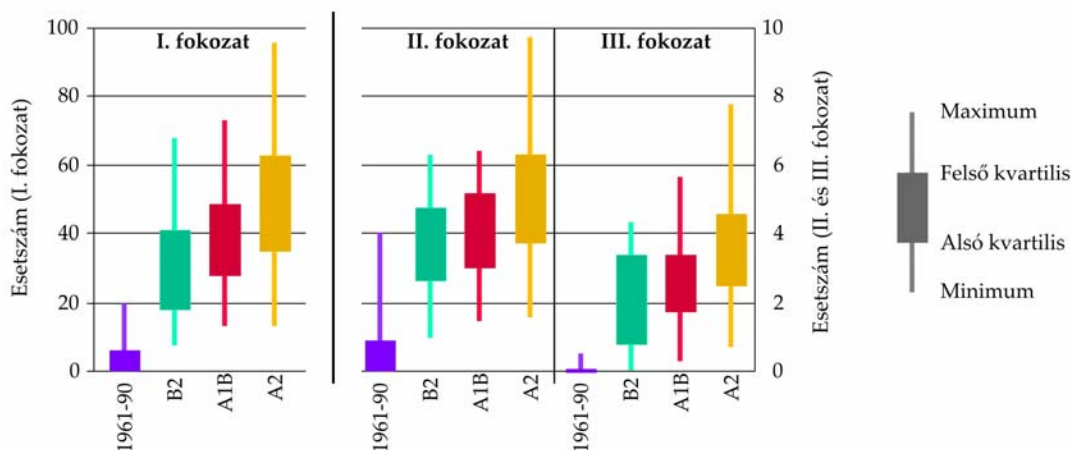


17. ábra: III. fokozatú hőségriasztások átlagos időtartama, átlagos éves előfordulási gyakorisága, illetve ezek különbsége (esetszám) a PRECIS modellszimuláció korrigált eredményei alapján az 1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100 időszakra.

A várható változások az összes hazai rácspontra szignifikánsak 95%-os szinten.

4.1.4. A hőségriasztások átlagos éves száma Magyarország rácspontjaira

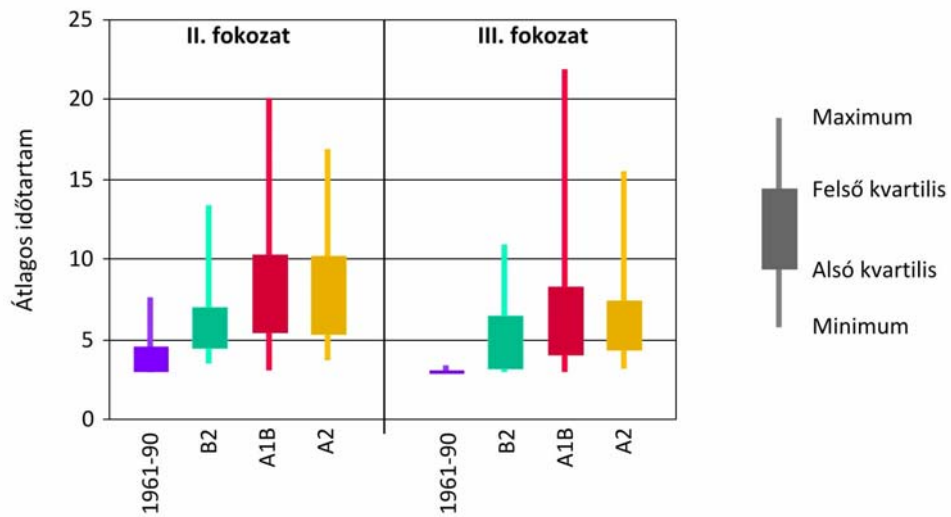
Ebben az alfejezetben összefoglaljuk a 4.1.1.–4.1.3. alfejezetben szereplő vizsgálataink eredményeit, azaz a hőségriasztások számának átlagos éves értékeiben várható változások mértékét. A 18. ábrán egyértelműen látszik, hogy a magyarországi gyakorlatban alkalmazott hőségriadó fokozatokhoz tartozó időtartamok várható változásai növekedési tendenciát mutatnak a 2071–2100 jövőbeli időszakra az 1961–1990 referencia időszakhoz viszonyítva. A korrigált PRECIS modell szimulációi alapján a XXI. század végére a különböző fokozatú hőségriasztások előfordulásában jelentős mértékű növekedés valószínűsíthető, melynek mértéke akár tízszeres is lehet a referencia időszakhoz képest. Míg 1961–1990-ben az I. fokozatú hőségriasztások átlagos éves száma 4 volt, 2071–2100-ban az összes jövőre vonatkozó scenárió szerint ez az érték elérheti átlagosan a 30–40 esetszámot is. A II. és III. fokozatú hőségriasztások átlagos éves száma 0,5, illetve 0,03-ról az évszázad végére várhatóan 4–5, illetve 2–3 esetre növekedhet.



18. ábra: A korrigált PRECIS szimuláció alapján számított hőségriasztások területi átlaga Magyarországon, 1961–1990, illetve 2071–2100 időszakban.

A hőségriadók gyakoriságváltozása mellett az időtartamukban is érzékelhető a növekedési trend, mint ahogyan ezt a 19. ábrán észleljük. A korrigált éghajlati szimulációk alapján a XXI. század végén a hőségriasztások átlagos éves időtartama akár kétszer hosszabb lehet, mint ez a referencia időszakban volt tapasztalható. 2071–2100-ban a II. fokozatú hőségriadó az optimistább B2 scenárió esetén átlagosan 6 napig tart, a közepes A1B, valamint a pesszimista A2 forgatókönyv esetén várhatóan átlagosan 8 napig lehetséges. A III. fokozatú hőségriadó esetében a korrigált A1B tranziens futtatás, valamint

az A2 alapján a meghosszabbodás mértéke átlagosan 4 nap, s a B2 szimuláció esetén átlagosan 2 nappal növekedhet meg a III. fokozatú hőségriasztás átlagos éves időtartama.



19. ábra: A korrigált PRECIS szimuláció alapján számított II. és III. fokozatú hőségriasztások időtartamainak területi átlaga Magyarországon, 1961–1990, illetve 2071–2100 időszakban.

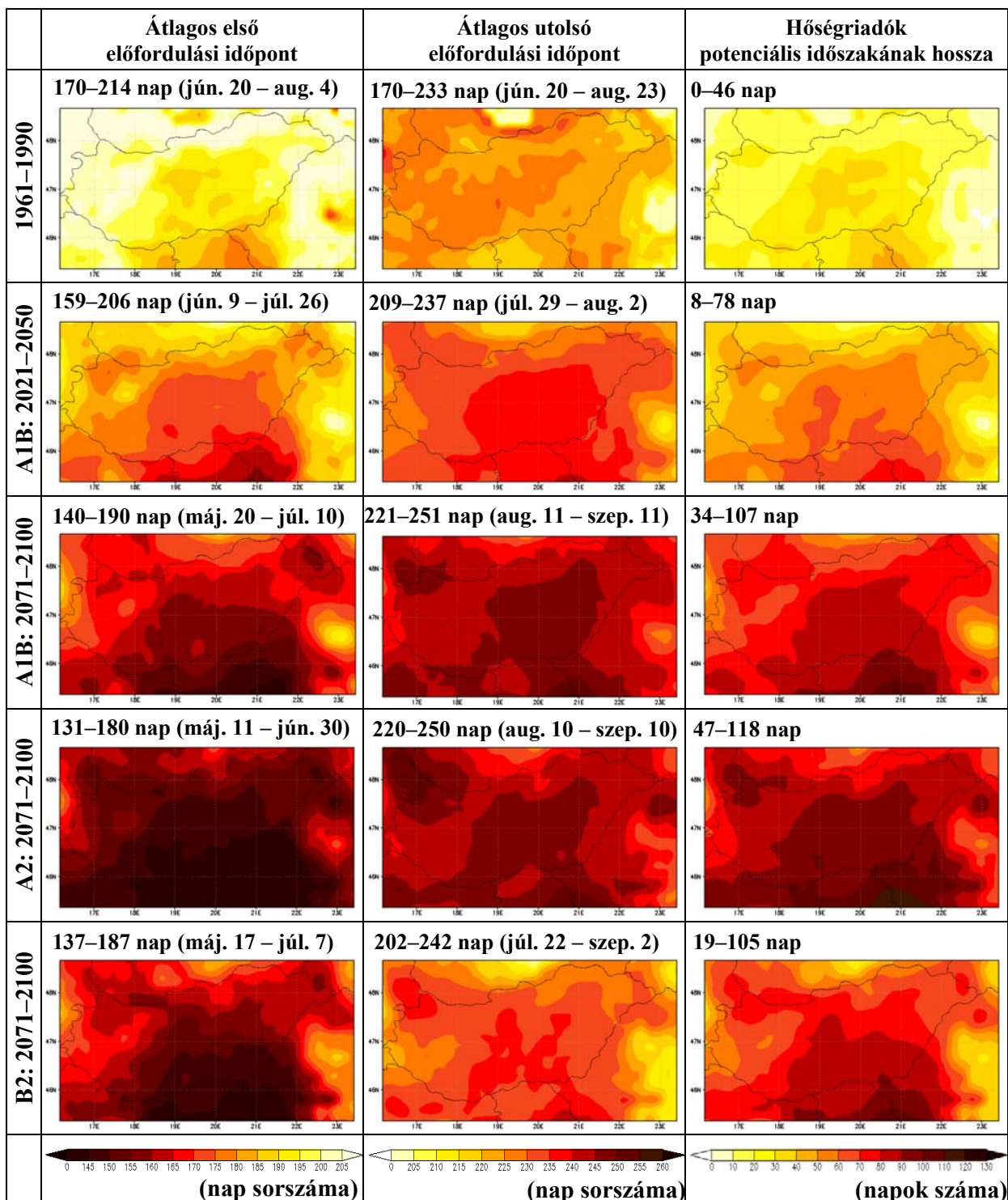
4.2. A hőségriadó éven belüli átlagos előfordulási időszakának várható tendenciái

Ebben a fejezetben a hőségriadók első és utolsó megjelenési időpontját vizsgáljuk a korrigált PRECIS szimulációk alapján. A térképes megjelenítés az átlagos előfordulási időszakok térbeli eloszlását illusztrálja: az első oszlopban a hőségriadó éven belüli átlagos első előfordulási időpontja, a másodikban az éven belüli átlagos utolsó időpont, a harmadikban pedig hőségriadók potenciális időszakának térbeli eloszlása szerepel.

4.2.1. I. fokozatú hőségriasztások előfordulási időszaka az éven belül

A 20. ábra bal felső térképe azt mutatja, hogy az I. fokozatú hőségriadó a korrigált éghajlati szimulációk alapján az 1961–1990 időszakban leghamarabb az ország déli részén következik be, átlagosan az év 185–190. napján, azaz július 5–10. között. A Nyugat-Dunántúlon ez két héttel későbbre tolódik, s a legkésőbbi első előfordulási időpont pedig az Északi-középhegységben, valamint a Dunántúli-középhegységben fordul elő, átlagosan az év 205–210. napján, azaz július 25–30. között.

A tranziens A1B futtatás alapján az 1961–1990 időszakban az éven belüli utolsó I. fokozatú hőségriadó (20. ábra középső felső térképe) Dunántúlon és Közép-Magyarországon átlagosan az év 225–230. napján, azaz augusztus 15–20. között fordul elő. Az Alföldön és Észak-Magyarországon 5 nappal korábban következik be ez az időpont, átlagosan az év 220–225. napján, azaz augusztus 10–15. között fordul elő. A legkorábbi utolsó előfordulási időpont pedig Szabolcs-Szatmár-Bereg megyében fordul elő, átlagosan az év 215–220. napján, azaz augusztus 5–10. után már nem jellemző az I. fokozatú hőségriadó az ország ezen részén.



20. ábra: I. fokozatú hőségriasztások ($T_{közép} > 25\text{ °C}$) első és utolsó előfordulási időpontjainak éves átlaga (nap sorszáma az éven belül), valamint a potenciális időszakának hossza a PRECIS modellszimuláció korrigált eredményei alapján az 1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra

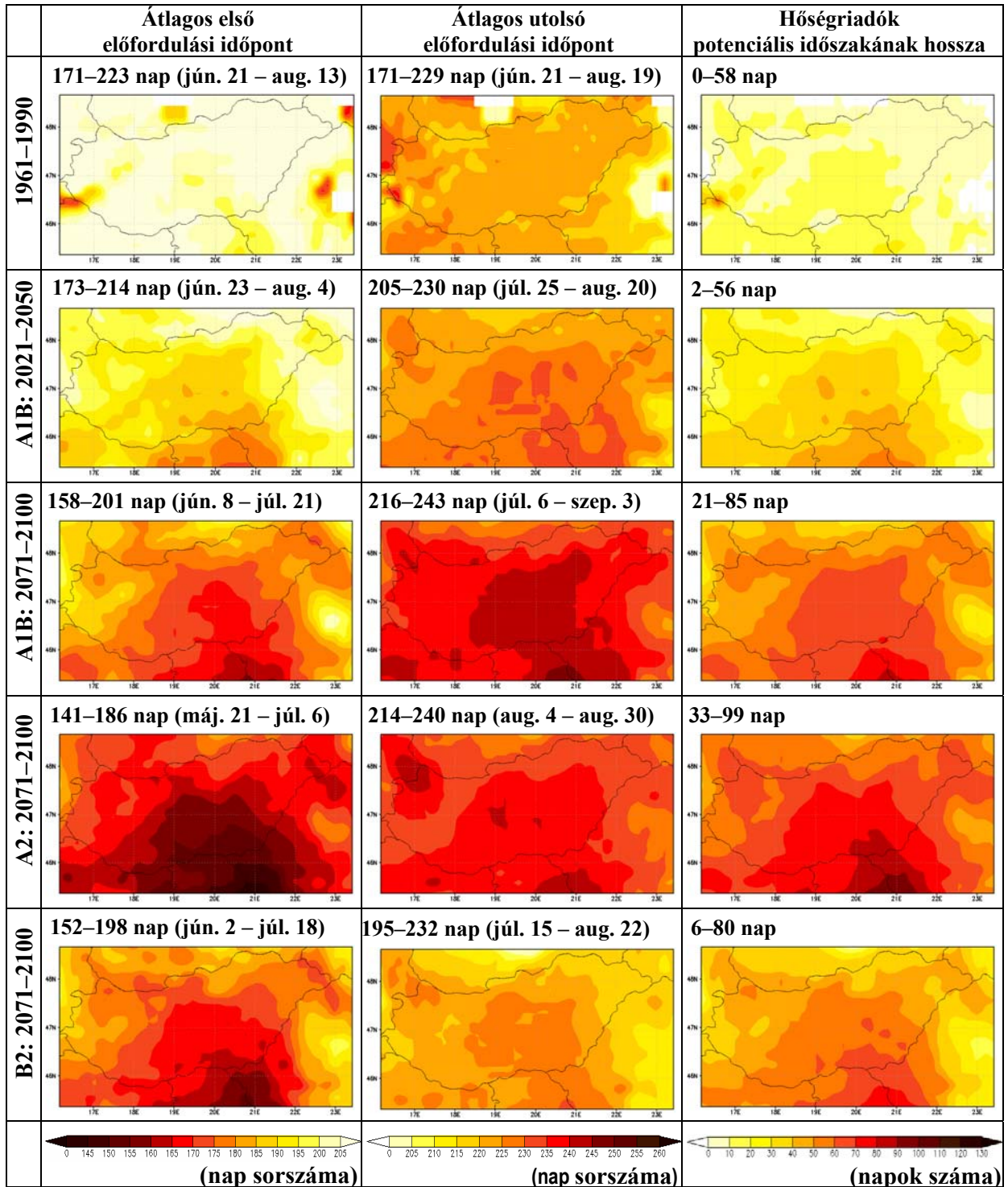
A 2021-2050 időszak éghajlati szimulációja szerint átlagosan 10–15 nappal korábban jelenhet meg először az I. fokozatú hőségriadó, illetve ugyanennyivel később az utolsó előfordulás. 2071–2100 között az ország déli területein már a 155–160. napon (június 5–10. között) lehetséges a hőségriasztás, átlagosan pedig az 1961–1990 referencia időszakhoz képest 30 nappal korábban következhet be az I. fokozatú hőségriadó, illetve ugyanennyivel később az utolsó hőségriasztási nap. A pesszimista A2 scenárió hasonló változásokat szimulál, sőt az éven belüli első előfordulási időpont átlagosan 5 nappal még korábban következik be, mint az A1B forgatókönyv szerinti. Az hogy a B2 scenárió optimistább, a hőségriasztások átlagos utolsó előfordulási időpontoknál is látszik, mivel ez átlagosan 5–10 nappal előrébb hozza az éven belüli utolsó hőségriadó időpontját, mint ahogyan az A1B tranziens futtatás esetén tapasztalható.

A I. fokozatú hőségriasztások éven belüli előfordulási időpontok mellett meghatároztuk ezek potenciális időszakának hosszát is, ami *20. ábra* utolsó oszlopában található. A *20. ábra* jobb felső térképe azt mutatja, hogy az I. fokozatú hőségriadó potenciális időszaka a korrigált PRECIS szimulációk alapján az 1961–1990 időszakban az ország északi részén a legrövidebb, átlagosan 10–20 nap. A zonális szerkezetnek megfelelően, déli irányba haladva hosszabbodik ez az időszak, Közép-Magyarországon a leghosszabb, átlagosan 30–40 napig tart. A regionális melegedési tendencia miatt a hőségriasztások potenciális időszakának hosszában is megjelenik a várható növekedő trend. A *20. ábra* utolsó oszlopában lévő térképeken megfigyelhető, hogy a korrigált PRECIS szimuláció alapján a múltbeli 10–40 napos időszak 2021–2050-re átlagosan 15 nappal meghosszabbodik, sőt a XXI. század végén akár 3 hónapig is eltarthat.

4.2.2. II. fokozatú hőségriasztások előfordulási időszaka az éven belül

A *21. ábrán* az figyelhető meg, hogy hazánk térségében az 1961–1990 időszakban a II. fokozatú hőségriadó első előfordulási időpontja átlagosan az év 200–210. napja (július 20–30.), az éven belüli utolsó előfordulási időpont pedig átlagosan az év 220–225. napján (augusztus 10–15.) következik be. Mint az I. fokozat esetében is, itt is az ország déli részén, valamint a Dunántúli-középhegységben rendelkeznek el legkorábban hőségriadót, átlagosan az év 195–205. napján, azaz július 15–25. között. A referencia időszakhoz viszonyítva a 2021–2050 időszakra szimulált adatok alapján átlagosan 10–20 nappal

hosszabbodik meg a lehetséges hőségriasztási időszak, a 2071–2100 időszakra pedig akár 2 hónappal is.



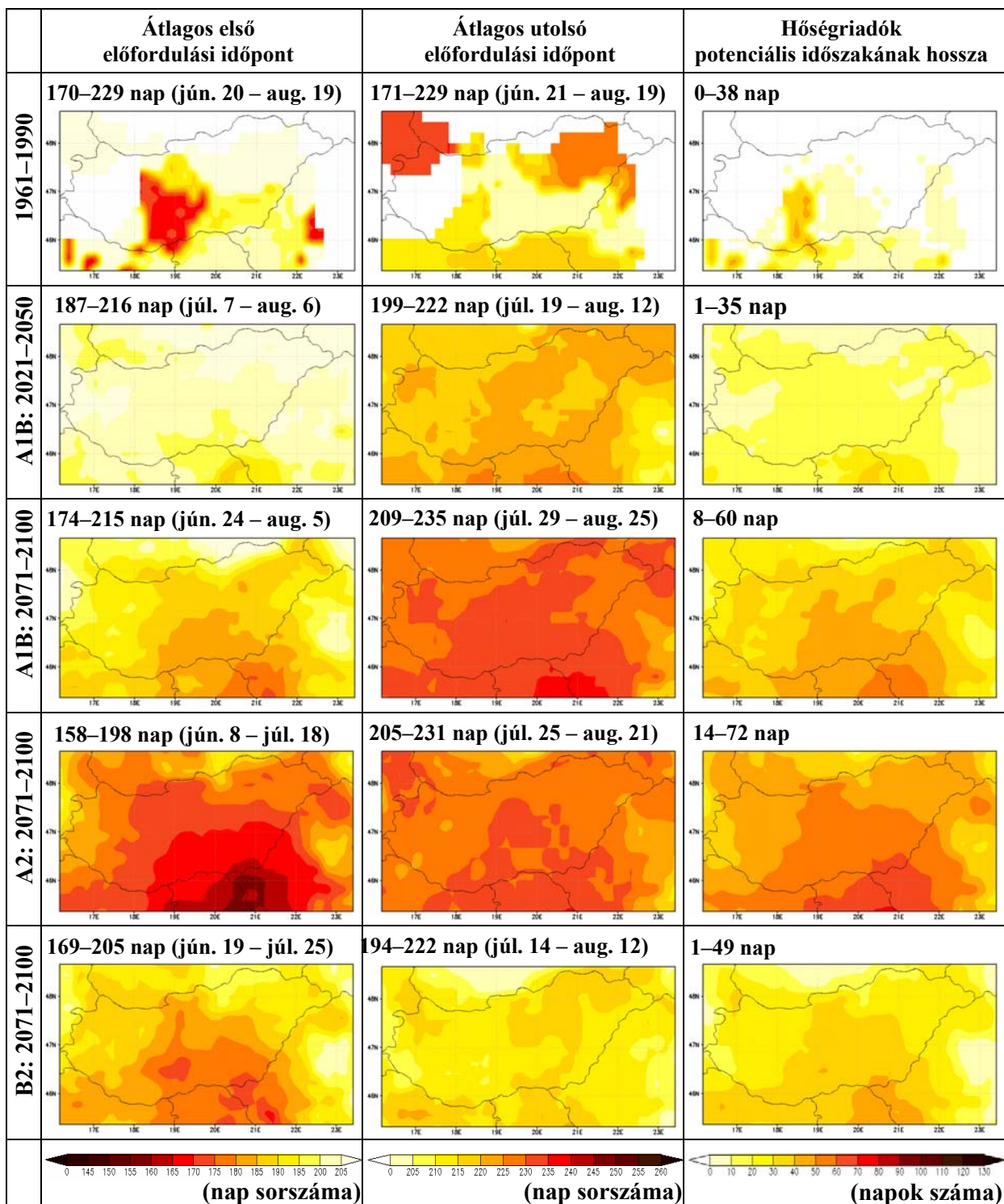
21. ábra: II. fokozatú hőségriasztások ($T_{közép,3 nap} > 25\text{ °C}$) első és utolsó előfordulási időpontjainak éves átlaga (nap sorszáma az éven belül), valamint a potenciális időszakának hossza a PRECIS modellszimuláció korrigált eredményei alapján az 1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100 időszakra

4.2.3. III. fokozatú hőségriasztások előfordulási időszaka az éven belül

A 22. ábra bal felső térképén egy látszólag ellentmondásos jelenséget figyelhetünk meg, mégpedig azt, hogy az 1961–1990 időszakra vonatkozó PRECIS szimulációk alapján a legerősebb III. fokozatú hőségriadó az évben hamarabb következik be, mint az enyhébb II. fokozatú. Ez a különböző rácspontokban eltérő előfordulási esetszámokkal magyarázható. Ugyanis az 1961-1990 referencia időszakban kevés olyan év található, amikor a III. fokozatú hőségriadó a Duna vonala mentén az ország középső részén előfordul, mely a szimuláció során átlagosan az év 170. napjára, azaz június 20.-ára esik. Ezekben a szimulációs években Magyarország nagy részén a szokásoshoz képest egységesen korán jelentkezik a hőségriadó. A II. fokozatú hőségriasztás viszont a többi rácspontban más években is gyakrabban előfordul, mint a III. fokozatú, így a nagyobb esetszámmal átlagolva az éven belüli előfordulási időpont értékében jelentős térbeli különbség jelenik meg.

A XXI. században hasonló jelenség már várhatóan egyik scenárió szerint sem valószínűsíthető, hanem inkább zonális szerkezet prognosztizálható hazánk térségében. 2021–2050 között az ország déli részén rendelkezhet el legkorábban III. fokozatú hőségriadót, átlagosan az év 195–200. napján, vagyis július 15–20. között. Északabbra haladva egyre inkább növekszik ez az érték, hazánk nagyobb részén az év 200–205 napján (július 20–25.) következhet be III. fokozatú hőségriasztás, legkésőbb pedig Észak-Magyarországon, valamint Nyugat-Dunántúlon jelenthető az éven belüli első riasztás, átlagosan az év 205–215. napján. A korrigált éghajlati szimulációk alapján a 2021–2050 időszakban a III. fokozatú hőségriasztás átlagos utolsó előfordulási időpontja az év 215–225. napjára esik, azaz várhatóan augusztus 5-15 között.

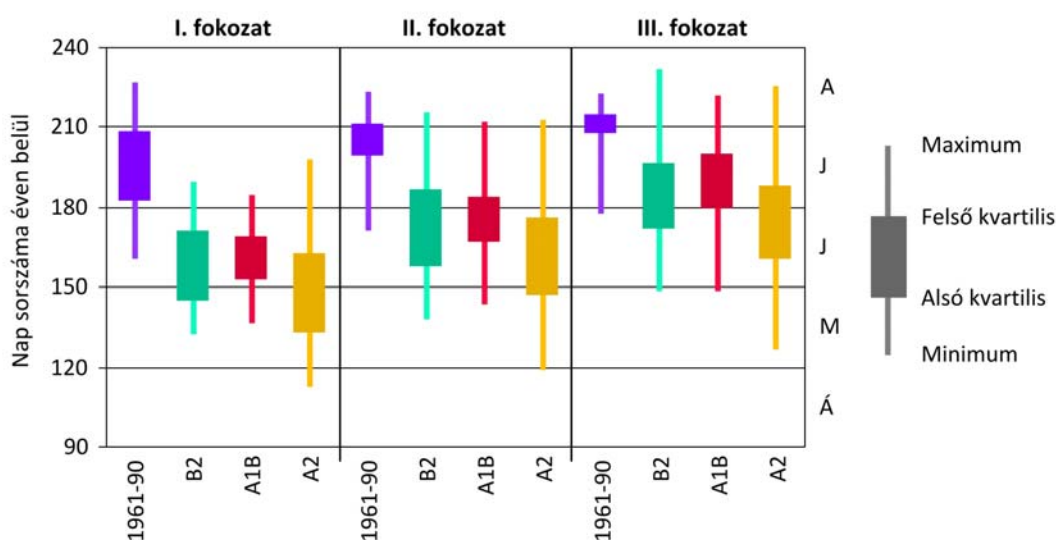
A III. fokozatú hőségriasztások potenciális időszakának hossza a 2021–2050 időszakra a korrigált tranziens futtatás alapján átlagosan 10–20 nap, a XXI. század végén pedig már átlagosan 40–50 nap is lehet az A2 scenárió figyelembevételével.



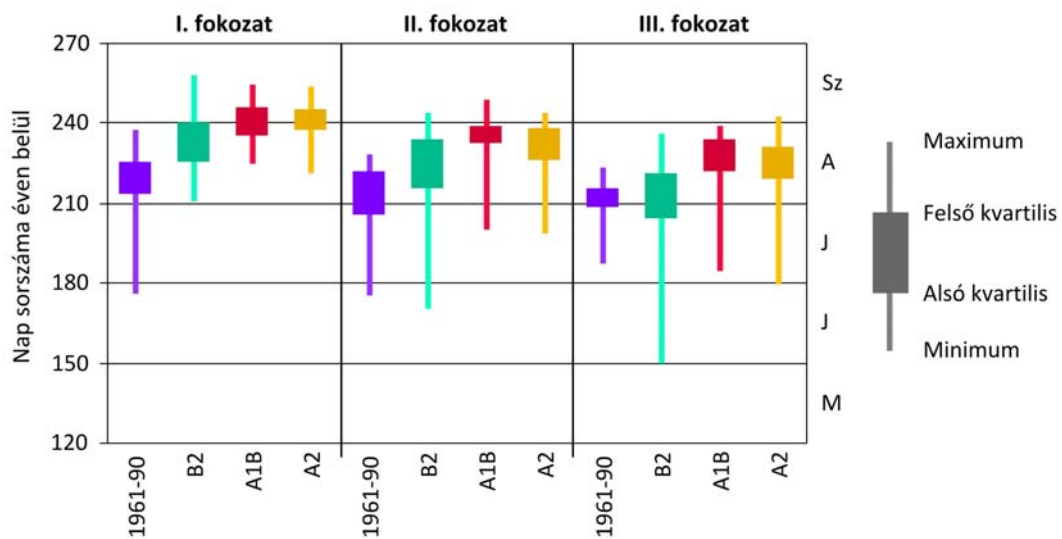
22. ábra: III. fokozatú hőségriasztások ($T_{közép,3 nap} > 27\text{ °C}$) első és utolsó előfordulási időpontjainak éves átlaga (nap sorszáma az éven belül), valamint a potenciális időszakának hossza a PRECIS modellszimuláció korrigált eredményei alapján az 1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100 időszakra

4.2.4. A hőségiadó átlagos előfordulási időszaka Magyarország rácspontjaira

Az alábbiakban összefoglaljuk a 4.2.1.–4.2.3. alfejezetből levonható következtetéseket. A hőségiadók gyakoriságváltozása mellett ezek előfordulási időpontjaiban is eltolódás érzékelhető. A korrigált éghajlati szimulációk alapján a XXI. század végén a hőségiasztások első előfordulási időpontja várhatóan korábban (23. ábra), az utolsó előfordulási időpontja viszont később (24. ábra) következik be az év során, mint az 1961–1990 referencia időszakban. 2071–2100-ban az I. fokozatú hőségiadó átlagosan 65–70 nappal korábban jelentkezhet, illetve 20 nappal később az utolsó előfordulás az összes jövőre vonatkozó éghajlati scenárió szerint. A II. fokozatú hőségiadó várhatóan átlagosan 30 nappal korábban jelentkezik mind az A1B, mind a B2 forgatókönyv esetén. A pesszimistább A2 megvalósulása esetén akár 40 nappal is korábban előfordulhat a II. fokozatú hőségiadó, az utolsó előfordulási időpont pedig átlagosan 20 nappal később következik be az évben, mint az 1961–1990 referencia időszakban. A III. fokozatú hőségiadó esetében a korrigált A1B tranziens futtatás alapján az eltolódás mértéke átlagosan 17 nap az első és az utolsó előfordulásnál egyaránt. A pesszimistább A2 scenárió szerint 2071–2100-ban a III. fokozatú hőségiadó átlagosan 34 nappal korábban, illetve 14 nappal később jelenik meg, mint 1961–1990-ben.



23. ábra: A korrigált PRECIS szimuláció alapján számított hőségiasztások első előfordulási időpontjainak területi átlaga Magyarországon, 1961–1990, illetve 2071–2100 időszakban.



24. ábra: A korrigált PRECIS szimuláció alapján számított hőségriasztások utolsó előfordulási időpontjainak területi átlaga Magyarországon, 1961–1990, illetve 2071–2100 időszakban.

5. Összefoglalás

A globális klímaváltozás humán-egészségügyi szempontból jelentős következményekkel járhat, ezért jelen dolgozatban a különféle hatások közül a hőhullámokat emeltük ki, amelynek az intenzitás- és gyakoriságnövekedése az éghajlatváltozás egyik közvetlen klimatikus következménye.

Mivel a 25 km-es horizontális felbontású PRECIS regionális klímamodell csak bizonyos hibával terhelten képes megadni a napi középhőmérséklet várható értékét, ezért hibakorrektions eljárással csökkentettük a hőmérsékleti mezősor hibáit. A PRECIS modell így előállított korrigált hőmérsékleti szimulációit felhasználva elemeztük a hőhullámok várható tendenciáit Magyarország térségére. E vizsgálathoz a hazai gyakorlatban alkalmazott három fokozatú hőségriasztási rendszert (Bujdosó és Páldy, 2006) vettük figyelembe. A különböző fokozatú hőségriasztások időtartamát meghatároztuk az 1961–1990 referencia időszakra, valamint a XXI. század két harmincéves időszakára (2021–2050, 2071–2100). A jövőre vonatkozóan a tranziens futtatás esetében az A1B közepesnek tekinthető globális scenáriót tekintettük, valamint a pesszimistább A2 és az optimistább B2 forgatókönyvet is megvizsgáltuk. Eredményeinket térképes és grafikonos formában mutattuk be, melyek alapján az alábbi következtetések vonhatók le:

- ❖ A PRECIS szimuláció eredetileg alulbecsülte az alacsonyabb, és felülbecsülte a magasabb hőmérsékletek előfordulását, de a korrekció alkalmazása után már jó egyezést mutat a megfigyelt értékekkel.
- ❖ A különböző fokozatú hőségriasztások számában egyértelmű növekedő tendenciára számíthatunk a XXI. század során, mely összhangban van a térségben várható melegedő trenddel (Bartholy et al., 2009). Míg 2021–2050-re csekélyebb mértékű növekedés valószínűsíthető, addig 2071–2100-ra már jelentős, az összes hazai rácspontban 95%-os szinten szignifikáns növekedés várható az 1961–1990 referencia időszakhoz viszonyítva.
- ❖ A hőségriadók gyakoriságváltozása mellett természetesen az éven belüli előfordulási időszak jelentős meghosszabbodásával is számolnunk kell. A XXI. század végére a hőségriasztások éven belüli átlagos első előfordulási időpontja jóval korábbra tolódik, az éven belüli átlagos utolsó előfordulási időpont pedig lényegesen később következik be, mint a referencia időszakban.

- ❖ A különböző fokozatú hőségriadók időtartamában is jelentős növekedés várható a XXI. század során. A 2100-ra kisebb CO₂-koncentráció szintet valószínűsítő B2 scenárió esetén kisebb mértékű ez a várható változás, a 2100-ra nagyobb légköri CO₂ mennyiséget prognosztizáló A1B, illetve A2 scenárió esetén nagyobb mértékű.

IRODALOMJEGYZÉK

- Bartha, E.B., 2010: A globális klímaváltozás egészségügyi hatásai Európában és Magyarországon. BSc szakdolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest. 44p. Témavezető: Pongrácz R.
- Bartha, E.B., 2011: Magyarországi hőhullámok várható változása a RegCM modell szimulált hőmérsékleti adatai alapján. TDK dolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest. 35p. Témavezető: Pongrácz R.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Torma, Cs., Hunyady, A., 2006: A PRECIS regionális klímamodell és adaptálása az ELTE Meteorológiai Tanszékén. In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok – Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások. (Szerk.: Weidinger T.) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. 99-114.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Pieczka, I., Kardos, P., Hunyady, A., 2009: Analysis of expected climate change in the Carpathian Basin using a dynamical climate model. Lecture Notes in Computer Science, 5434, pp. 176–183.
- Braga, A.L., Zanobetti, A., Schwartz, J., 2002: The effect of weather on respiratory and cardiovascular deaths in 12 U.S. cities. *Env Health Perspect*, 110, 859-63.
- Bujdosó, L., Páldy, A., 2006: Az ÁNTSZ feladatai a klímaváltozás egészségi hatásainak megelőzése érdekében. *Agro-21 füzetek*, 48, 60–67.
- Christensen, H., Boberg, F., Christensen, O.B., Lucas-Picher, P., 2008. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophysical Research Letters*, 35, L20709, doi:10.1029/2008GL035694.
- Confalonieri, U., Menne, B., Akhtar, R., Ebi, K.L., Hauengue, M., Kovats, R.S., Revich, B., Woodward, A., 2007: Human health. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 391–431.
- Dévényi, D., Gulyás, O., 1988: *Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában.* – Tankönyvkiadó, Budapest. 443 p.

- Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, pp. 16–26.
- Formayer, H., Haas, P., 2010: Correction of RegCM3 model output data using a rank matching approach applied on various meteorological parameters. In: Deliverable D3.2 RCM output localization methods (BOKU-contribution of the FP 6 CECILIA project). <http://www.cecilia-eu.org/>
- Frich, A., Alexander, L.V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A.M.G., Peterson, T., 2002: Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19, 193-212.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C.A., Banks, H., Gregory, J.M., Johns, T.C., Mitchell, J.F.B., Wood, R.A., 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16, pp. 147–168.
- Grize, L., Huss, A., Thommen, O., Schindler, C., Braun-Fahrländer, C., 2005: Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. *Swiss Medical Weekly*, 135, 200-205.
- Hajat, S., Kovats, R.S., Atkinson, R.W., Haines, A., 2002: Impact of hot temperatures on death in London: a time series approach. *J Epidemiol Community Health*, 56, 367-372.
- Hajat, S., Armstrong, B.G., Baccini, M., Biggeri, A., Bisanti, L., Russo, A., Paldy, A., Menne, B., Kosatsky, 2006: T. Impact of high temperatures on mortality - Is there an added heat wave effect? *Epidemiology*, 17, 632-638.
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D., New, M., 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201.
- IPCC, 2007: *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L., Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 996p.
- IPCC, 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen,

- M. Tignor, P.M. Midgley Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 582p.
- IVS (Institut de Veille Sanitaire) 2003: Impact sanitaire de la vague de chaleur en France survenue en août, 2003: Rapport d'étape. Département des Maladies Chroniques et Traumatismes – Département Santé Environnement. Institut de Veille Sanitaire, Saint Maurice, France, 75p.
- Jones, R.G., Noguer, M., Hassell, D.C., Hudson, D., Wilson, S.S., Jenkins, G.J., Mitchell, J.F.B., 2004: Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS, UK Met Office Hadley Centre, Exeter. 40p.
- Kaiser, R., Le Tertre, A., Schwartz, J., Gotway, C., Daley, W., Rubin, C., 2007: The effect of the 1995 heat wave in Chicago on all-cause and cause-specific mortality. *Am. J. Public Health. Suppl.*, 1, 158-162.
- Klok, E. J., and Klein Tank, A., M., G., 2008: Updated and extended European dataset of daily climate observations, *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.1779.
- Lakatos, M., Szépszó, G., Bihari, Z., Krüzselyi, I., Szabó, P., Bartholy, J., Pongrácz, R., Pieczka, I., Torma, Cs., 2012: Éghajlati szélsőségek változásai Magyarországon: közelmúlt és jövő., 11p.
- Láng, I., Csete, L., Jolánkai, M., 2006: A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok. In: KvVM-MTA-VAHAVA projekt összefoglalás, Budapest, 5-6.
- van der Linden, P., Mitchell, J.F.B., 2009: ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. 160p.
- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., Wanner, H., 2004: European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science*, 303, 1499-1503.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (eds.), 2000: Emissions Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 570p.
- Osborn, T., J., and Hulme, M., 1998: Evaluation of the European daily precipitation characteristics from the Atmospheric Model Intercomparison Project, *Int. J. Climatol.*, 18, 505–522.
- Páldy, A., Bobvos, J., 2008: A 2007. évi magyarországi hőhullámok halálózásra gyakorolt hatásai. *Klíma-21 Füzetek*, 52, 3-15.
- Páldy, A., Erdei, E., Bobvos, J., Ferenczi, E., Nádor, G., Szabó, J., 2003: A klímaváltozás egészségi hatásai. *Agro-21 Füzetek*, 32, 62-77.

- Páldy, A., Bobvos, J., Vámos, A., Kovats, R.S., Hajat, S., 2005: The effect of temperature and heat waves on daily mortality in Budapest, Hungary, 1970-2000. In: Extreme weather events and public health responses (W. Kirch, B. Menne and R. Bertollini, Eds.), WHO, Springer, 99-108.
- Pieczka, I., Bartholy, J., Pongrácz, R., Hunyady, A., 2009: Climate change scenarios for Hungary based on numerical simulations with a dynamical climate model. Lecture Notes in Computer Science, 5910, pp. 613–620.
- Robinson, P. J., 2001: On the Definition of a Heat Wave. *Journal of Applied Meteorology*, 40, 762-775.
- Semenza, J.C., McCullough, J.E., Flanders, W.D., McGeehin, M.A., Lumpkin, J.R., 1999: Excess hospital admissions during the July 1995 heatwave in Chicago. *Am. J. Prev. Med.* 16, 269-277.
- Sheridan, S.C., Kalkstein, L.S., 2004: Progress in Heat Watch-Warning System Technology. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 12, 1931-1941.
- Smoyer, K.E., 1998: Putting risk in its place: methodological considerations for investigating extreme event health risk. *Soc Sci Med* 47, 1809-1824.
- Thommen Dombois, O., 2005: Direkte und indirekte Auswirkungen der Klimaänderung auf die Gesundheit. Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Basel. 32p.

Köszönetnyilvánítás

A dolgozat elkészítéséhez felhasznált PRECIS modell adaptálását és a szimulációk elkészítését az alábbi pályázatok támogatták: az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával az "Európai Léptékkkel a Tudásért, ELTE-TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. A felsőoktatás minőségének javítása a kutatás-fejlesztés-innováció-oktatás fejlesztésén keresztül" pályázat, az OTKA T-049824 és K-78125 számú pályázata, az NKFP-3A/0082/2004 és az NKFP-6/079/2005 pályázat, a Nemzeti Fejlesztési (korábban Környezetvédelmi és Vízügyi) Minisztérium, az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CCWATERS projekt (SEE/A/022/2.1/X), az SH/2/1 számú svájci-magyar közös kutatási program keretében megvalósuló Felső-Tisza árvízmelegelőzési rendszer fejlesztési projektje, valamint az MTA TKI Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz című (2006/TKI/246) programja.

Köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőmnek, Pongrácz Ritának, mivel a sorozatos nehézségek során tanúsított segítőkészsége nélkül ez a dolgozat nem születhetett volna meg.

Továbbá köszönet illeti Pieczka Ildikót a rám áldozott időért és önzetlen segítségéért.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm családom támogatását és barátaimnak, hogy nagy türelemmel és megértéssel viselték, ha a tanulmányaim során, munkáim miatt időről-időre háttérbe szorultak.