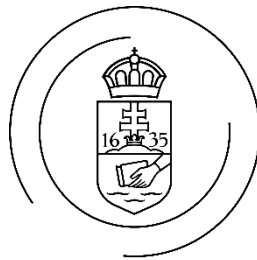


Extrém hőmérsékleti viszonyok várható változása a 21. század végére zonális irányú európai metszeteken az SSP-szenáriók függvényében

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK III. ÉV
METEOROLÓGIA SPECIALIZÁCIÓ



ELTE

Készítette:
Divinszki Ferenc Tamás

Témavezetők:
dr. Kis Anna
dr. Pongrácz Rita
ELTE TTK FFI, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2024

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Adatok, módszertan	4
3. Eredmények	9
3.1. Forró napok száma (TX35)	9
3.1.1. Elemzés az é.sz. 37,5° metszetre	9
3.1.2. Elemzés az é.sz. 42,5° metszetre	13
3.1.3. Elemzés az é.sz. 47,5° metszetre	17
3.1.4. Elemzés az é.sz. 52,5° és 57,5° metszetekre	21
3.2. Fagyos napok száma (FD)	23
3.2.1. Elemzés az é.sz. 42,5° metszetre	24
3.2.2. Elemzés az é.sz. 47,5° metszetre	28
3.2.3. Elemzés az é.sz. 52,5° metszetre	33
3.2.4. Elemzés az é.sz. 57,5° metszetre	36
3.2.5. Elemzés az é.sz. 62,5° metszetre	38
4. Összefoglalás	43
Irodalomjegyzék	45
Függelék	48

1. Bevezetés

Az egyre intenzívebbé váló globális felmelegedés hatására a kutatások középpontjában napjainkra a mitigáció mellett már az adaptációs lehetőségek felmérése is kulcskérdéssé vált (Lesnikowski et al. 2016, Rojas-Downing et al. 2017, Tan-Soo et al. 2024, Eyring et al. 2024). Sőt, az egyre súlyosabb extrém időjárási jelenségek társadalmi–gazdasági hatásaira már ma is fontos felkészülni, hiszen ezek az események egyre gyakrabban nehezítik meg az életünket. 2024. július 22-e a legmelegebb nap lett a Földön a mérések kezdete óta, a globális átlaghőmérséklet elérte a 17,16 °C-ot (C3S¹ 2024). Emellett a dolgozat megírásának pillanatában 2023 volt a valaha mért legmelegebb év, ekkor a globális átlaghőmérséklet 1,45 °C-kal haladta meg az ipari forradalom előtti átlaghőmérsékletet (WMO 2024).

A kutatásunk során extrém hőmérsékleti indexek várható változását vizsgáltuk a legújabb SSP-szenáriók alapján európai szélességi metszetekre. A téma széleskörűen érintett a szakirodalomban, különös tekintettel a magas hőmérsékletekre és ezekkel járó hőhullámokra. A mediterrán területekre vonatkozóan Cardil et al. (2014) a 850 hPa-os légnyomási szint hőmérsékletének változását, illetve a magas hőmérsékletű napok (HTD) számának növekedését vizsgálták, és felhívták a figyelmet a hőhullámok elleni védekezés fontosságára. Hasonlóan múltbeli állomási adatsorokkal dolgozott Lorenz et al. (2019), illetve Sulikowska & Wypych (2021) cikkükben, validálva az EURO-CORDEX szimulációk eredményeit is. Végül, Engdaw et al. (2023) széleskörű elemzést adnak mind hideg, mind meleg hőmérsékleti extrémek múltbeli trendjeiről, globális adatok feldolgozásával. Ezek alapján Európában jelentős változás látszik mind a meleg-, mind a hideg hőmérsékleti extrémek gyakoriságában.

A jövőbeni projekciók feldolgozása is kiemelt szerepet kap a nemzetközi szakirodalomban. Dosio (2016) még az EURO-CORDEX szimulációk hibakorrigált és hibakorrigálás nélküli eredményeit hasonlította össze, konklúzióként felhívva a figyelmet a hibakorrigált adatok használatára. A CMIP6 adatbázis megjelenésével és elterjedésével azonban előtérbe kerültek a legfrissebb adatok (melyeket ebben a dolgozatban is használtunk) felhasználásával készült publikációk. Palmer et al. (2021) és Kreinekamp et al. (2020) a CMIP5 és CMIP6 szimulációit hasonlították össze, ezek a vizsgálatok azt jelzik, hogy a CMIP6 szimulációk alapján még a CMIP5-höz képest is erősebb felmelegedésre lehet számítani Közép-Európában, illetve a mediterrán térségben. Ishizaki et al. (2022) szintén erre az eredményre jutottak Japánra készült elemzésükben, mely számunkra azért volt különösen jelentős, mivel a kutatók az általunk is használt TX35 index változásait is elemezték. Eredményeik az extrém

¹ C3S: Copernicus Climate Change Services

hőhullámok növekvő veszélyeire hívták fel a figyelmet. Fan et al. (2020), Srivastava et al. (2024) és Alvarez et al. (2024) ezzel szemben már csak a CMIP6 szimulációk eredményeit használták fel elemzéseikben, melyek közül Alvarez et al. (2024) kifejezetten a hőhullámokat és szárazságot jellemző ún. Heat Indexet (HI) vizsgálták, míg Srivastava et al. (2024) a hidroklimatológiai hatásokat helyezték előtérbe. A rendelkezésre álló scenáriók közül előbbiek mindössze kettőt, míg utóbbiak egyet használtak, azonban Fan et al. (2020) eredményei alapján látható, hogy kiemelten fontos a lehetséges jövőbeli éghajlati viszonyok minél széleskörűbb lefedése.

Az éghajlati indexek (vagy speciálisan erre a célra kifejlesztett hőségindexek) mellett lehetséges más módszertant is alkalmazni a hőmérsékleti viszonyok jellemzésére. Eszerint egy kiválasztott időszak helyett egy adott mértékű globális átlaghőmérséklet-növekedés (jellemzően 1,5 °C, 2 °C) elérésének pillanatában vizsgálják a hőmérséklet területi eloszlását. Ezt a módszert alkalmazza Wobus et al. (2018), Tebaldi & Knutti (2018), illetve King et al. (2018), akik még kizárólag az RCP scenáriók felhasználásával készítették el elemzéseiket. Eredményeikben például az RCP2.6 és RCP4.5 scenáriók közötti lineáris kapcsolatot tárták fel.

Ezek a kutatások azért is fontosak, mert az extrém hőmérsékletek számos társadalmi-gazdasági szektorban súlyos károkat okoztak. A hőhullámokhoz köthető halálozás becslések szerint 2023-ban elérte a 40000 főt, ami a második legnagyobb szám 2022 óta (Gallo et al. 2024). Sőt, Lüthi et al. (2023) kutatásai szerint még ennél is súlyosabbá válhat a helyzet a 21. század további részében, a növekvő számú és növekvő intenzitású hőhullámok hatására. Emellett a mezőgazdaságban akár ellátási problémákat is okozhatnak a szaporodó extrém időjárási események (Cogato et al. 2019), továbbá az energiaszektor kitettsége is jelentős (Schaeffer et al. 2012).

Mindezek bizonyítják, miért fontos már most lehetséges adaptációs stratégiák kidolgozása (Cano Pecharroman & Hahn 2024, Lee et al. 2021), melyek ellenőrzött meteorológiai adatsorokon és modern klímamodellek projekcióin alapulnak. Ebben a kutatásban a meleg és hideg extrém hőmérsékletek változásának vizsgálatát tűztük ki célunknak Európára vonatkozóan a legújabb klímamodell-eredmények alapján, magyarországi kitekintéssel. A korábbi Tudományos Diákköri Dolgozatom (Divinszki, 2023) alapjaiból kiindulva, azt megújítva és továbbfejlesztve három fő kérdés megválaszolására építettük fel munkánkat. Először is bemutatjuk az extrém hőmérsékleti viszonyokat, területi mintázatokat, melyek a kontinenst jellemzik. Másodszor célunk volt a várható változások elemzése, illetve a

szcenáriók szerepének feltárása ezen változásokban. Harmadszor azt vizsgáltuk, hogy mely földrajzi hatások jelentősek a változások mértékének formálásában a kontinens különböző részein.

2. Adatok, módszertan

Mióta az ENSZ Környezetvédelmi Programja és a Meteorológiai Világszervezet 1988-ban megalapította az Éghajlatváltozási Kormányközi Testületet (Beck & Mahony 2018), a szervezet által rendszeresen kiadott értékelő jelentések a klímaváltozás kutatásának sarokköveinek számítanak. A legfrissebb, 2021–2022-es hatodik jelentést már a CMIP6 modellszimulációs adatbázis segítségével készítették el, melyben a lehetséges forgatókönyveket az SSP²-k (Riahi et al. 2017) és a korábban, az ötödik jelentés (Taylor et al. 2012) során használt RCP³-k (van Vuuren et al. 2011) párosításával adták meg. Az adatokat és a scenáriókat, a korábbi jelentések adatbázisai mellett, az újdonságnak számító Interaktív Atlaszban (IA) gyűjtötték össze (Gutierrez et al. 2021). Az atlasz bővebb bemutatása elérhető Divinsky et al. (2024) cikkében, jelen dolgozatban annak egy rövid összefoglalója szerepel a legfontosabb információkkal.

Az IA az adatokat táblázatokba és diagramokba rendezi a közérthető térképes megjelenítés mellett, így az eredmények több szempontból is jól összehasonlíthatók. Sajnos az összehasonlítás lehetséges szempontjai korlátozottak az internetes felületen, de az adatok letöltésével saját vizsgálatok is végezhetők. Ennek viszont számos lehetőségét biztosították az atlasz készítői: a CMIP5⁴, CMIP6⁵ és CORDEX⁶ nemzetközi programok (Jacob et al. 2014) adatbázisaiban szereplő modellszimulációk, illetve az ezekhez tartozó RCP- és SSP-szenáriók mellett méréseken alapuló adatbázisok (például E-OBS⁷ vagy CRU TS⁸) is elérhetőek. Az eredmények három jövőbeli időszakra (2021–2040, 2041–2060 és 2081–2100) is letölthetők és több referencia-időszakkal (1850–1900, 1961–1990, 1981–2010, 1986–2005 és 1995–2014) összehasonlíthatók. Szintén hasznos, hogy akár havi bontásban is elérhetőek az adatok.

² Shared Socioeconomic Pathways: közös társadalmi-gazdasági útvonalak

³ Representative Concentration Pathways: reprezentatív koncentráció menetek

⁴ Coupled Model Intercomparison Project Phase 5: csatolt modellek összehasonlító projekt 5. fázisa

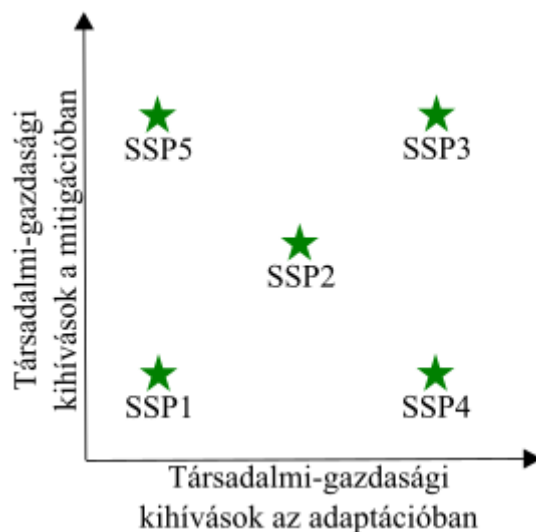
⁵ Coupled Model Intercomparison Project Phase 6: csatolt modellek összehasonlító projekt 6. fázisa

⁶ Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment: összehangolt regionális leskálázási program

⁷ European Observations: európai megfigyelések

⁸ Climatic Research Unit gridded Time Series: éghajlatkutatási csoport rácsponti idősorai

Kutatásunkban az IA felületén elérhető CMIP6 adatbázist használtuk fel (Eyring et al. 2016). Az adatbázisban szereplő modellekhez tartozó forgatókönyveket a korábbi RCP-szenáriókkal párosított SSP-szenáriók adták. Az SSP1-2.6, ahogy a nevében is benne van, az RCP2.6 koncentrációs meneteit használja fel, az SSP2-4.5 az RCP4.5-tel állítható párba, míg az RCP8.5, a jelenlegi trendek folytatódását feltételező szenárió, az SSP5-8.5-ben jelenik meg. Ezek mellett egy, a korábban használt RCP-ktől eltérő sugárzásikényszer-változással számoló szenárióval, az RCP7.0-val végzett szimulációk is szerepelnek az adatbázisban az SSP3-7.0 keretében. Az 1. ábrán jól látható a felhasznált szenáriók mellett az is, hogy miben tér el az új forgatókönyv-generáció a régi RCP-szenárióktól. Míg utóbbiak az üvegházhatás alakulásában kritikus gázok várható légköri koncentrációját, és elsősorban annak változását adják meg, addig az SSP-szenáriók a kvantitatív adatok mellett a számokkal nehezebben kifejezhető, kvalitatív változásokat is igyekeznek számításba venni (O'Neill et al. 2017). Így az SSP-k elsősorban a jövőbeni mitigációra és adaptációra vonatkozó projekciókat tartalmazzák, az ez alapján végzett csoportosítás is leolvasható az 1. ábráról.



1. ábra: Az SSP-szenáriók csoportosítása a mitigációs és adaptációs kihívások alapján
(forrás: O'Neill et al. 2017)

Az SSP1-2.6 szenárió esetén mind a mitigáció, mind az adaptáció jelentős, a társadalmi egyenlőtlenségek csökkennek, a nemzetközi együttműködés megerősödik, a fejlett és fejlődő országok közötti olló fokozatosan záródik. Előbbinek hála az országok többsége a megújuló energiaforrások felé fordul, így a fosszilis energiahordozók visszaszorítása (mitigáció) nem jelent nagy kihívást. Az oktatásba, egészségügybe történő befektetések és így az emberek egészségi állapotának javulása pedig az adaptációs kihívásokat csökkenti. Ezt a szenáriót a

fenntartható fejlődéssel lehetne jellemezni, gyakran „zöldutas” forgatókönyvként is emlegetik (O’Neill et al. 2017; Riahi et al. 2017).

Az SSP2-4.5 az 1. ábra közepén helyezkedik el, látható, hogy közepes kihívások várhatóak mind az adaptáció, mind a mitigáció területén, amennyiben ez következne be. Ennek oka, hogy az SSP1-2.6-hoz képest lassabb változásokat feltételez. Ilyen például az országok közti különbségek lassabb csökkenése vagy a fosszilis energiahordozók használatának fokozatos mérséklése a radikálisabb változások helyett. Mint ilyen, követi az elmúlt évszázadban tapasztalt tendenciákat, amelyek afelé mutatnak, hogy ritkán következnek be olyan gyors változtatások, melyek például az SSP1-2.6 megvalósulásához lennének szükségesek. Általában „középutas” scénárióként is hivatkozhatunk rá (O’Neill et al. 2017).

Az SSP3-7.0 scénárió esetén mind az adaptáció, mind a mitigáció terén jelentős nehézségekre kell számítanunk. A nemzetközi együttműködés háttérbe szorul, az országok a lokális és regionális ügyek megoldása mellett nem koncentrálnak a globális problémákra. A fejlett és fejlődő országok közti különbségek tovább nőnek, mélyszegénységben élő térségek alakulnak ki. Az oktatásba, egészségügybe és kutatás-fejlesztésbe fektetett tőke csökken. Mindez azt eredményezi, hogy a mitigációhoz szükséges együttműködés és technológiai fejlettség hiánya ezen forgatókönyv esetén fogja a leginkább éreztetni hatását. A szegénységben élő területeken pedig az alkalmazkodóképesség is alacsony lesz. A szakirodalomban a regionális rivalizáció mellett „rögös útként” is hivatkoznak rá (O’Neill et al. 2017).

Az SSP5-8.5 scénárió a legmagasabb sugárzási kényszer változással számoló scénárió, vagyis a mitigációs kihívások ugyan magasak, ám az SSP1-hez hasonlóan sikeresebb adaptációt vetít előre, mely a technológiai fejlettséggel köthető össze. Ezt a fejlettséget azonban a fosszilis energiahordozók szinte korlátlan használatával érik el az országok, ami pedig kiegészítve a környezetvédelmi törekvések háttérbe szorulásával azt eredményezi, hogy a világnak jelentős mitigációs problémákkal kellene szembenéznie ezen scénárió bekövetkezése esetén. A forgatókönyvet gyakran illetik a „fosszilis fejlődés” kifejezéssel (O’Neill et al. 2017).

Végül az SSP4-6.0 scénárió a növekvő globális egyenlőtlenségeket vetíti előre, mely a sikeres mitigáció melletti elégtelen adaptációból adódik. Az IA-ban azonban ez nem szerepel, így ezzel a forgatókönyvvel ebben a dolgozatban nem számoltunk.

Az IA felületén található globális modellek ezen forgatókönyveket alkalmazzák, és az SSP3-7.0-t kivéve mindegyik összehasonlítható egy-egy, korábban önmagában alkalmazott RCP-szenárióval is. Az SSP3-7.0 szerepe különösen fontos, hiszen a korábbi RCP-khez képest új elem a klímakutatásban (a $4,5 \text{ W/m}^2$, illetve $8,5 \text{ W/m}^2$ sugárzásikényszer-változás között egy átmenetet képez, így nem alakul ki akkora különbség két szenárió között, mint az RCP4.5 és RCP8.5 esetében).

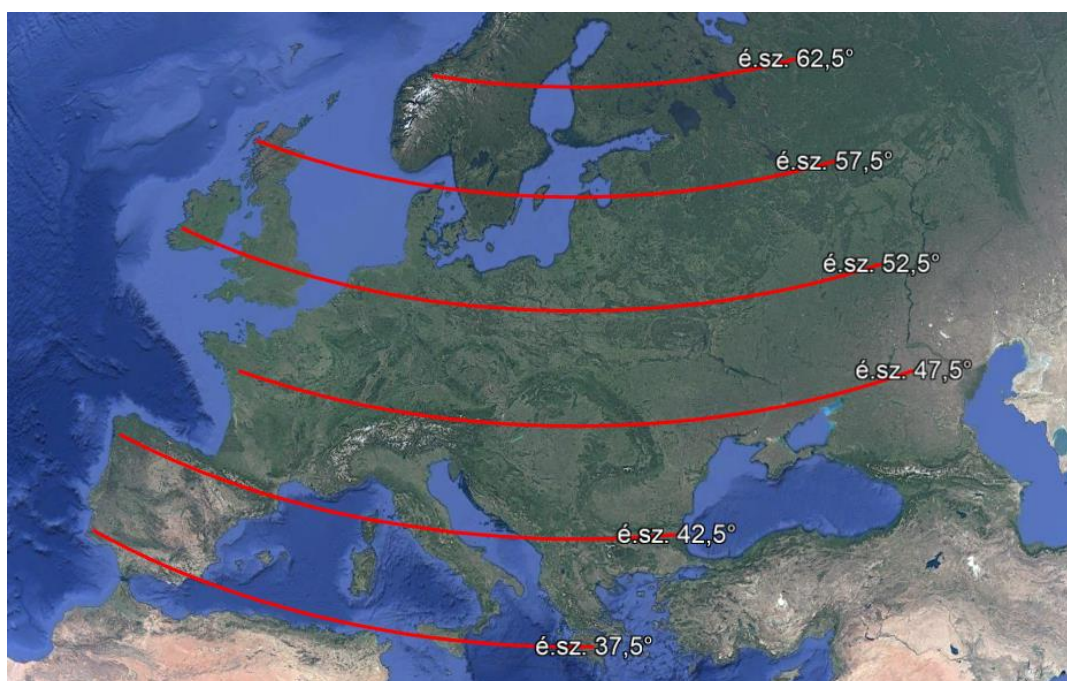
Ezen négy szenárió segítségével két extrém hőmérsékleti változó várható alakulását vizsgáltuk: a forró napok számára (TX35: $T_{\max} > 35^\circ\text{C}$) és a fagyos napok számára (FD: $T_{\min} < 0^\circ\text{C}$) esett választásunk, melyek használatával a forrósággal, illetve a hideggel kapcsolatos hőmérsékleti extrémumok vizsgálatára nyílt lehetőség.

Jelen kutatásban a hosszútávú (2081–2100), ún. multi-modell átlagokat elemeztük havi bontásban, de eltérő hónapokban a két indexre: a TX35 esetén májustól szeptemberig, míg az FD esetén októbertől áprilisig. Az extrémumok éves változását, illetve éven belüli előfordulását is tudtuk vizsgálni. A rendelkezésre álló referencia-időszakok közül az 1995–2014-es, a jelenhez legközelebbi időszakot választottuk, mivel a CMIP6 keretében futtatott, különböző szenáriókat alkalmazó szimulációk 2015-ben kezdődnek.

A havi adatok vizsgálata a már említett multi-modell átlagok letöltésével lehetséges, ezek $1^\circ \times 1^\circ$ -os rácshálózaton állnak rendelkezésünkre, a felhasznált modelleket az F1. táblázat tartalmazza. Mivel célunk volt az európai hőmérsékleti viszonyokat és azoknak változásait minél nagyobb területi lefedettséggel vizsgálni, 5+1 szélességi kört választottunk ki, egymástól 5° -os távolságra, amelyek közül egy áthalad Magyarországon is. A metszetek határait az adott szélesség mentén vett szárazföldi határok definiálják. Az így kiválasztott szélességi metszetekbe eső rácspontok meghatározása után a letöltött, globális klímamodell-szimulációkból származó adatokat ezen pontokra szűkítettük, emellett külön elkészült a teljes európai kontinens lehatárolása is. Az egyes metszetek esetén előálló rácspontok számát az 1. táblázat tartalmazza, míg a metszetek területi elhelyezkedését a 2. ábra mutatja be.

1. táblázat: A szélességi metszetek határai és rácspontjaik száma

Szélességi metszet	Határok koordinátái	Rácspontok száma
é.sz. $37,5^\circ$	ny.h. $8,5^\circ$ –k.h. $22,5^\circ$	32
é.sz. $42,5^\circ$	ny.h. $8,5^\circ$ –k.h. $27,5^\circ$	37
é.sz. $47,5^\circ$	ny.h. $1,5^\circ$ –k.h. $44,5^\circ$	47
é.sz. $52,5^\circ$	ny.h. $9,5^\circ$ –k.h. $44,5^\circ$	55
é.sz. $57,5^\circ$	ny.h. $6,5^\circ$ –k.h. $43,5^\circ$	51
é.sz. $62,5^\circ$	k.h. $7,5^\circ$ –k.h. $43,5^\circ$	37



2. ábra: A vizsgált szélességi metszetek elhelyezkedése Európában

A vizsgálatunk alapvetően három aspektusra irányult: (1) az észak-déli, illetve kelet-nyugati elhelyezkedésből (kontinentalitás) fakadó területi különbségek, (2) a domborzat módosító hatásának, és (3) az eltérő mértékű antropogén kibocsátás okozta eltérések elemzésére. Ennek megfelelően három különböző típusú ábrát készítettünk eredményeink bemutatására: (1) Előállítottuk az egyes scenáriók havi nyugat-keleti metszeteit ábrázoló diagramokat, melyek háttérben szürke színezéssel az adott rácspontra jellemző domborzatot jelenítettük meg. Ez a diagramtípus teszi lehetővé a kontinentalitás, illetve az óceántól való távolság okozta különbségek bemutatását. (2) Elkészítettük a metszéspontokra meghatározott projekciók domborzat szerinti eloszlását, hogy a tengerszint feletti magasság módosító hatását vizsgálhassuk. (3) A három magasabb sugárzási kényszerrel számoló SSP-scenárióra (SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5) kapott várható változásokat hasonlítottuk a legkisebb kényszerrel számoló, fenntarthatónak tekinthető SSP1-2.6 projekcióihoz, így ismertetve a különböző, antropogén kibocsátások által irányított forgatókönyvek eredményeit. Az ábrákat, illetve a részletes elemzéseket a következő fejezetben mutatom be, kivéve a TX35 esetén az é.sz. 62,5°-os, illetve az FD esetén az é.sz. 37,5°-os metszetet. Ennek oka, hogy bár az elemzésünk során megvizsgáltuk ezeket a területeket is, de az adott index esetén mutatott változások elhanyagolhatónak bizonyultak, még a legnagyobb sugárzási kényszerrel számoló SSP5-8.5 forgatókönyv esetén is.

3. Eredmények

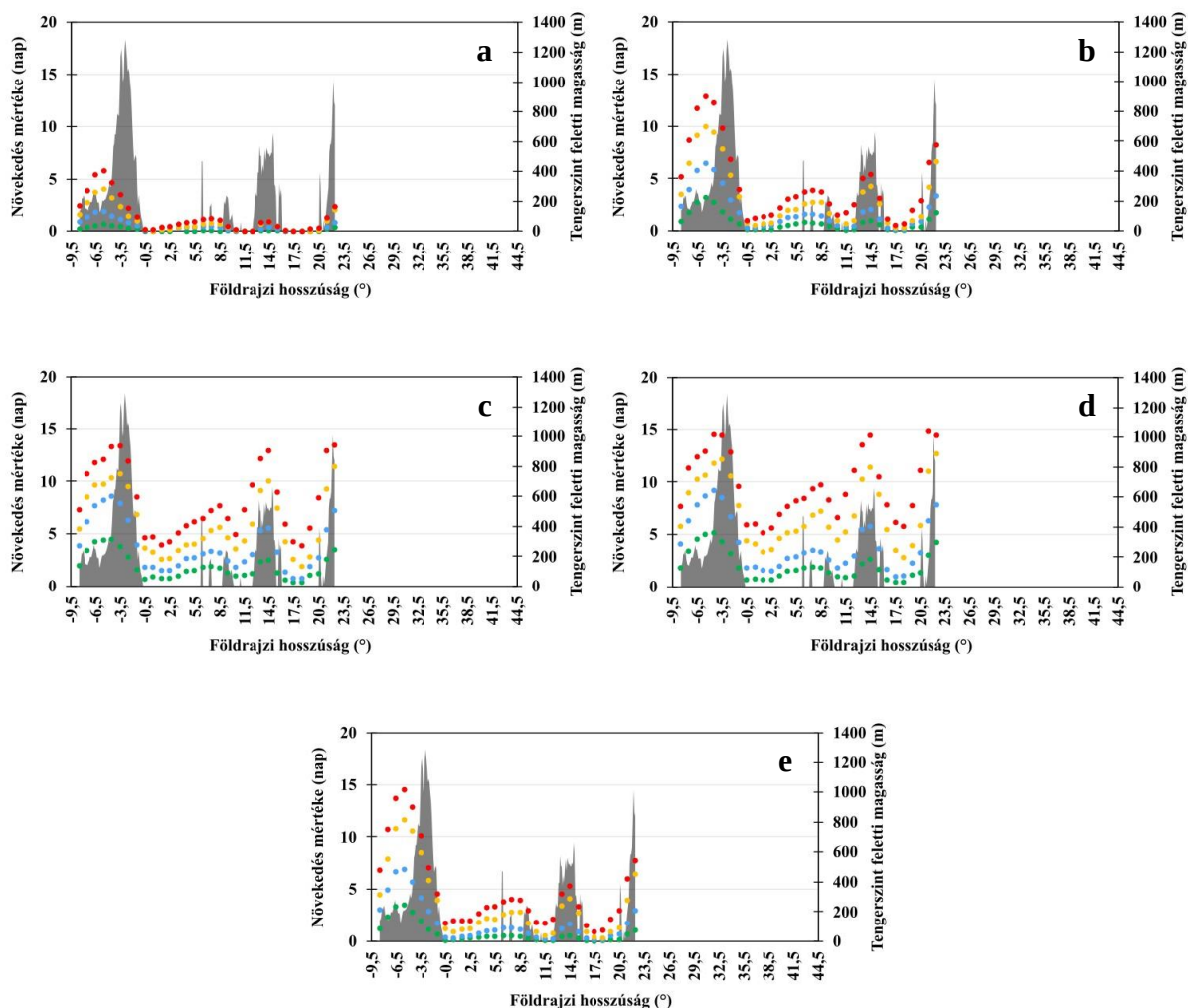
Az eredményeinket két fő alfejezetre osztva mutatjuk be: az első alfejezetben a forró napok számának várható változását mutatjuk be, míg a második alfejezetben a fagyos napok számának várható változását vizsgáljuk öt szélességi metszeten. Az alfejezeteken belül az egyes metszeteket délről észak felé haladva érintjük.

3.1. Forró napok száma (TX35)

A forró napok számának változását az öt délebben fekvő metszet esetén mutatjuk be (vagyis az é.sz. 37,5°, é.sz. 42,5°, é.sz. 47,5°, é.sz. 52,5° és é.sz. 57,5° mentén), a májustól szeptemberig tartó időszakra. Az é.sz. 62,5°-os metszet esetén ugyanis a maximális változás egy adott rácspontra 1,27 nap, míg a projekciók mediánja 0,02 nap, ezek az értékek pedig szinte elhanyagolhatóak a többi metszethez képest.

3.1.1. Elemzés az é.sz. 37,5° metszetre

Az é.sz. 37,5°-os metszet elhelyezkedését tekintve az Ibériai-félsziget déli részét, Szicíliát és a Peloponnészoszi-félszigetet érinti, ezzel az összes vizsgált metszet közül itt találhatók a legkisebb arányban szárazföldek (3. ábra). A referencia-időszak adatai alapján (F1. ábra) a terület már ekkor kitett volt az extrém magas hőmérsékleteknek, és a projekciók alapján a forró napok számának további növekedése várható. Ez a változás azonban Európa-szerte nem tekinthető a legjelentősebbnek, ennek éppen az az oka, hogy a forró napok havi száma – a már korábban tapasztalt magas értékek miatt – nem tud olyan mértékben nőni, mint más, északabbra elhelyezkedő területeken. A növekedés ennek ellenére jelentős, főként júliustól szeptemberig (3.c, d, e ábra), amikor a szárazföldi rácspontok felett akár 30–50%-os is lehet a relatív változás, sőt, akár a 80%-ot is elérheti az SSP5-8.5 esetén. Ez a melegedés sokkal jelentősebb, mint a tengerfelszín feletti rácspontok esetén, ami miatt a szárazföldi és vízfelszín közötti gradiens növekszik. Ez a referencia-időszakban is tapasztalt különbségeket tovább erősíti, miszerint a szárazföldi felszín sokkal jobban kitett az extrém hőmérsékleteknek, mint a vízfelszín.



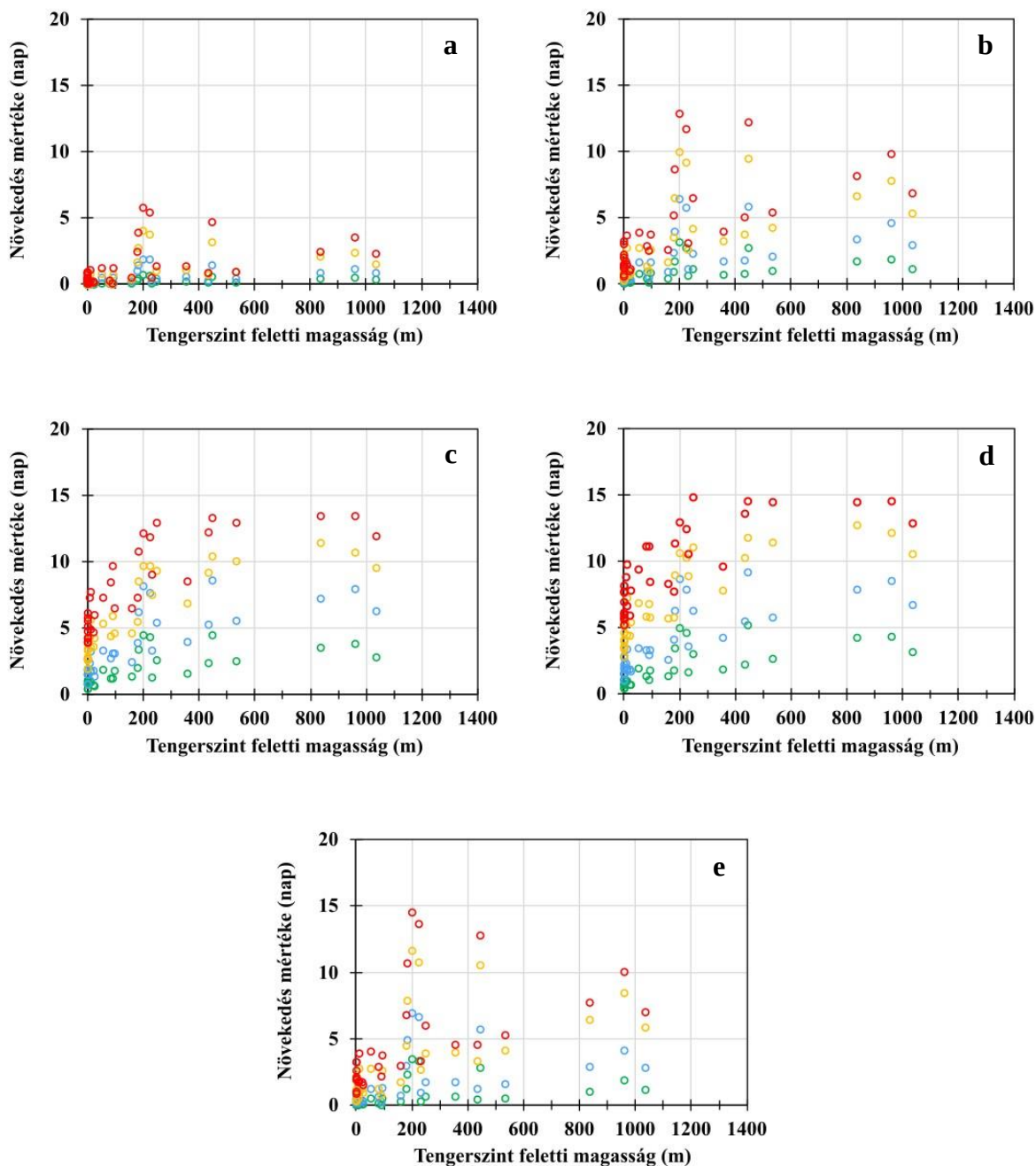
3. ábra: A forró napok számának várható havi változása a 2081–2100 időszakra a négy SSP-szcenário alapján az é.sz. 37,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

● SSP1-2.6 ● SSP2-4.5 ● SSP3-7.0 ● SSP5-8.5

A tengertől való távolság mellett várakozásaink szerint a domborzat is fontos éghajlatalakító tényező lehet, mivel egyes rácspontok tengerszint feletti magassága elérheti az 1200 m-t is. Ennek ellenére a viszonylagosan nagy átlagmagasság ellenére a 4. ábrán nem jelenik meg a domborzati hatás, a három lokális maximumhoz köthető növekedés azonos, hiába nő a tengerszint feletti magassága a pontoknak. A három maximum a 3. ábrával összevetve a három nagyobb szárazföldi területhez köthető, vagyis növekvő sorrendben Szicíliához (200-300 m), a Peloponnészoszi-félszigethez (400-600 m) és az Ibériai-félszigethez (800-1000 m), míg a minimális értékek rendre a tengerfelszíni pontokhoz (~0 m) kapcsolhatók. A domborzati hatás hiánya elsősorban a közeli vízfelszínnek jóval erősebb mérséklő hatásának köszönhető, mely elnyomja az eltérő magasságból fakadó különbségeket, és kiemeli a felszíntípusból

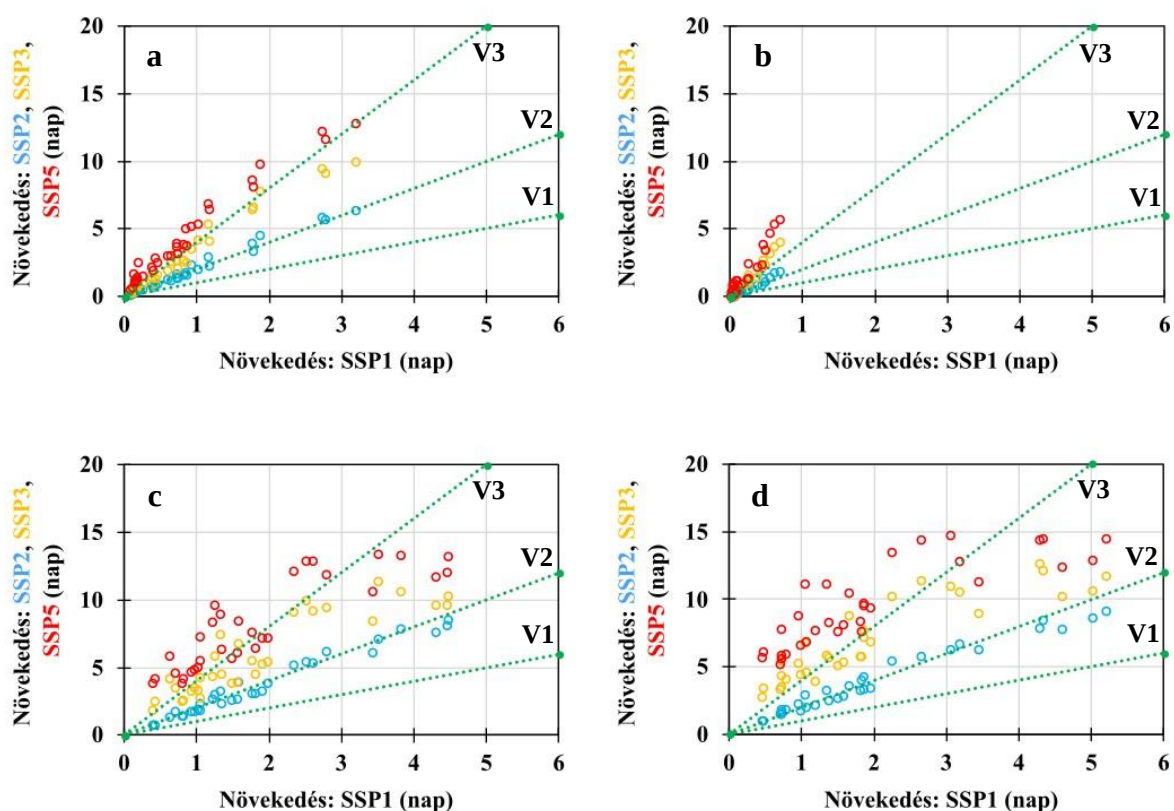
származó eltéréseket, főként júniusban és szeptemberben (4.b és 4.e ábra). Számokban kifejezve, a szeptemberben kialakuló különbség szárazföldek és vízfelszínek felett körülbelül 10 nap, míg júliusban és augusztusban kevesebb mint 5 nap.

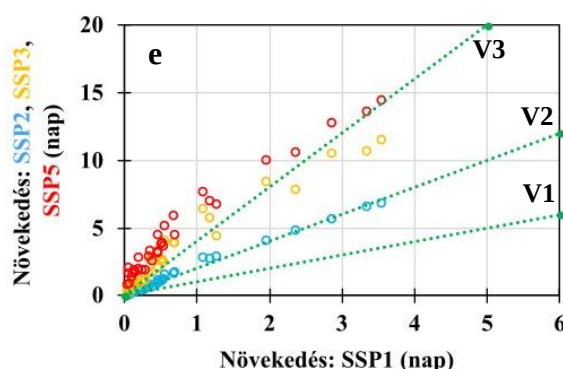


4. ábra: A forró napok számának várható havi változása tengersizint feletti magasságuk alapján a 2081–2100 időszakra az é.sz. 37,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

Utolsó elemzési szempontként az 5. ábrán láthatóak az eltérő scenáriók okozta lehetséges különbségek az SSP1-2.6-hoz viszonyítva. Ezeket a pontthalmazokat elsősorban a rájuk illeszthető $y = m \cdot x$ lineáris regressziós egyenesek m meredekségi együtthatójával tudtuk jellemezni. Minél nagyobb az m értéke, annál nagyobb mértékű a különböző antropogén hatások okozta eltérés. A legnagyobb együtthatók: májusban 2,5, 5,5 és 7,7 rendre az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 scenáriókra, míg a legkisebb együtthatók augusztusban jellemzőek (5.d ábra), ekkor 2 alá csökkennek a regressziós koefficiensek. Ennek az az oka, hogy a szárazföldi és a tengeri rácsponatok szétválnak, és ezekre eltérő meredekségű egyenesek illeszthetők. A vízfelszínekre ugyanis nagyobb együtthatókat kapunk ($m = 2,8$ az SSP3-7.0 és $m = 3,1$ az SSP5-8.5 szerint), míg a szárazföldi rácsponatokra csak 1 körülieket ($m = 1,1$ és $1,08$ a két kiemelt scenárióra). Ennek a különbségnek a háttérében a referencia-időszakban a szárazföldeken tapasztalt eleve nagy TX35-értékek állnak, amik miatt augusztusban már nem tud akkora növekedés kialakulni a nagyobb sugárzási kényszer hatására, mint a vízfelszínek felett.





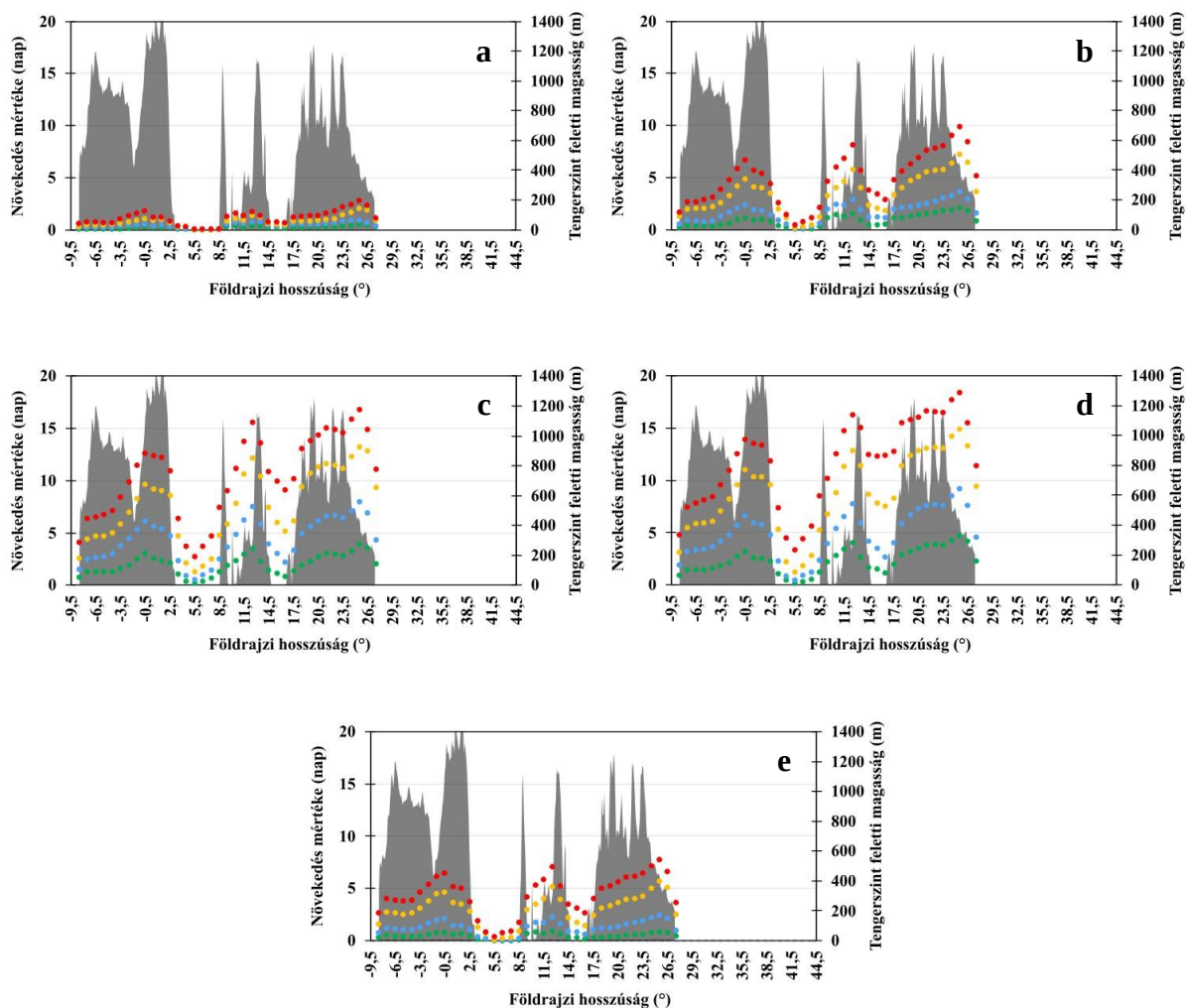
5. ábra: A forró napok számának 2081–2100 időszakra várható havi változására az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 scenárióra kapott értékek az SSP1-2.6 forgatókönyvre kapott értékek függvényében az é.sz. 37,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

V1: $1 \cdot \text{SSP1}$, V2: $2 \cdot \text{SSP1}$, V3: $4 \cdot \text{SSP1}$

3.1.2. Elemzés az é.sz. 42,5° metszetre

Az é.sz. 42,5°-os metszet (6. ábra) az Ibériai-félsziget északi részét, Olaszországot és a Balkánt érinti, több szárazföldi rácsponttal, mint az é.sz. 37,5°-os metszet esetén. Lévé, hogy továbbra is Dél-Európa térségében maradtunk, jelentős növekedést vártunk vizsgálatunk előtt is a havi TX35 értékében, amit a projekciók valóban alátámasztanak. Sőt, elmondható, hogy az általunk vizsgált területek közül a legnagyobb mértékű növekedést erre a területre adják a szimulációk, augusztusban (6.c ábra) az é.sz. 42,5° k.h. 25,5°-os rácspontra a havi növekedés meghaladta a 18 napot, ez a legnagyobb érték a vizsgálatban szereplő összes szélességi metszetet figyelembe véve. A szárazföldi és tengeri rácspontok közötti jelentős különbséget jól mutatja, hogy ugyanebben a hónapban, ugyanezen a metszeten, és ugyanarra a scenárióra (SSP5-8.5), de a k.h. 5,5°-án a multimodell-átlag 3,3 napos növekedést becsül. Ezzel szemben a legalacsonyabb sugárzási kényszerrel számoló, SSP1-2.6 scenárió esetén jóval kevésbé hangsúlyosak a területi különbségek, ez esetben ugyanis a várható változás két rácspont közti különbsége kevesebb, mint 4 nap. A felszínborítottság mellett megjelenő másik éghajlatalkító-tényező az erősödő kontinentális hatás is nyugatról kelet felé jelentkezik, elsősorban a nyári hónapokban.



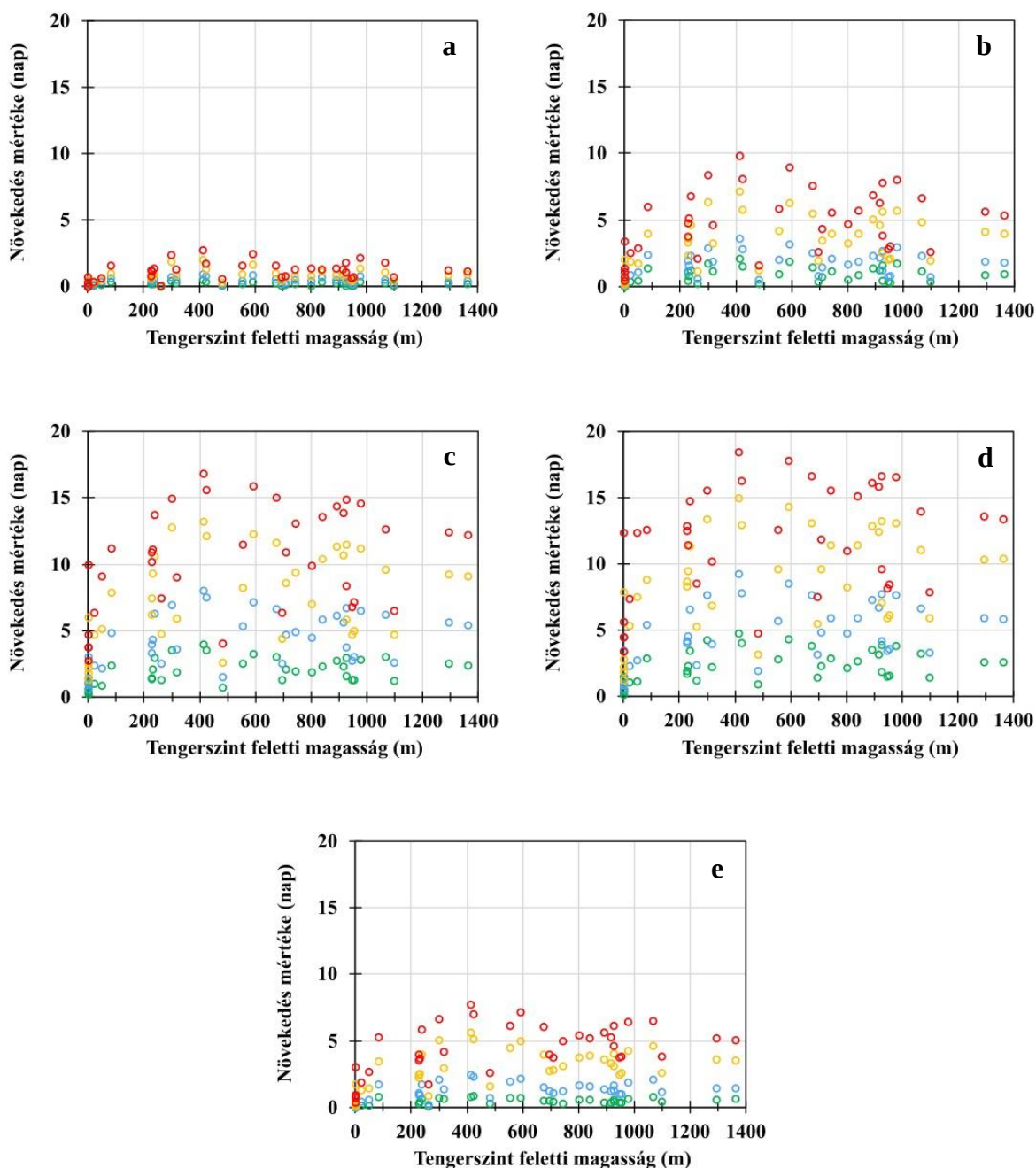
6. ábra: A forró napok számának várható havi változása a 2081–2100 időszakra a négy SSP-szcenárió alapján az é.sz. 42,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

● SSP1-2.6 ● SSP2-4.5 ● SSP3-7.0 ● SSP5-8.5

A metszet változatos felszínnel rendelkezik, az é.sz. 37,5°-os metszettel szemben 0 m-től 1400 m-ig szinte bármilyen átlagmagasságú felszínnel találkozhatunk (7. ábra). A domborzati hatás elsősorban az 1300 m feletti magasságú területeken érvényesül, ahol a növekedés mértékében egy lokális minimum alakul ki. 1300 m alatt azonban nem alakul ki egyértelmű hűtő hatás a tengerszint feletti magasság növekedésével. Az abszolút legnagyobb növekedés körülbelül 400 m-es tengerszint feletti magasság körül mutatkozik, míg az abszolút legalacsonyabb növekedés a vízfelszínhez köthető. Kiemelendő még, hogy az eltérő szcenáriók várható változásai hasonló térbeli eloszlást mutatnak, a különbség köztük az, hogy amelyek kisebb sugárzási kényszert (és így kisebb növekedést) vetítenek előre, vagyis az SSP1-2.6 és az SSP2-4.5, kevésbé jelzik a domborzati hatást, mint a nagyobb sugárzási

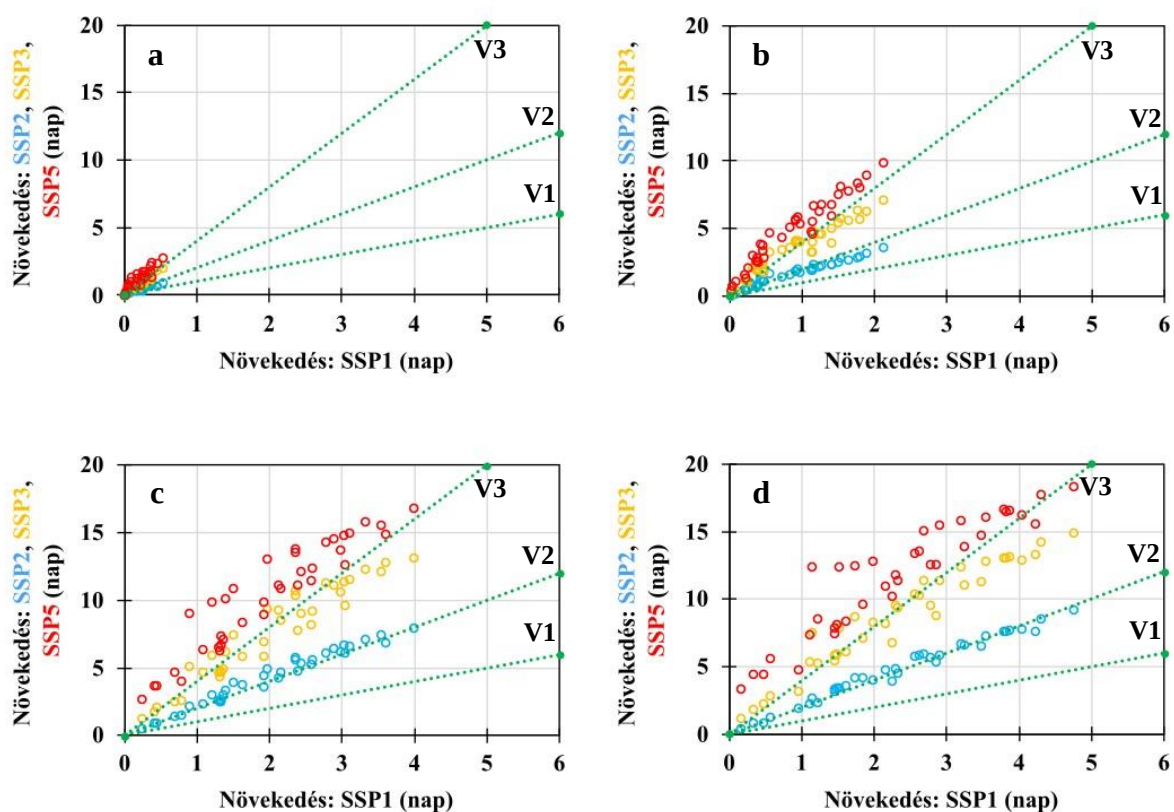
kényszerrel (és így nagyobb növekedéssel) számoló scenáriók, az SSP3-7.0 és az SSP5-8.5. Ugyanez a különbség megfigyelhető az éven belül is: a várhatóan alacsonyabb növekedésnek kitett május, június és szeptember (7.a, b, e ábrák) hónapokban bármely scenáriózt vizsgáljuk, kisebb domborzati hatást mutatnak, mint júliusban és augusztusban (7.c és d ábrák), amikor a legnagyobb a projektált növekedés.

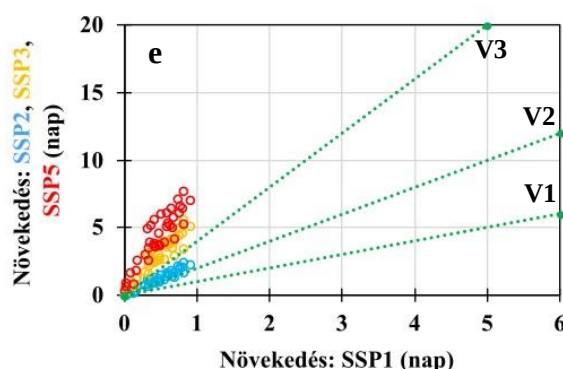


7. ábra: A forró napok számának várható havi változása tengerszint feletti magasságuk alapján a 2081–2100 időszakra az é.sz. 42,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

A scenáriók közötti összehasonlítás során kapott regressziós együtthatók éves menete hasonló az é.sz. 37,5°-os metszethez, azzal az eltéréssel, hogy a május jobban hasonlít a nyári hónapokra, és csak szeptemberre kaptunk eltérő meredekségű illesztett egyeneseket (8. ábra). Májustól augusztusig ugyanis az m havi értéke rendre: 1,5–2 az SSP2-4.5, 3–3,4 az SSP3-7.0 és 2–4,5 az SSP5-8.5 esetén. Ezzel szemben szeptemberben az m értéke 2,5 az SSP2-4.5, 5,5 az SSP3-7.0 és 7,1 az SSP5-8.5 esetén. Továbbá észrevehető, hogy az é.sz. 37,5° esetén a rácspontok a két jellemző felszínkarakterisztika alapján két csoportba rendeződtek (tengerfelszínek és tengerparti szárazföldek csoportja), míg az é.sz. 42,5°-os metszet esetén nem alakulnak ki klaszterek, a rácspontok a rájuk illeszthető regressziós egyenest kisebb szórással követik.





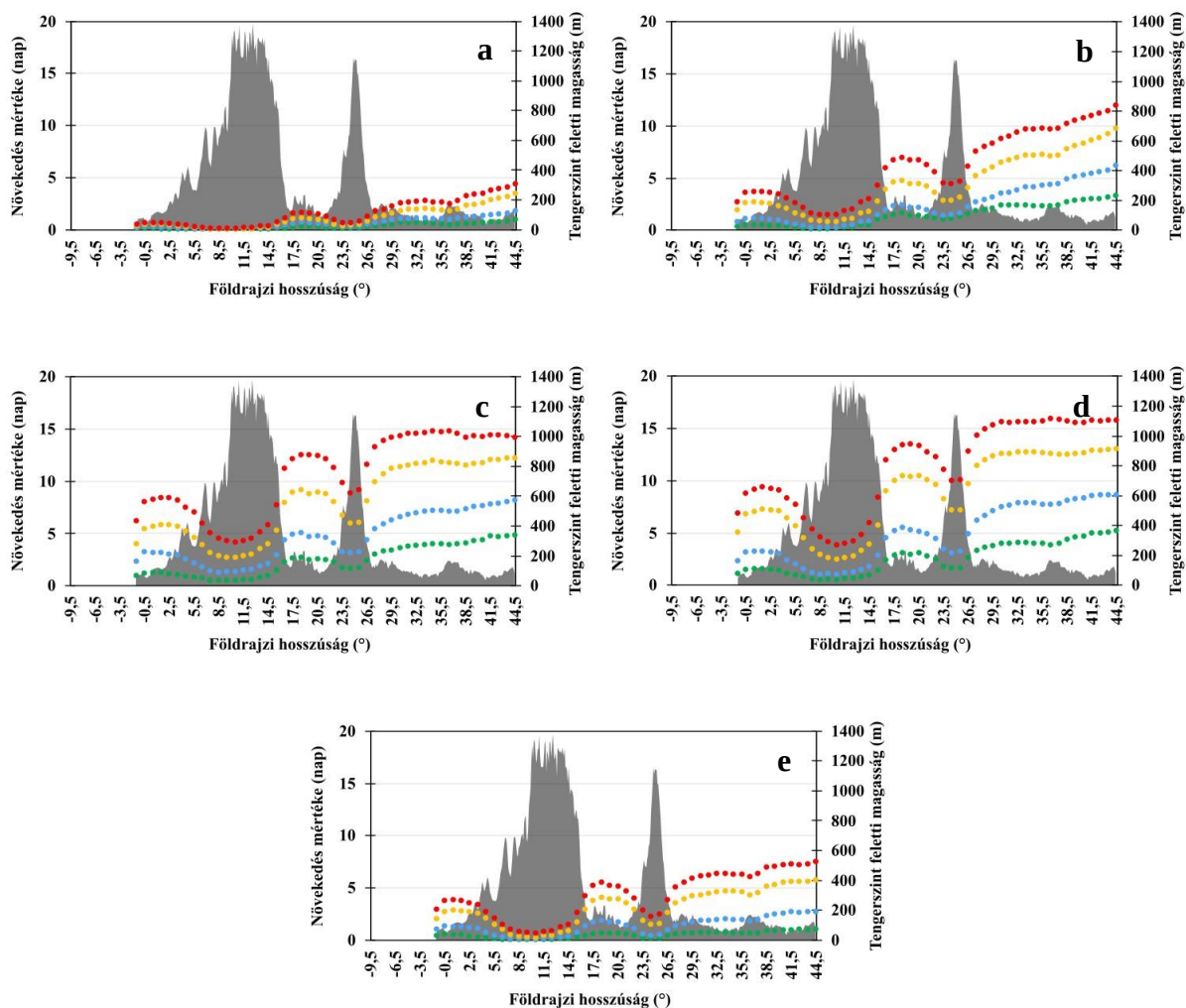
8. ábra: A forró napok számának 2081–2100 időszakra várható havi változására az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 scenárióra kapott értékek az SSP1-2.6 forgatókönyvre kapott értékek függvényében az é.sz. 42,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

V1: $1 \cdot \text{SSP1}$, V2: $2 \cdot \text{SSP1}$, V3: $4 \cdot \text{SSP1}$

3.1.3. Elemzés az é.sz. 47,5° metszetre

Az é.sz. 47,5°-os metszet az egyetlen, Magyarországot is érintő metszet a vizsgálatunkban; a k.h. 17,5°-21,5° közötti öt rácspont tartozik hazánkhoz (9. ábra). Ez az egyetlen metszet, amelynek területén egyáltalán nincsenek vízfelszínek, ugyanakkor az Atlanti-óceán nyugati elhelyezkedése alapvetően befolyásolja a TX35 várható változásának mértékét. A kontinentális hatás szinte minden hónapban megjelenik, azonban júliusban és augusztusban (9.c és d ábra) a k.h 30,5°-tól keletre stagnálni kezd a növekedés mértéke. Ez a Fekete-tengernek köszönhető, amely a metszettől délre elhelyezkedve enyhíti a kontinentális hatást, és megakadályozza, hogy a becsült növekedés mértéke augusztusban meghaladja a 16 napot. A kontinentalitás mellett a domborzat is fontos éghajlatalakító tényező, mivel a metszet két magashegységen, az Alpokon és a Kárpátokon is átmegy. Így a TX35 index változásának területi eloszlását a kontinentális és orografikus hatás együttes, komplex eredményeképp kell értelmezni. A Kárpát-medence területén, bármely hónapot vagy scenáriót vizsgáljuk, a meneteknek lokális maximuma van, és az SSP5-8.5 scenáriót alapul véve a növekedés mértéke akár 11-13 nap is lehet augusztusban (9.d ábra).



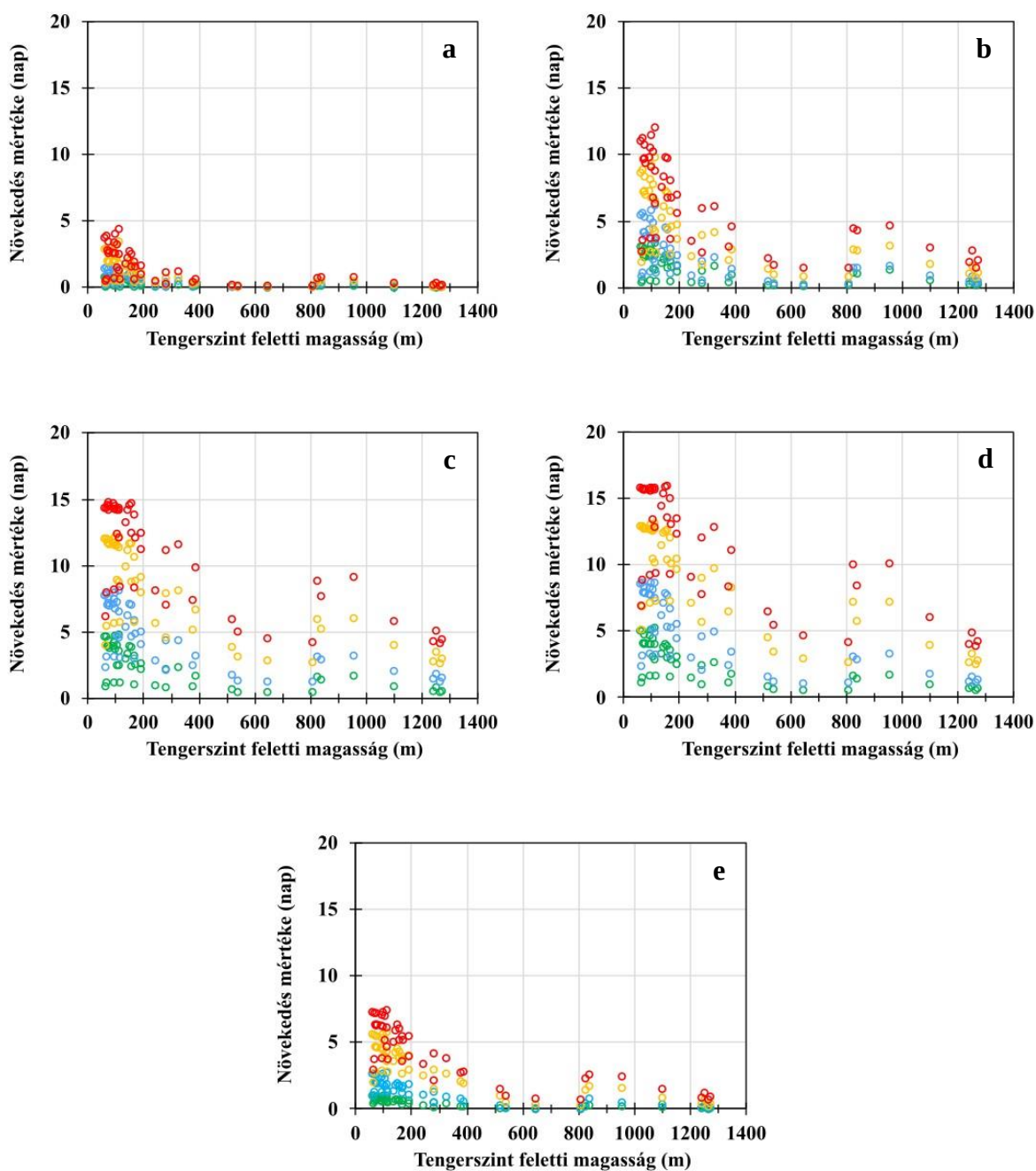
9. ábra: A forró napok számának várható havi változása a 2081–2100 időszakra a négy SSP-szcenárió alapján az é.sz. 47,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

● SSP1-2.6 ● SSP2-4.5 ● SSP3-7.0 ● SSP5-8.5

E két hatás közül a domborzatra fókuszálva az látható, hogy, miként azt feltételeztük, a legnagyobb növekedés a síkságokhoz köthető (10. ábra). Innen egyre nagyobb magasságok felé haladva 100 m-től 800 m-ig közel lineáris görbét követve csökken a TX35 becsült növekedésének mértéke. Itt azonban kialakul egy másodmaximum 800 és 1000 m között, amelynek értékei a 300-400 m-es tengerszint feletti magasságban jelennek meg. Ez a jelenség a már fentebb említett komplexitásnak tulajdonítható, ezek ugyanis a Kárpátokhoz köthető rácspontok, amelyek a metszeten keletre helyezkednek el, így a kontinentális hatás kiegyenlíti a növekvő tengerszint feletti magasságból adódó domborzati hatást. Ezeket a különbségeket elsősorban a nagyobb várható növekedéssel jellemezhető nyári hónapokban láthatjuk (10.b, c és d ábra), míg májusban, ahol a metszet az eddigiekhez képest északabbi

elhelyezkedéséből fakadóan már kisebbek a projektált változások, nem mutatkozik jelentős domborzati hatás.

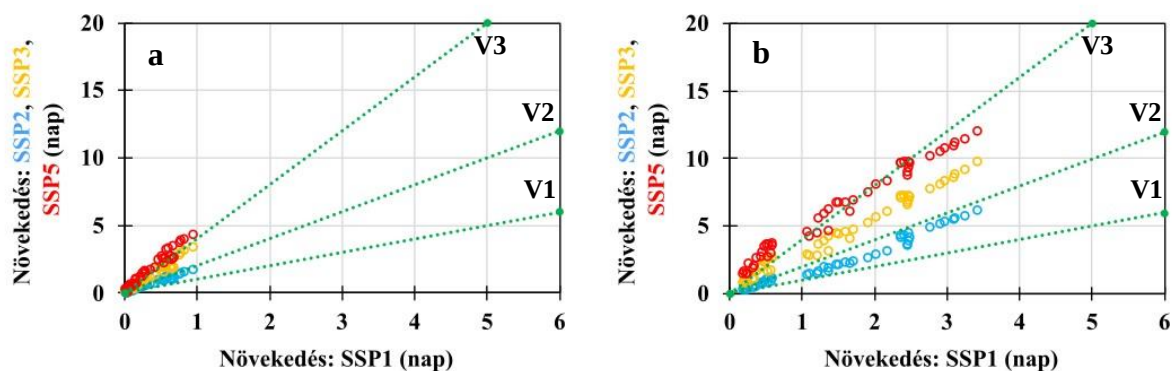


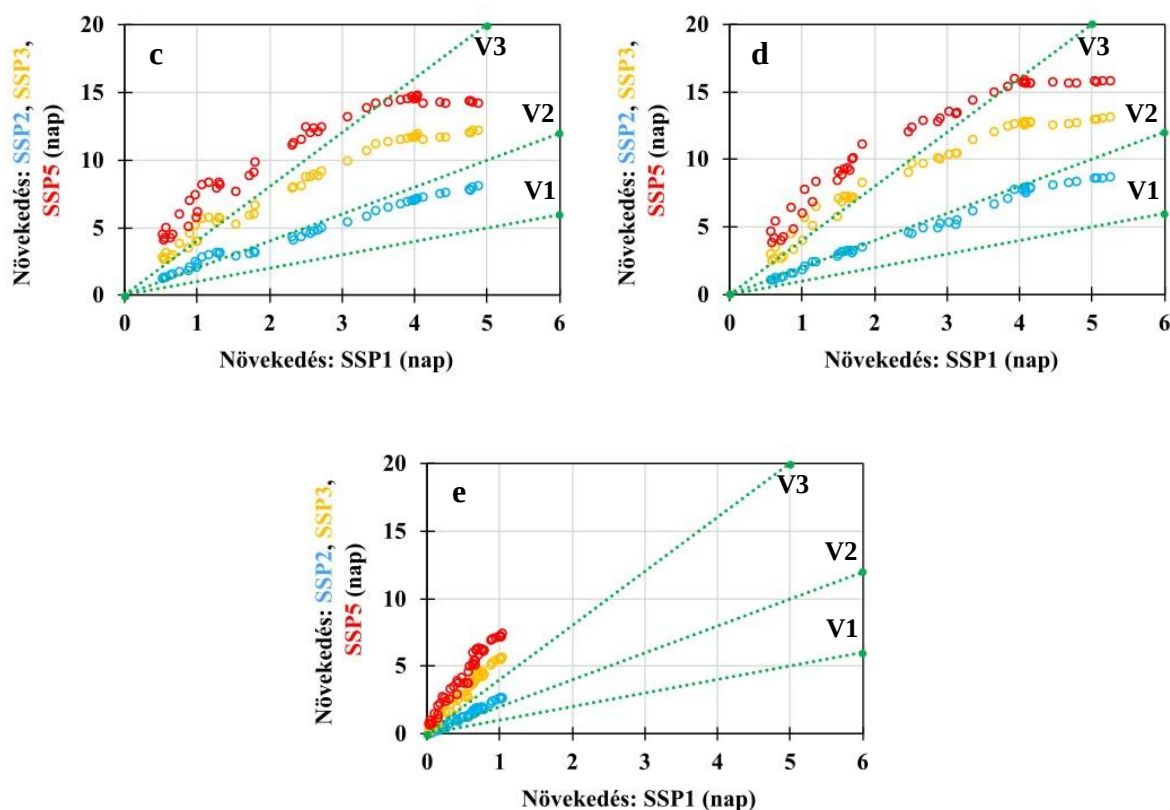
10. ábra: A forró napok számának várható havi változása tengerszint feletti magasságuk alapján a 2081–2100 időszakra az é.sz. 47,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

A scenáriók összehasonlításánál (11. ábra) elsősorban a júniusi és augusztusi diagramokra (11.b és d ábrák) érdemes koncentrálni, ezeken ugyanis egyértelműen megjelenik a pontok klaszterekbe rendeződése. A két csoportra együttesen fektetett lineáris regresszió

m meredeksége szemmel láthatóan pontatlan eredményt ad az SSP3-7.0 ($m = 2,3$ augusztusban) és SSP5-8.5 ($m = 2,6$, szintén augusztusban) esetén, hiszen a két klaszter pontjai teljesen más meredekségű lineáris egyenesek mentén helyezkednek el. A csoportok könnyen azonosíthatóak, ha a metszetet elfelezzük, úgy, hogy azonos számú rácspont kerüljön az így létrejött nyugati és keleti részmetszetekbe, majd megvizsgáljuk külön-külön a részmetszetek pontjainak elhelyezkedését ugyanezen az ábrán. Az így létrejött eloszlások közül a nyugati részmetszet pontjai nagyjából lefedik az első csoportot (a kisebb SSP1-2.6-os növekedési projekciókkal), míg a keleti részmetszet pontjai megfeleltethetők a második csoportnak. Még pontosabb eredményre jutunk, ha a metszetet nem a felénél választjuk ketté, hanem az Alpoktól nyugatra (első csoport), és keletre (második csoport) fekvő pontokra osztjuk, kivéve a Kárpátokhoz tartozó két rácspontot, melyeket az általános szabállyal ellentétben az előbbi csoporthoz adjuk hozzá. Így két fontos összefüggést kapunk erre a metszetre vonatkozóan: egyrészt az Alpokhoz viszonyított helyzet alapvetően befolyásolja, milyen tulajdonságú pontokra kell kiértékelnünk a projekciókat. Másrészt a második csoport regressziós együtthatói azért alacsonyak, mivel keleten már a referencia-időszakban is magas volt a TX35 havi értéke, így az egyre növekvő sugárzási kényszer hatására egyre közelebb érünk az elvi felső határhoz, amelynél több 35 °C feletti maximumhőmérsékletű nap az adott hónapban már nem lehetséges.





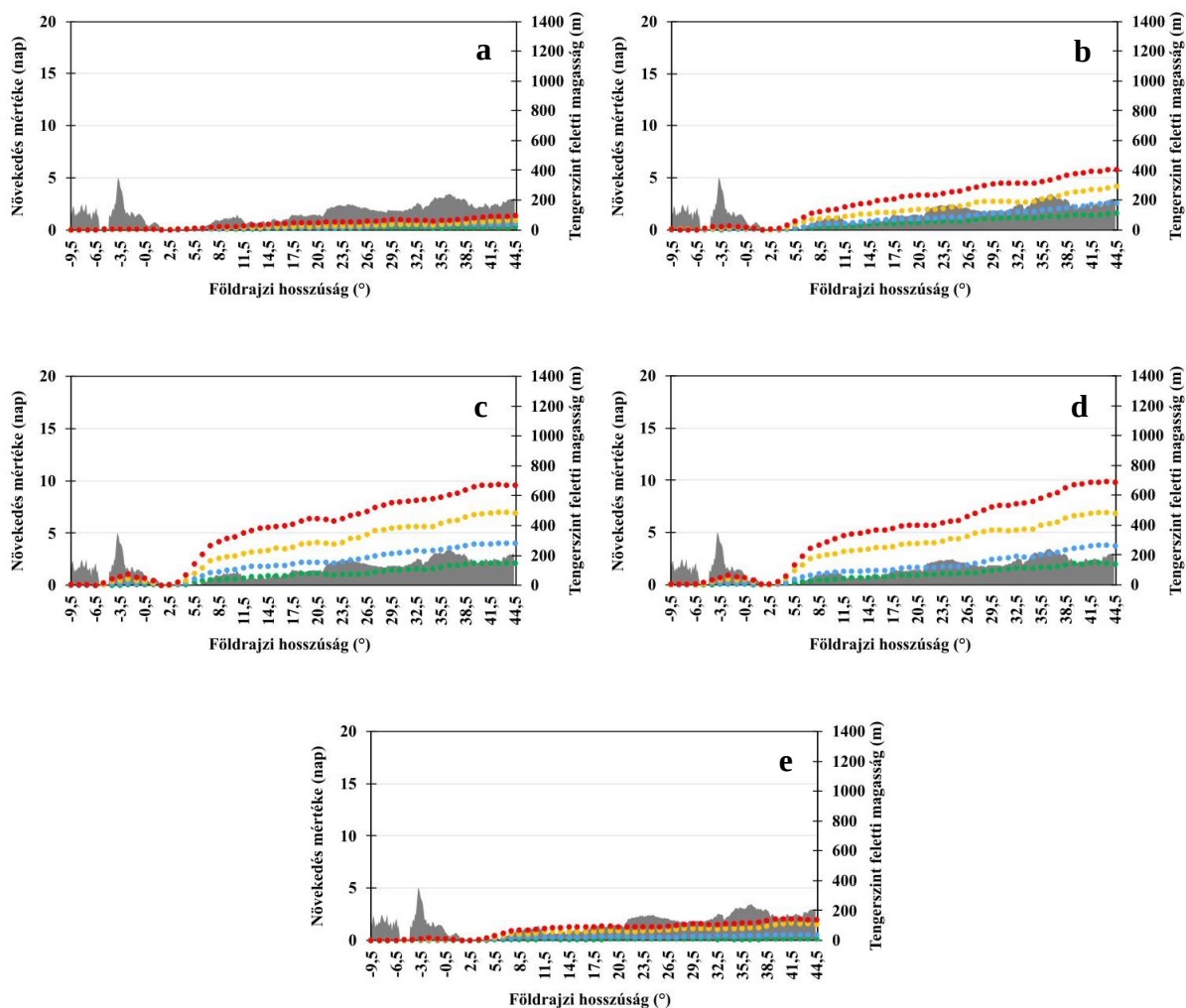
11. ábra: A forró napok számának 2081–2100 időszakra várható havi változására az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 szcenárióra kapott értékek az SSP1-2.6 forgatókönyvre kapott értékek függvényében az é.sz. 47,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

V1: $1 \cdot \text{SSP1}$, V2: $2 \cdot \text{SSP1}$, V3: $4 \cdot \text{SSP1}$

3.1.4. Elemzés az é.sz. 52,5° és é.sz. 57,5° metszetekre

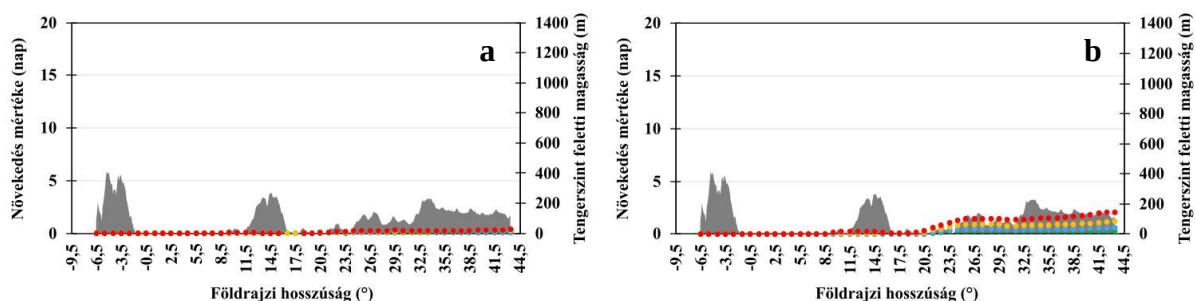
Az é.sz. 52,5°-os metszet a legtöbb szárazföldi rácspontot érintő metszet, szinte egész Európán áthalad, érintve többek között Nagy-Britanniát, Németországot és Lengyelországot is. Ezzel szemben az é.sz. 57,5°-os metszet sokkal több vízfelszín felett halad át, és Skandinávia déli részét, illetve a Baltikumot jellemzi. Mindkét metszetre jellemző, hogy alacsony az átlagos tengerszint feletti magasságuk, a legmagasabb felszínek sem érik el a 400 m-t (F2. és F3. ábra). Így a domborzat nem jelenik meg rajtuk, mint fontos éghajlatalakító tényező. További kapcsolat köztük, hogy északi elhelyezkedésüknek köszönhetően a TX35 a referencia-időszakban nem számított gyakran előforduló éghajlati eseménynek, és a szcenáriók alapján a becsült növekedés jelentős mértéke csak az év egy szűk időszakára korlátozódik (12. és 13. ábra). Ez az é.sz. 52,5° metszet esetén a nyári évszak hónapjait, míg az é.sz. 57,5° esetén csak júliust jelenti.

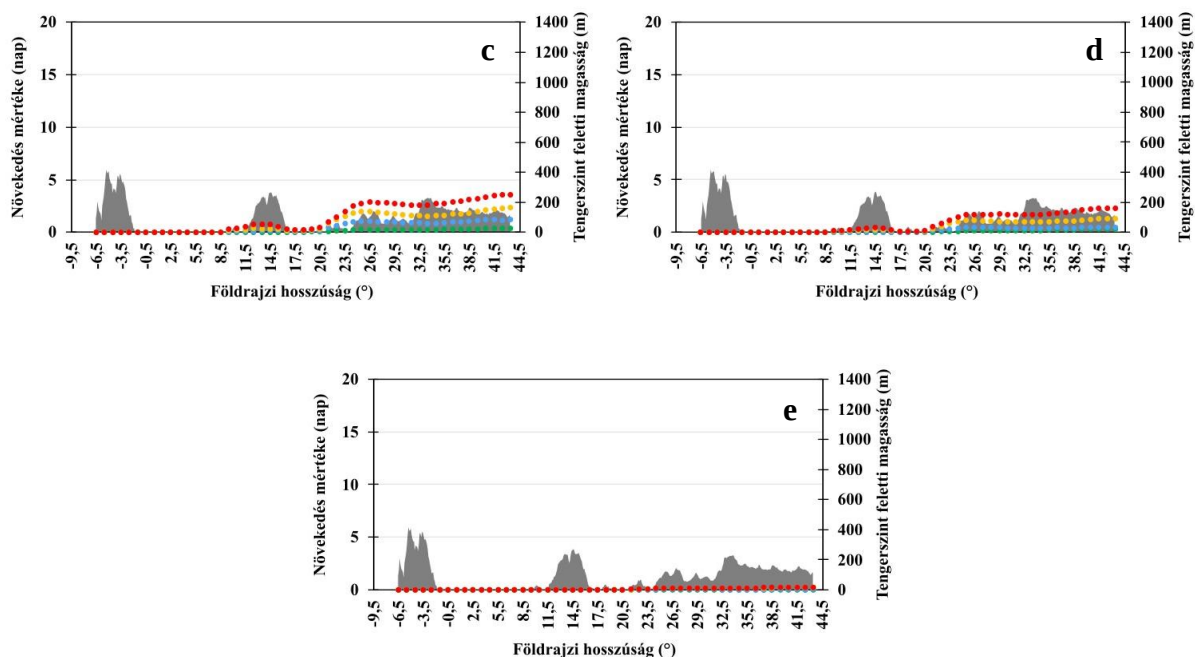


12. ábra: A forró napok számának várható havi változása a 2081–2100 időszakra a négy SSP-szenárió alapján az é.sz. 52,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

● SSP1-2.6 ● SSP2-4.5 ● SSP3-7.0 ● SSP5-8.5





13. ábra: A forró napok számának várható havi változása a 2081–2100 időszakra a négy SSP-szenárió alapján az é.sz. 57,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

● SSP1-2.6 ● SSP2-4.5 ● SSP3-7.0 ● SSP5-8.5

Mivel a tengerszint feletti magasság alacsony mindkét metszeten, a legfontosabb éghajlatalakító tényező a kontinentalitás, ami különösen fontos az é.sz. 52,5°-án, ahol hasonlóan az é.sz. 47,5°-os metszethez, nyugaton található nagyobb vízfelület. Ennek eredményeképpen augusztusban a keleti részen az SSP5-8.5 szerint akár 10 napos is lehet a növekedés a TX35-ben, míg nyugaton még ekkor is minimális változást mutatnak a modellszimulációk. Az illesztett regressziós együtthatók (F4. és F5. ábra) az é.sz. 52,5°-án júniusban minimálisak, míg az é.sz. 57,5°-a esetén augusztusban, de utóbbi esetben a nagyon kis változások miatt a pontos számokat fenntartásokkal kell kezelni.

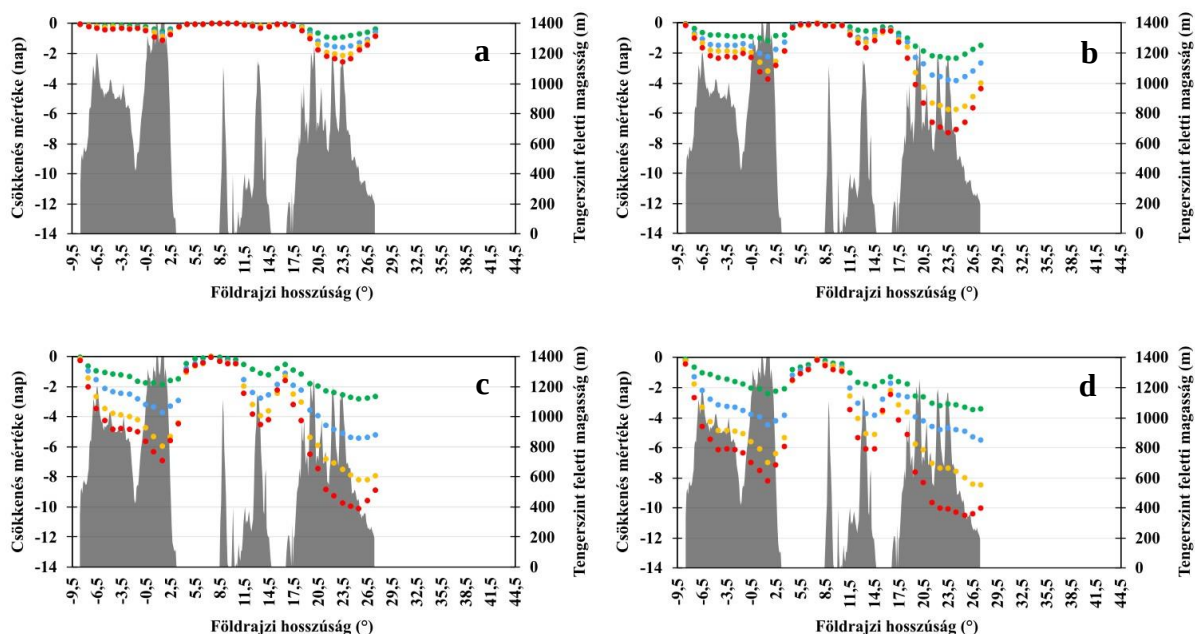
3.2. Fagyos napok száma (FD)

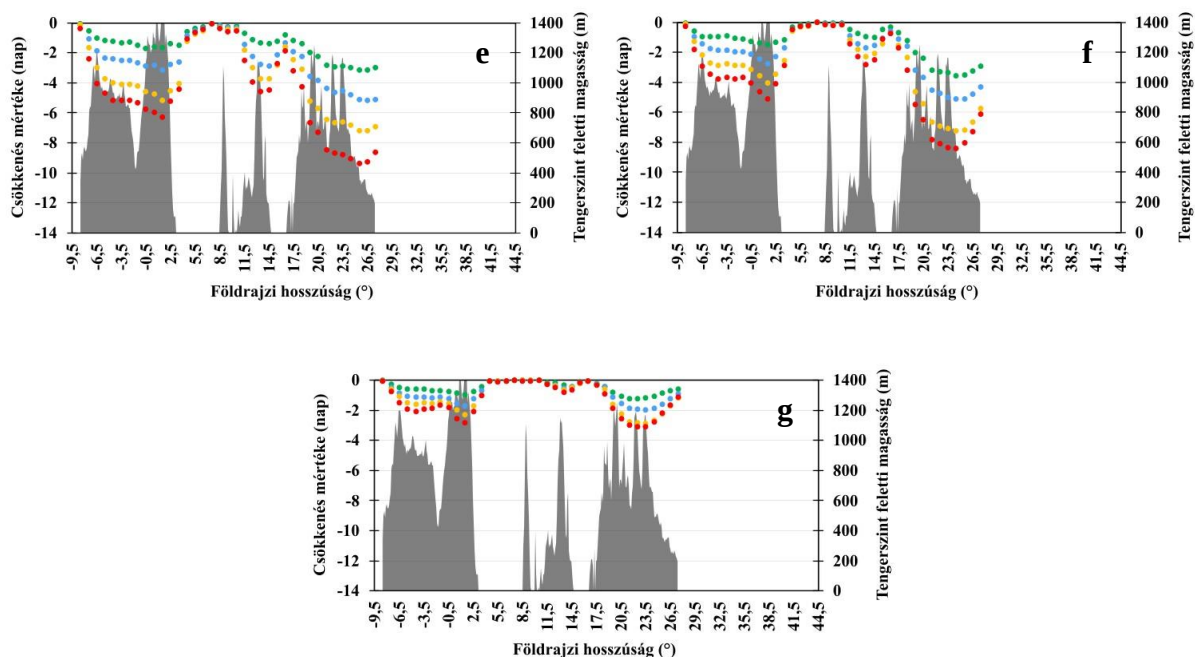
A fagyos napok számának változását az öt északabbra elhelyezkedő metszet segítségével mutatjuk be, ezek az é.sz. 42,5°, é.sz. 47,5°, é.sz. 52,5°, é.sz. 57,5° és é.sz. 62,5°. Az é.sz. 37,5°-os metszet esetén – hasonlóan az é.sz. 62,5°-os metszethez a TX35-re – nem várható jelentős változás a fagyos napok havi számában, még az SSP5-8.5 Szenárió esetén sem. Ennek ellenére fontos megjegyezni, hogy az FD nem tekinthető a TX35 megfeleltetésének a hideg extrém indexek esetén, ugyanis a 35 °C-os maximumhőmérsékleti érték szigorúbb küszöbnek bizonyul a 0 °C-os minimumhőmérsékleti értéknél. Ezt bizonyítja,

hogy az FD esetén már a referencia-időszakban is több az előfordulás, mint a TX35 esetén (F6. ábra). Így azt mondhatjuk, hogy az FD éghajlati index előfordulása nagyobb területet fed le Európa-szerte, mint a TX35.

3.2.1. Elemzés az é.sz. 42,5° metszetre

Az é.sz. 42,5° metszet déli elhelyezkedéséből fakadóan elsősorban a TX35 változásában fokozottan érintett terület, de a vizsgálatunk alapján – a novembertől márciusig terjedő időszakban – a fagyos napok havi számában is jelentős csökkenés várható (14. ábra). Az FD tekintetében vizsgált metszetek közül a legtöbb vízfelszínnel rendelkező rácsponttal rendelkezik, ez alapvetően befolyásolja a változás mértékét az egyes területeken, hiszen a szárazföldi pontok markánsan elkülönülnek a vízfelszínektől. Utóbbi területeken a referencia-időszakban eleve nem volt jelentős a fagyos napok száma, így a csökkenés is csekély. Az abszolút legnagyobb csökkenés (akár 10 nap) januárhoz köthető, de decemberben is hasonló változásokat figyelhetünk meg. A március és november átmeneti hónapoknak tekinthetőek, míg áprilisban és októberben az 1995–2014-es időszakban sem volt jelentős számú fagyos nap, így a változás is kismértékű. A másik éghajlatalkító tényező a kontinentális hatás, melynek hatására elsősorban a téli hónapokban (14.c, d és e ábrák) a legnagyobb csökkenés a keleten fekvő rácspontokhoz köthető, bármely scenáriót is vizsgáljuk.



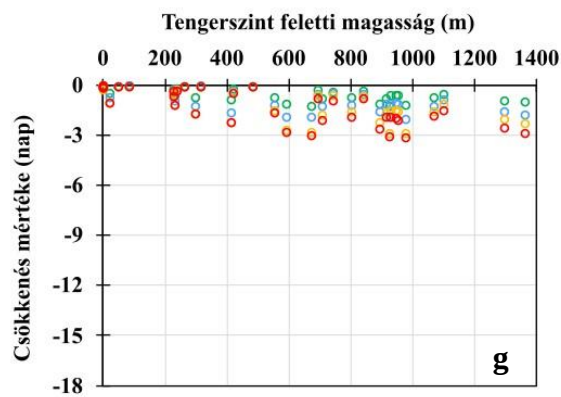
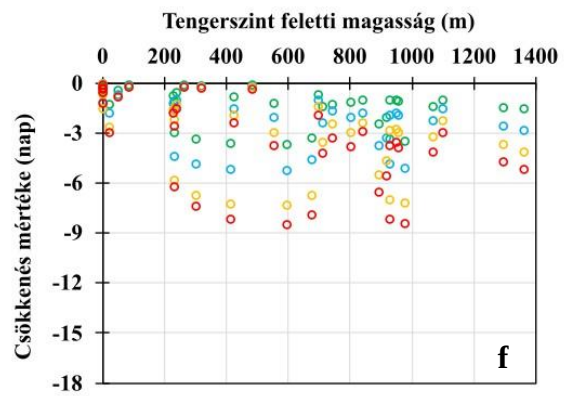
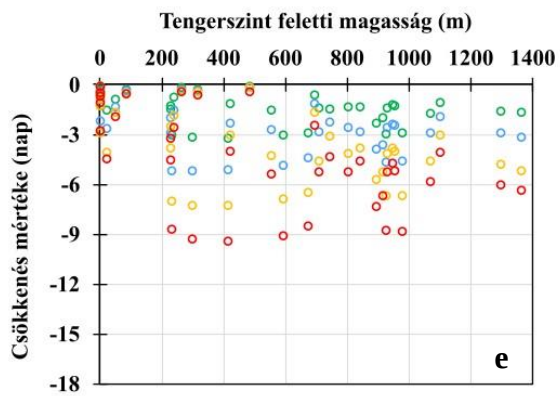
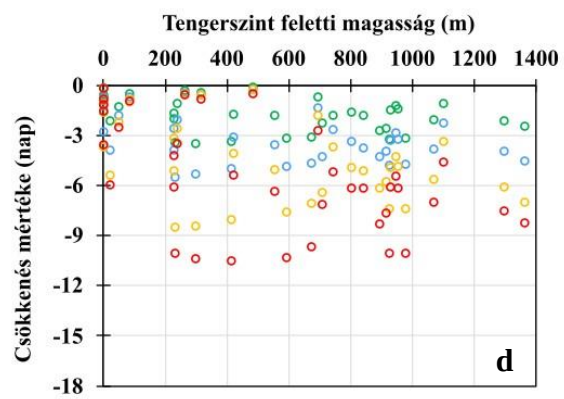
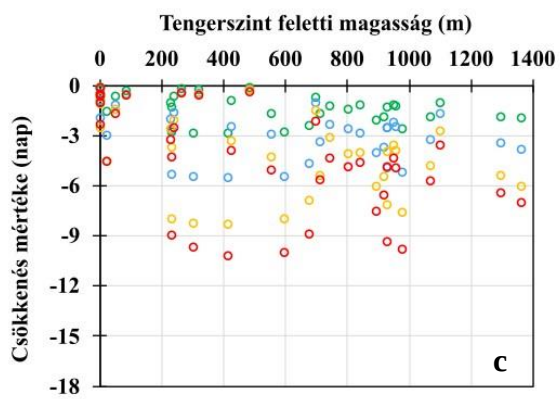
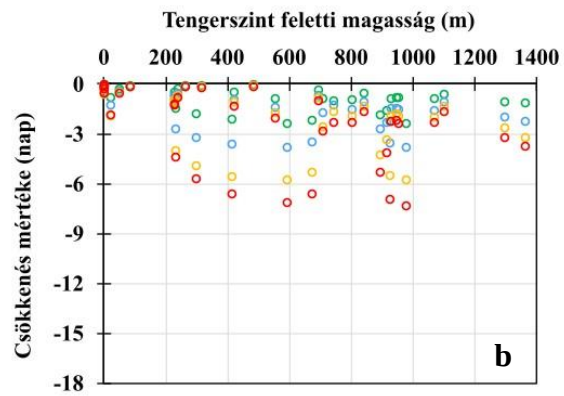
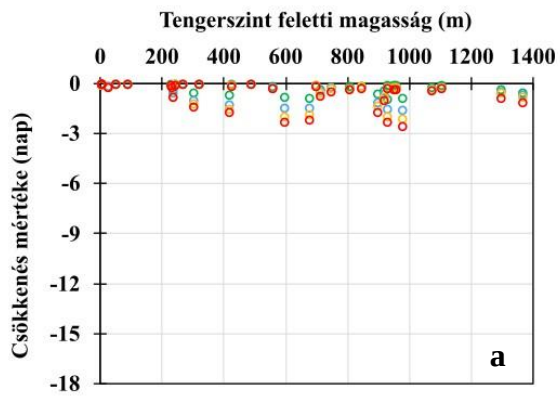


14. ábra: A fagyos napok számának várható havi változása a 2081–2100 időszakra a négy SSP-szenárió alapján az é.sz. 42,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

● SSP1-2.6 ● SSP2-4.5 ● SSP3-7.0 ● SSP5-8.5

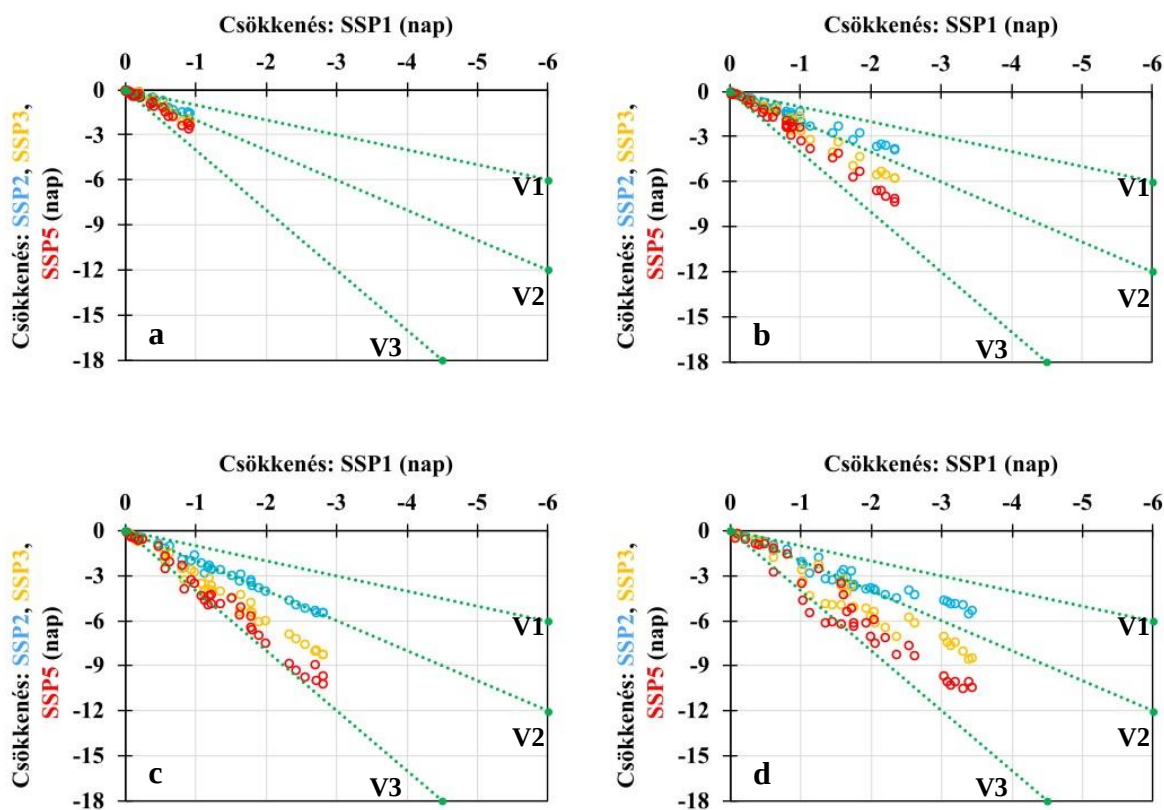
A domborzati hatást elemző ábrákról hasonló következtetéseket vonhatunk le, mint a TX35 esetén: nincs egyértelműen érvényesülő domborzati hatás a 200 m-től 1000 m-ig tartó magasságok esetén, a legkisebb változások ez esetben is a tengerfelszínhez köthetőek (15. ábra). 1000 m felett elsősorban az SSP5-8.5 esetén jellemző, hogy a legextrémabb csökkenésekhez képest alacsonyabb változást becsülnek a modellek, de magán a csoporton belül is az látható, hogy – a várakozásokhoz képest fordítottn – minél inkább nő a tengerszint feletti magasság, annál nagyobb az FD várható csökkenése. Ez az elrendeződés elsősorban a téli hónapokban (15.c, d és e ábrák) alakul ki, ahol a legnagyobb különbségek vannak a tengerfelszín és a szárazföldek között (rendre 0 nap, illetve 10 nap változás), de megfigyelhető márciusban és novemberben is. Áprilisban és októberben a különbségek szinte teljesen eltűnnek.

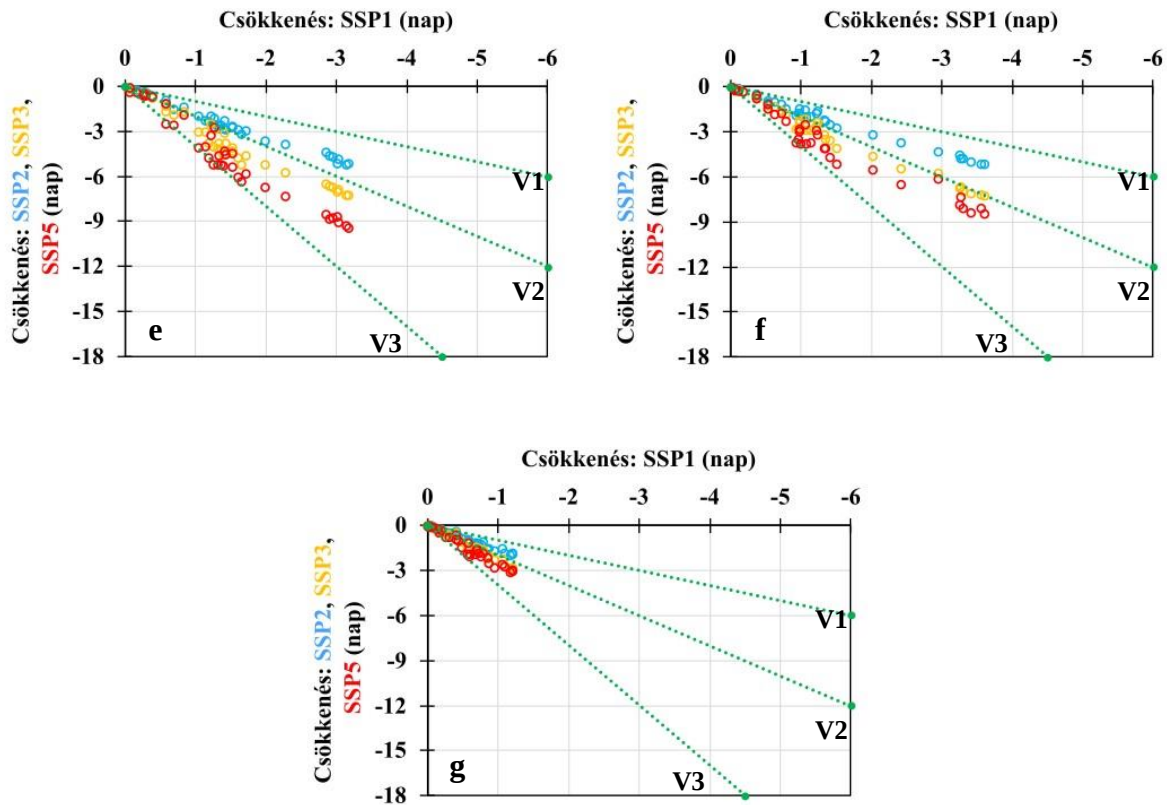


15. ábra: A fagyos napok számának várható havi változása tengerszint feletti magasságuk alapján a 2081–2100 időszakra az é.sz. 42,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

A scenáriók összehasonlításánál ismét lineáris regressziós egyeneseket illesztettünk a pontthalmazokra, amelyeknek regressziós együtthatóját is meghatároztuk (16. ábra). Az egyenesek meredekségének éven belüli változása jól leolvasható az ábrákról is, de számítással is alátámasztható, hogy a meredekség decemberben (16.c ábra) a legnagyobb az összes scenárióra ($m = 1,9$, $m = 3,0$ és $m = 3,6$ rendre az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 esetén). A legalacsonyabb együtthatók márciusra jellemzőek (m azonos sorrendben, mint feljebb: 1,4; 2,0; 2,3). A többi hónap között nincsenek jelentősebb különbségek, scenárióról scenárióra változik, hogy mely hónap(ok)ban nagyobbak az együtthatók. Megfigyelhető továbbá az is, hogy elsősorban februárban és márciusban (16.e és f ábrák) csoportok alakulnak ki a pontthalmazban, amelyek a TX35 esetén erre a metszetre nem voltak jellemzőek. Ezek a pontok rendre a legkeletibb részét képezik a metszetnek, ahol, különösen márciusban, látható (14.f ábra), hogy markáns különbség alakul ki a Balkán – ahol még ebben a hónapban is jelentős az FD csökkenése – és a metszet többi része között.





16. ábra: A fagyos napok számának 2081–2100 időszakra várható havi változására az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 scenárióra kapott értékek az SSP1-2.6 forgatókönyvre kapott értékek függvényében az é.sz. 42,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

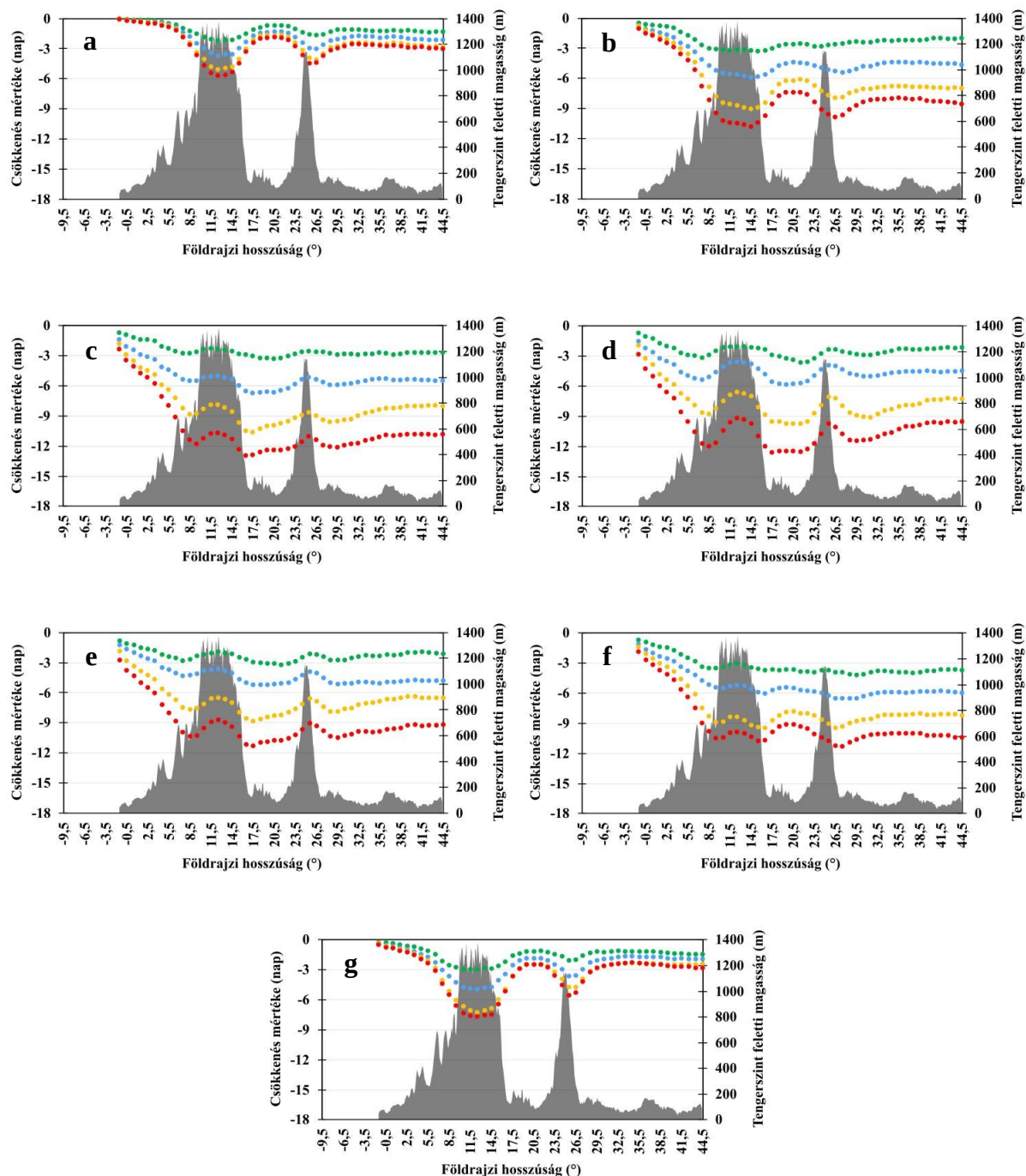
a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

V1: $1 \cdot \text{SSP1}$, V2: $2 \cdot \text{SSP1}$, V3: $4 \cdot \text{SSP1}$

3.2.2. Elemzés az é.sz. 47,5° metszetre

A Magyarországon is áthaladó metszet területén – az Alpoktól nyugatra elhelyezkedő részeket leszámítva – jelentős, akár 10 napot meghaladó csökkenés is várható a téli hónapokban az FD értékében a legnagyobb sugárzási kényszerrel számoló scenárióra (17. ábra). Az abszolút minimális csökkenés decemberre tehető, de a januári projekciók is hasonlóan jelentős értékeket mutatnak. A február azonban már jobban hasonlít a márciushoz és novemberhez, sőt, vannak olyan rácspontok, amelyeken a februári becsült csökkenés kisebb a márciusinál. A kontinentális hatás ismét csak kb. az Alpok keleti oldaláig tart, keletebbre haladva ugyanis – főként januárban és februárban (17.d és e ábrák) – egyre kisebb az FD csökkenése. A kontinentalitás mellett a domborzat hatása is kiemelhető, a decembertől márciusig tartó időszakban a nagy tengerszint feletti magassággal rendelkező területeken kisebb a csökkenés, míg áprilisban, októberben és novemberben a legnagyobb. A Magyarország területére

vonatkozó projekciók – a TX35-höz hasonlóan – jelentős változást mutatnak, a teljes metszetet tekintve nálunk várható a fagyos napok számának egyik legjelentősebb csökkenése a december–február időszakban, ami az SSP5-8.5 scenárió alapján akár 13 nap is lehet.

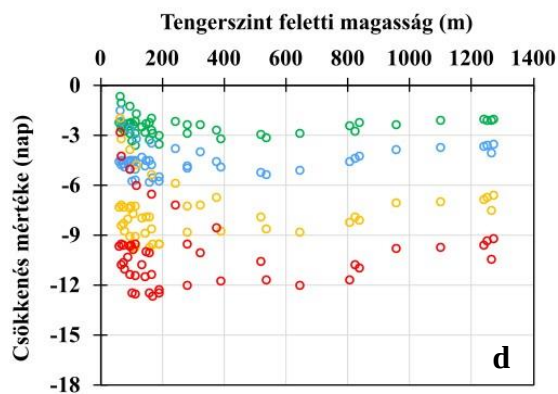
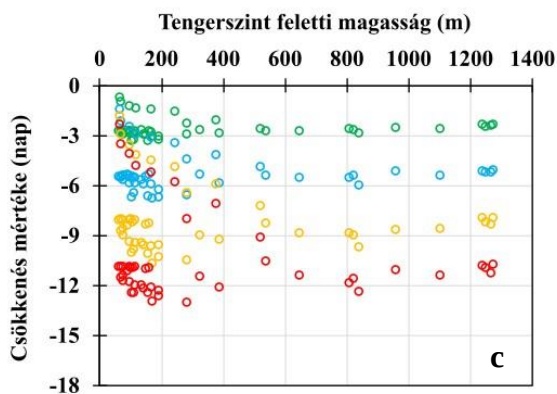
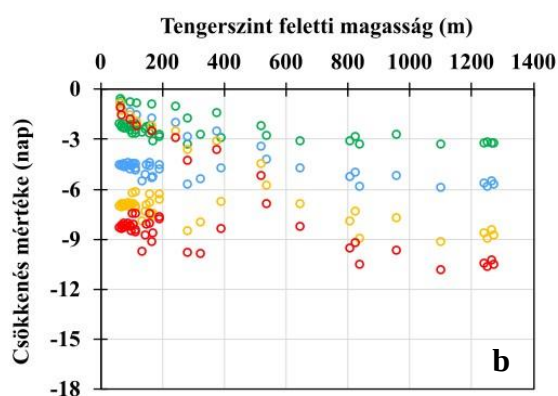
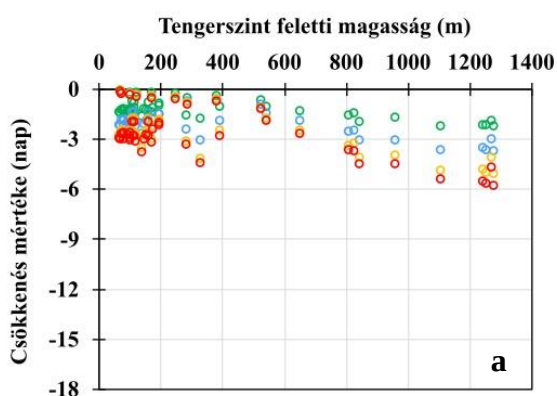


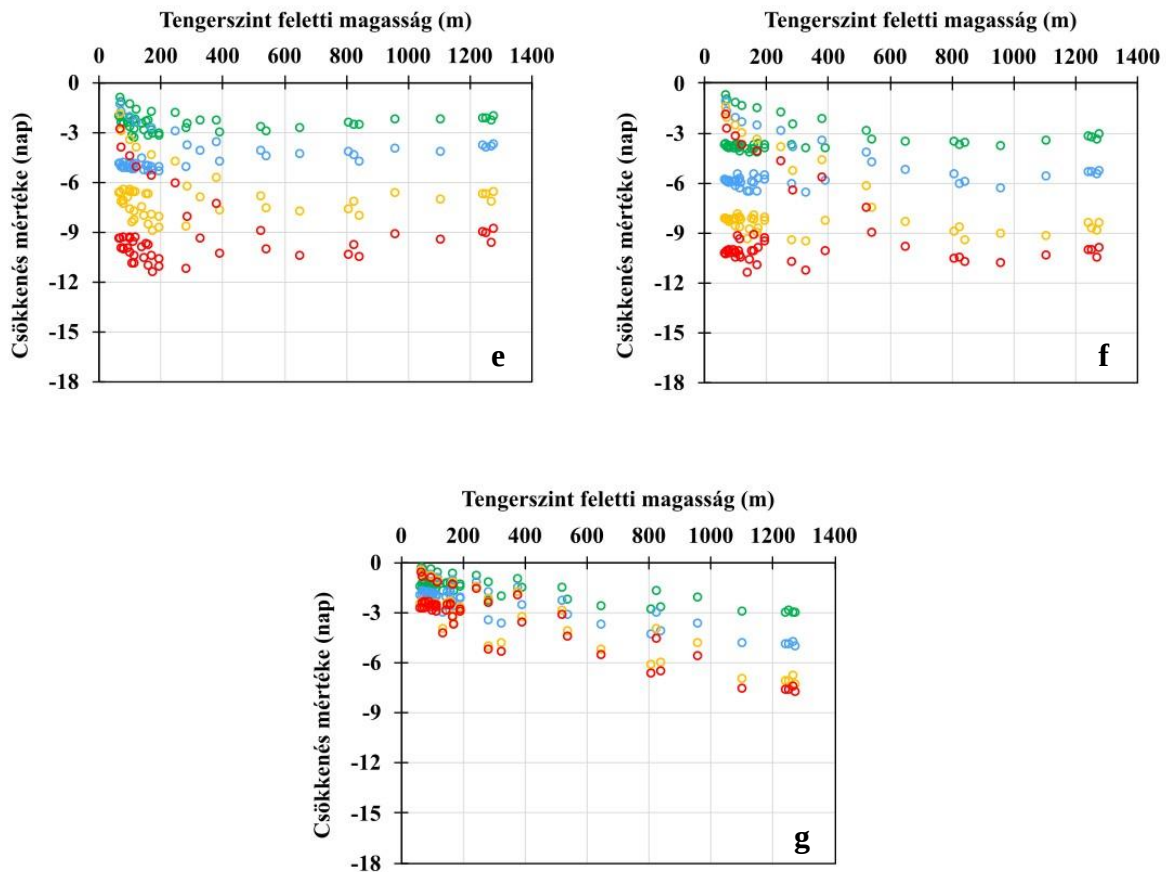
17. ábra: A fagyos napok számának várható havi változása a 2081–2100 időszakra a négy SSP-szenárió alapján az é.sz. 47,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

● SSP1-2.6 ● SSP2-4.5 ● SSP3-7.0 ● SSP5-8.5

A fenti megállapításokat a domborzattal kapcsolatos ábra is megerősíti (18. ábra). A téli hónapokban és márciusban (18.c, d, e és f ábrák) a magasabb felszíneken 2-3 nappal kisebb a várható csökkenés, mint a keleti rácspontok sík felszínein. A metszet nyugati, Atlanti-óceánhoz közeli határához tartozó pontokon ahogy haladunk kelet felé, egyre nagyobb az FD havi csökkenése, ezt a halmazt a meredeken lefelé ívelő pontok adják az ábrákon. Ezzel szemben, ha az áprilisi diagramot vizsgáljuk (18.g ábra), akkor azt láthatjuk, hogy szinte lineárisan nő a fagyos napok havi számának becsült csökkenése, ahogy egyre nagyobb a tengerszint feletti magasság. A maximális csökkenés mértéke azonban elmarad a téli hónapokétól.

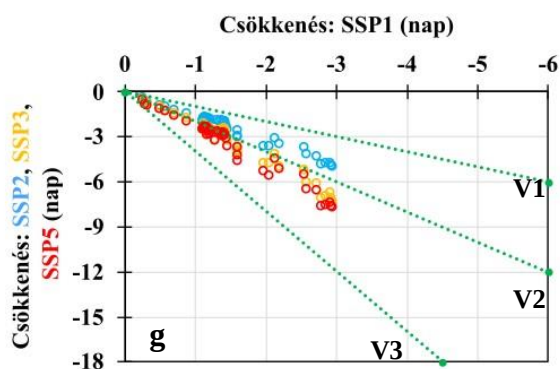
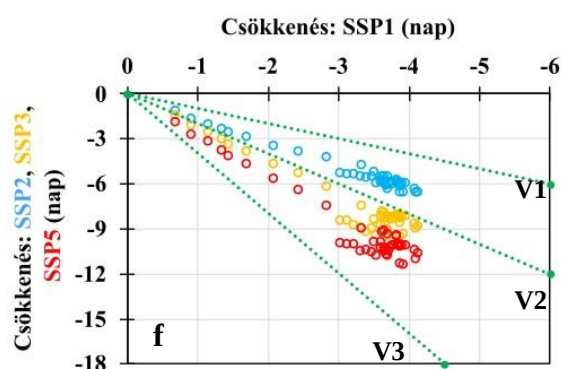
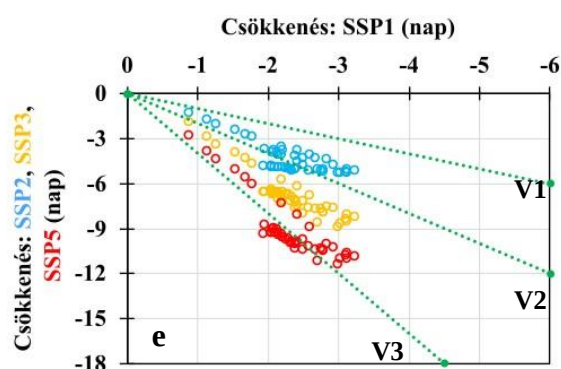
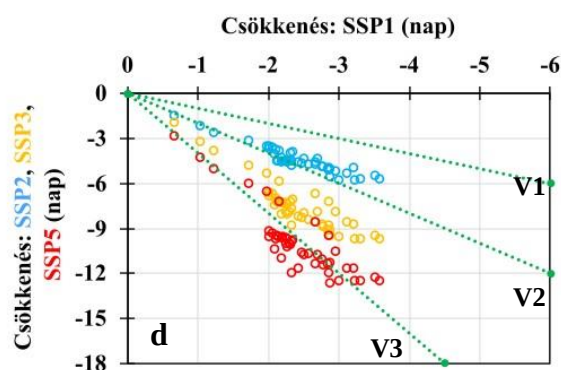
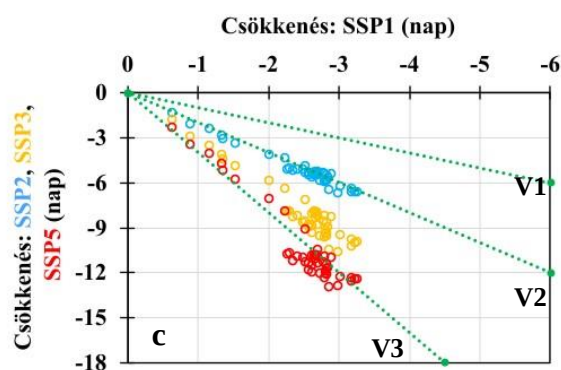
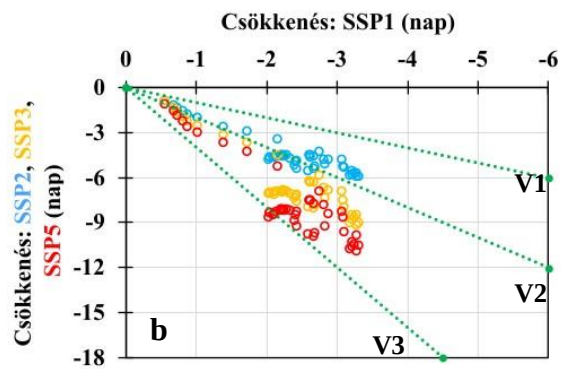
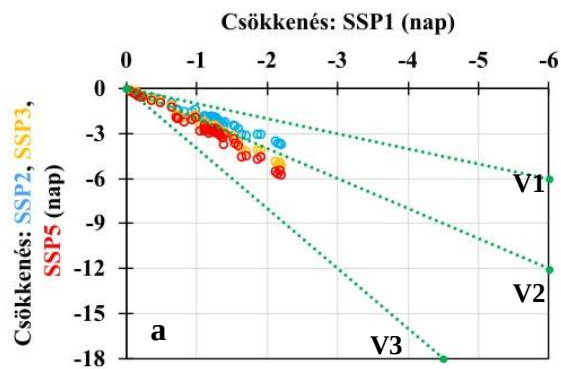




18. ábra: A fagyos napok számának várható havi változása tengerszint feletti magasságuk alapján a 2081–2100 időszakra az é.sz. 47,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

A scenáriók összehasonlításával zárva az elemzést, az Alpok általi kettéosztottság jól kivehető, elsősorban a novembertől márciusig tartó időszakban (19. ábra). A márciusi ábrát alapul véve (19.f ábra) két részre oszlanak a pontok: Az Alpok nyugati széléig tartó rácspontokon a kontinentalitás erősödésének megfelelően markánsan nő az FD havi becsült csökkenése. Ugyanakkor az egész metszetet figyelembe véve ezeken a területeken még mindig alacsonynak számít ez a csökkenés, így ezek a pontok alkotják az SSP1-2.6 szempontjából 3 napos vagy annál kisebb mértékű csökkenést. A metszet többi pontja, az Alpokkal együtt a második, nagyobb csoportba tartozik egész Európát figyelembe véve jelentős várható változással. Ez az SSP1-2.6 esetén a -3-tól -4 napos, míg az SSP5-8.5 esetén -9-től -12 napos tartomány, a magyarországi rácspontok is ennek a második csoportnak a részét képezik. A kapott eredményt magyarázhatjuk egyrészt az Alpok helyzetével, másrészt a nagyobb vízfelületek hiányával a metszeten belül, amelyek – mint például az é.sz. 42,5°-os szélesség esetén is – a legmarkánsabb különbségeket tudják kialakítani a rácspontok között.



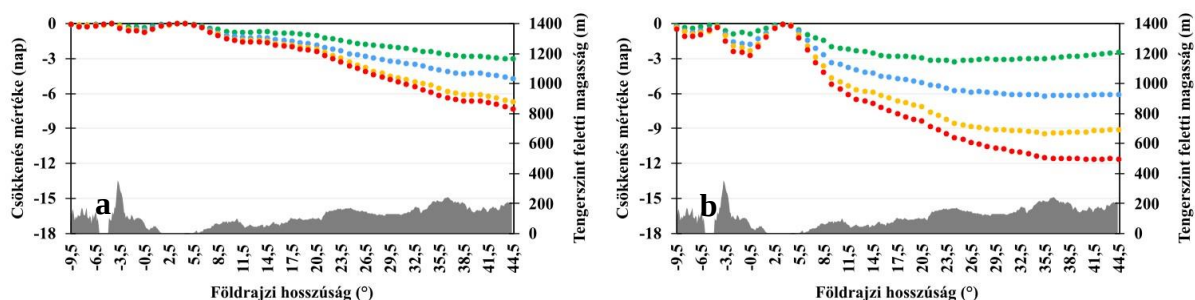
19. ábra: A fagyos napok számának 2081–2100 időszakra várható havi változására az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 szcenárióra kapott értékek az SSP1-2.6 forgatókönyvre kapott értékek függvényében az é.sz. 47,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

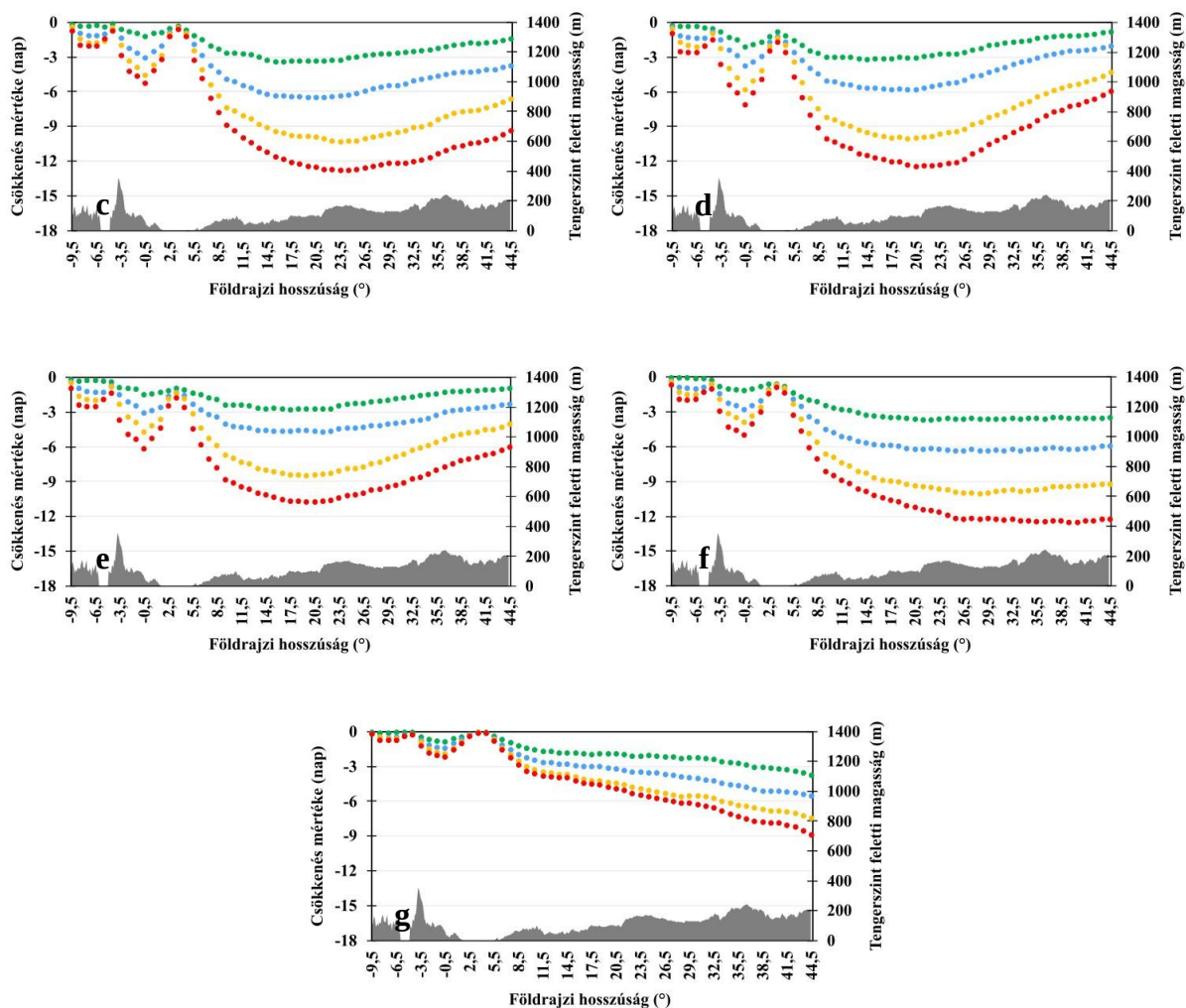
a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

V1: 1 · SSP1, V2: 2 · SSP1, V3: 4 · SSP1

3.2.3. Elemzés az é.sz. 52,5° metszetre

Az é.sz. 52,5° metszeten az FD esetén jelentősebb változásra lehet számítani, mint a TX35 esetén. A változások ráadásul nem korlátozódnak egy bizonyos időszakra, hanem a hét vizsgált hónap mindegyikében jelentős az FD csökkenése (20. ábra). A kis átlagos tengerszint feletti magasság miatt (F7. ábra) a kontinentalitás az elsődleges éghajlatalkító tényező, de az é.sz. 47,5°-os metszettel ellentétben vannak tengeri rácspontok a metszeten, ezek nyugatról kelet felé haladva az Ír-tenger és az Északi-tenger déli része, valamint a La Manche-csatornához közeli atlanti terület. Ezek a területek a meneteken elsősorban télen jelennek meg (20.c, d és e ábrák), itt ugyanis minimális a fagyos napok becsült csökkenése, míg köztük Nagy-Britannia területén akár a 7 napot is megközelítheti. A téli hónapok a kontinentális hatás szempontjából is elkülönülnek a többi hónaptól. Míg decembertől februárig a legnagyobb várható csökkenés – az erősödő kontinentális hatás ellenére – nem a legkeletebbre elhelyezkedő rácspontokhoz köthető, a tavaszi és őszi hónapokban egyértelműen minél keletebbre haladunk, annál nagyobb csökkenést jeleznek a projekciók. Ez annak tudható be a referencia-időszak adatai alapján, hogy a tavaszi-őszi időszakban a keleti területeken volt jellemző a fagyos napok magas száma, így itt következhet be nagyobb csökkenésük is. Télen szintén magas volt a számuk, azonban a felmelegedés hatására nem nő annyit a napi minimumhőmérséklet, hogy 0 °C fölé kerüljön, míg az ettől nyugatabbra elhelyezkedő területeken ugyanekkora felmelegedés miatt már nem tud fagypontra alá esni a hőmérséklet.





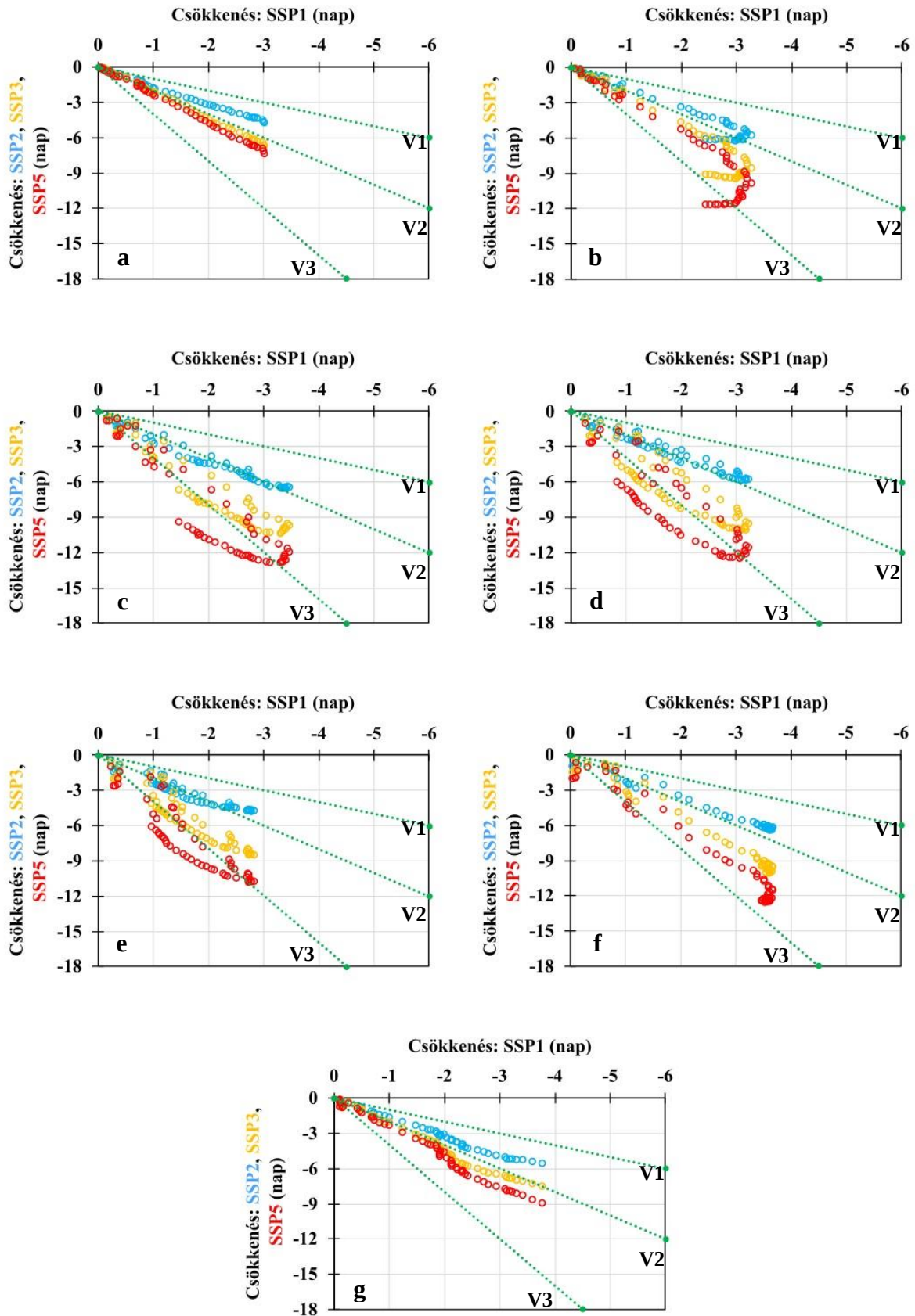
20. ábra: A fagyos napok számának várható havi változása a 2081–2100 időszakra a négy SSP-szcenárió alapján az é.sz. 52,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

● SSP1-2.6 ● SSP2-4.5 ● SSP3-7.0 ● SSP5-8.5

A szcenáriók összehasonlításánál szembeűnő (21. ábra), hogy a téli hónapokban a két nagyobb sugárzási kényszer változással számoló szcenárió, vagyis az SSP3-7.0 és az SSP5-8.5, illetve a legkisebb kényszerrel számoló SSP1-2.6 közötti összefüggések nem egyértelműek. Például a decemberi diagramot tekintve (21.c ábra) a pontok egy része követi az SSP1-hez képest négyszeres változást mutató szaggatott vonal lineáris egyenesét, míg más pontok egy kisebb meredekségű, de szintén lineáris egyenest követnek a V3-mal jelzett vonaltól balra. Ugyanezek a pontok az SSP3-7.0 esetén a -7-től -10 napos tartományt fedik le. A szcenáriók közti, egy adott metszeten belüli eltérő relációk már korábban is felmerültek, mégpedig az é.sz. 47,5° szélesség esetén a TX35 indexre. A jelenség oka most is hasonló: a metszetet két rövidebb keleti és nyugati részmetszetre osztva kirajzolódik, hogy a metszet

nyugati részéhez tartozó rácspontok követik a V3-mal jelölt lineáris egyenest, míg a keleti részhez tartozó rácspontok a kisebb meredekségű lineáris egyenes mentén helyezkednek el.



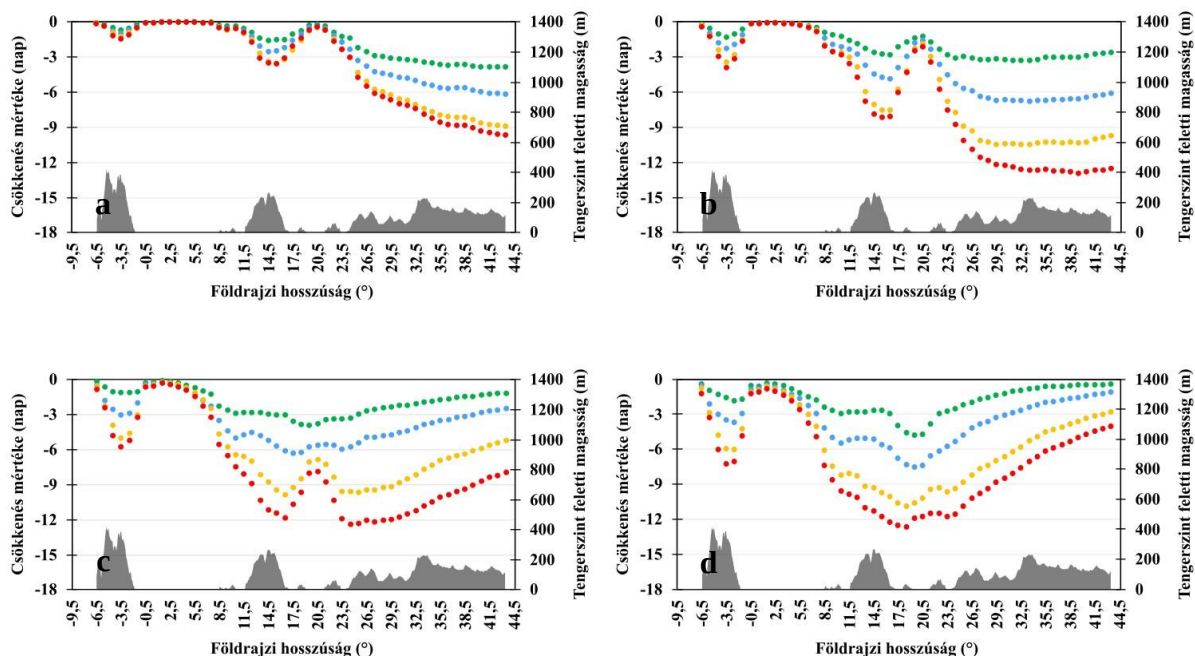
21. ábra: A fagyos napok számának 2081–2100 időszakra várható havi változására az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 scenárióra kapott értékek az SSP1-2.6 forgatókönyvre kapott értékek függvényében az é.sz. 52,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

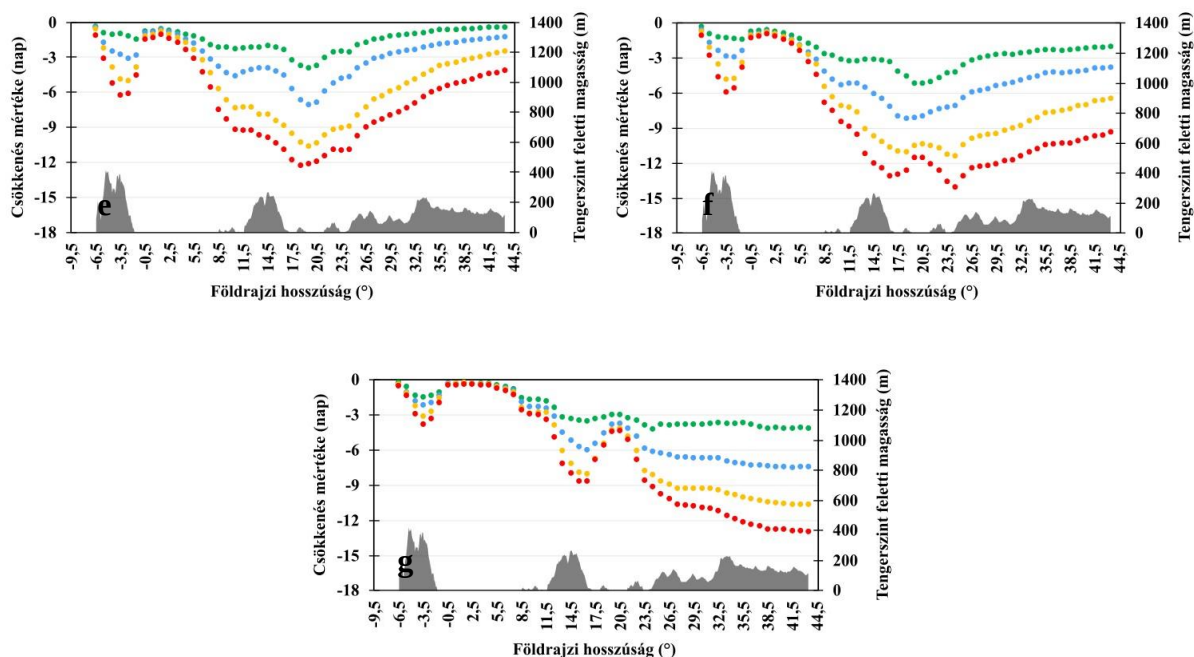
a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

V1: $1 \cdot \text{SSP1}$, V2: $2 \cdot \text{SSP1}$, V3: $4 \cdot \text{SSP1}$

3.2.4. Elemzés az é.sz. 57,5° metszetre

Az é.sz. 57,5°-os metszet területén – hasonlóan az é.sz. 52,5°-os metszethez – jelentős csökkenés várható a fagyos napok havi számában (22. ábra). Akár -14 nap is lehet a változás márciusban (22.f ábra) az SSP5-8.5 scenárió alapján. A metszet hasonló jellegű, mint az é.sz. 52,5°-os metszet, leszámítva azt, hogy itt sokkal nagyobb kiterjedésű vízfelületek is megtalálhatóak, mint például az Északi-tenger vagy a Balti-tenger. Ezek a vízfelületek jól beazonosíthatóak például a decemberi menetek alapján az SSP3-7.0 és SSP5-8.5 scenáriókra. A magassági értékek rendre 400 m alatt maradnak (F8. ábra), így domborzati hatásról érdemben nem beszélhetünk, míg a kontinentális hatás áprilisban és októberben jellemző leginkább, ekkor ugyanis minél keletebbre haladunk, annál nagyobb csökkenés várható az FD havi értékében.



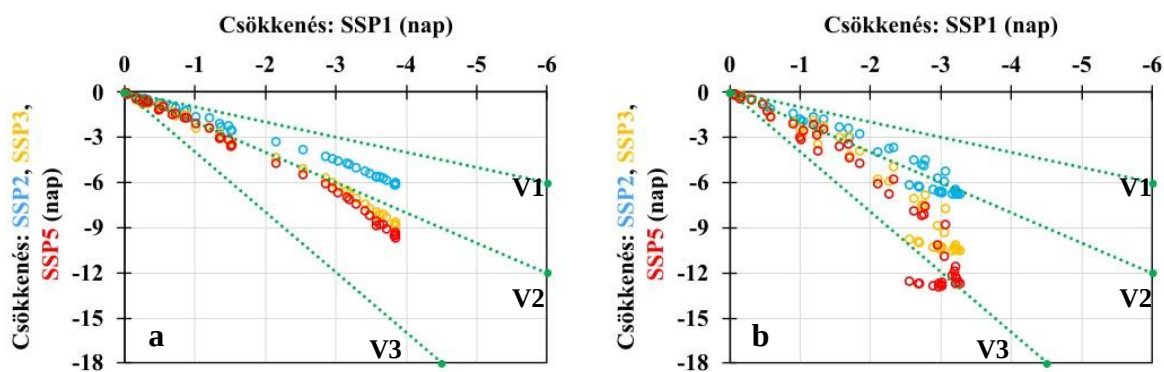


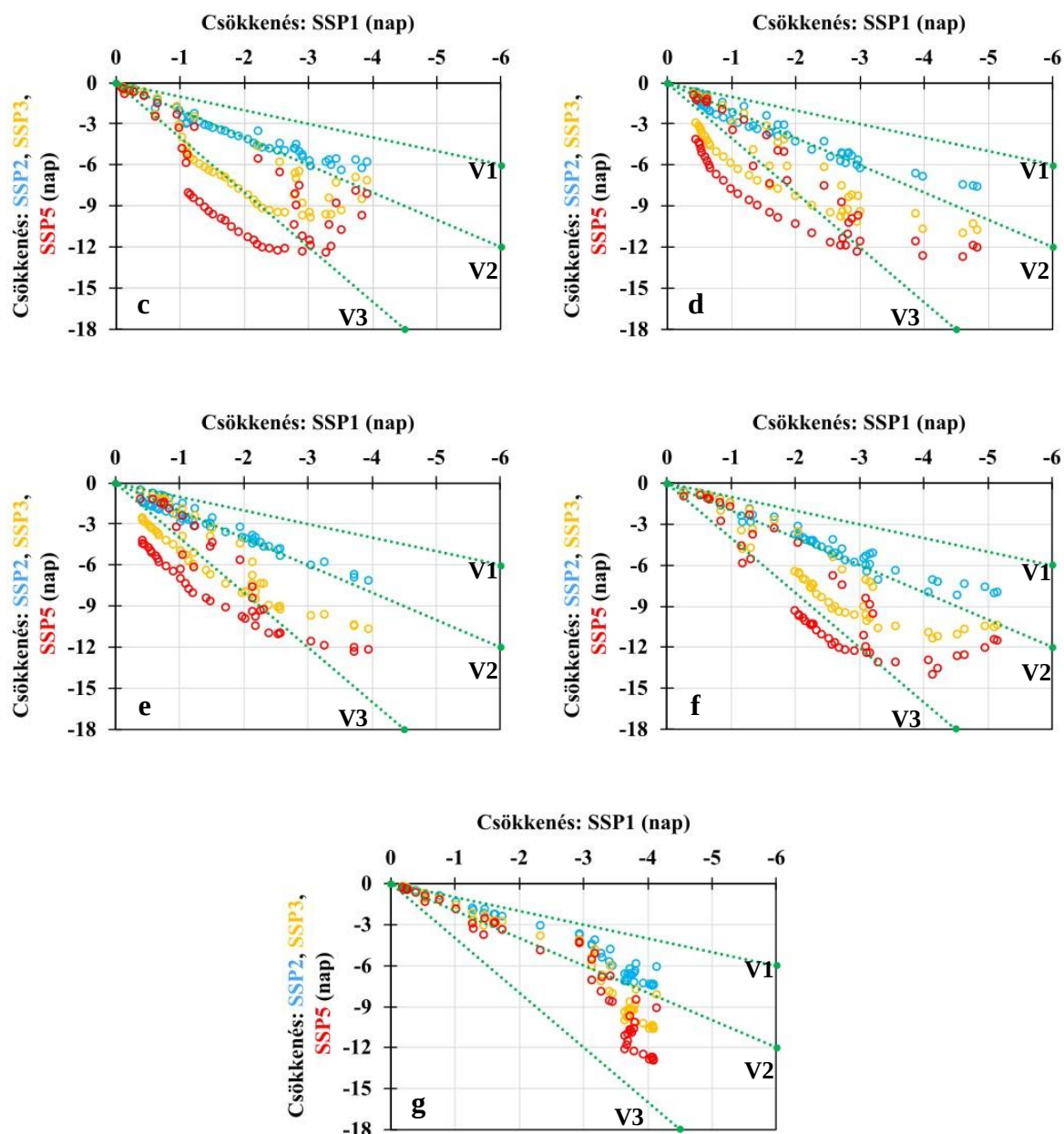
22. ábra: A fagyos napok számának várható havi változása a 2081–2100 időszakra a négy SSP-szenárió alapján az é.sz. 57,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

● SSP1-2.6 ● SSP2-4.5 ● SSP3-7.0 ● SSP5-8.5

A scenáriók összevetésében még markánsabban látszik az é.sz. 52,5° metszet esetén is megjelenő kettéosztottság, ami a pontok elhelyezkedéséből fakad (23. ábra). A keleti részmetszet pontjai fedik le a V3-as vonaltól balra elhelyezkedő ponthalmazt, míg a nyugati részmetszet a V3-as vonaltól jobbra elhelyezkedőt. Fontos azonban, hogy az utóbbi csoport tagjai nem követik olyan szabályosan a rájuk illeszthető regressziós egyenest, mint az é.sz. 52,5° metszet esetén. Ez abból fakad, hogy sokkal változatosabban helyezkednek el a vízfelületek és a szárazföldi felszínek ezen a részmetszeten, és így a pontok is eltérően viselkednek egymáshoz képest.





23. ábra: A fagyos napok számának 2081–2100 időszakra várható havi változására az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 szcenárióra kapott értékek az SSP1-2.6 forgatókönyvre kapott értékek függvényében az é.sz. 57,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

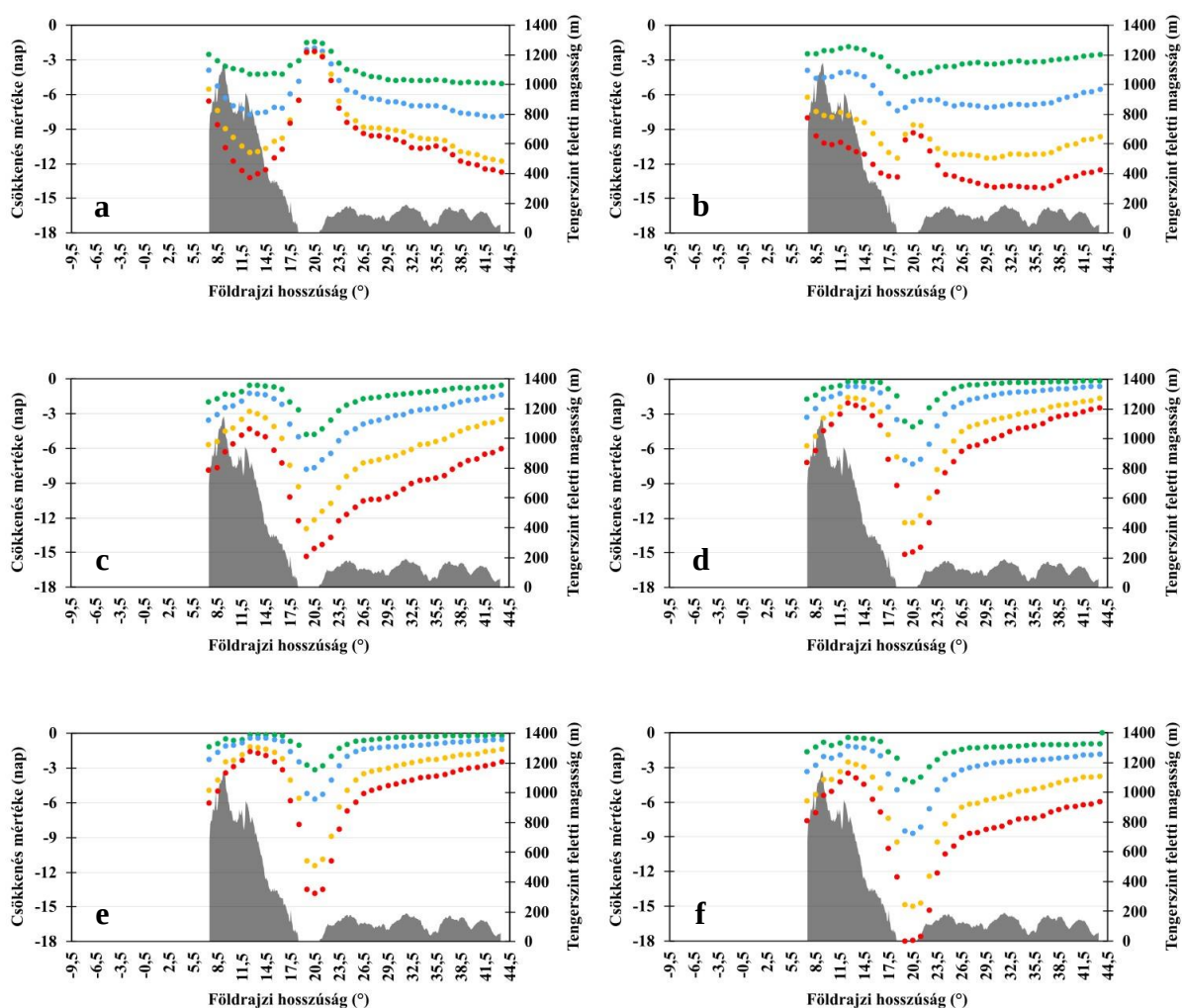
a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

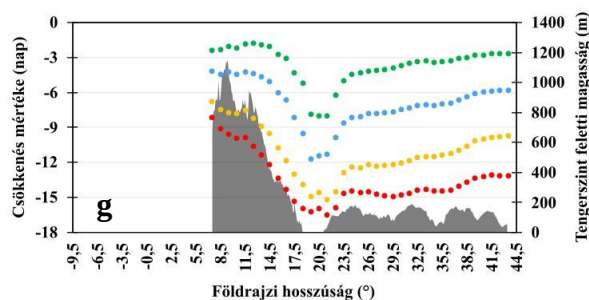
V1: $1 \cdot \text{SSP1}$, V2: $2 \cdot \text{SSP1}$, V3: $4 \cdot \text{SSP1}$

3.2.5. Elemzés az é.sz. 62,5° metszetre

Az é.sz. 62,5°-os metszet nem szerepelt a TX35-ről szóló elemzésünkben, mivel még az SSP5-8.5 projekciói alapján sem várható jelentős számú forró nap ezen a területen. A fagyos napok száma azonban – éppen ellenkezőleg – a globális felmelegedés hatására nagy

valószínűséggel folytatkozni fog a 2081–2100-as időszakra (24. ábra), mivel a referencia-időszak során minden hónapban ezen a metszeten volt a legtöbb fagyos nap. Az abszolút legnagyobb várható csökkenés 18 nap márciusban (24.f ábra), ennél nagyobb változást egyik másik metszet esetén sem jeleznek a projekciók. A téli értékek alapvetően hasonlóak a márciusiakhoz, a legnagyobb változás rendre a Botteni-öbölhöz köthető, melynek oka annak zártsága, illetve az ekkor fennálló jégborítás megszűnése lehet (Christensen et al. 2015). Októberben és novemberben minimális a fagyos napok számának csökkenése, de egyes szárazföldi területeken még így is elérheti a -14 napot a becült változás.



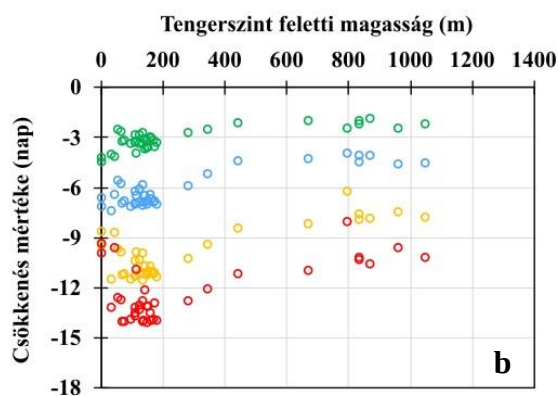
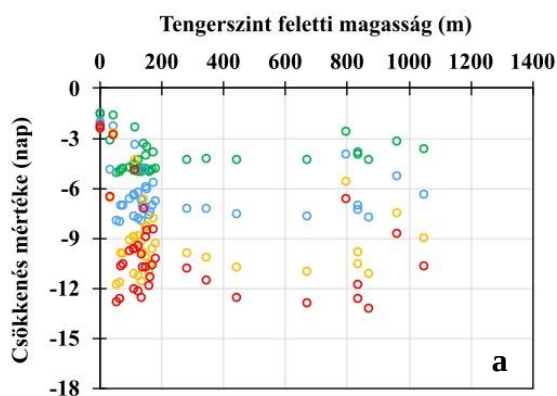


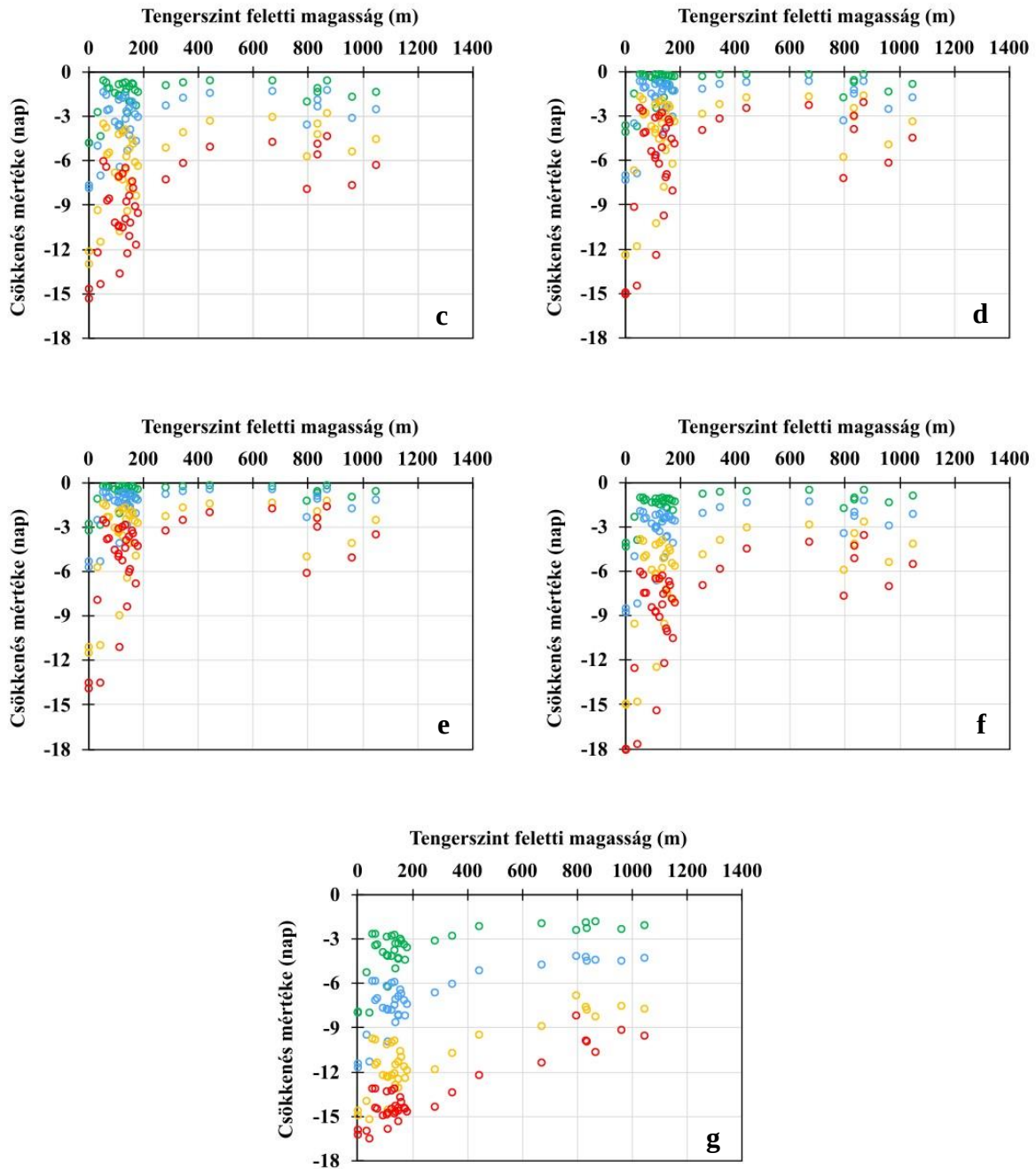
24. ábra: A fagyos napok számának várható havi változása a 2081–2100 időszakra a négy SSP-szenárió alapján az é.sz. 62,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

● SSP1-2.6 ● SSP2-4.5 ● SSP3-7.0 ● SSP5-8.5

Az é.sz. 52,5°-os és é.sz. 57,5°-os metszetekkel ellentétben az é.sz. 62,5° áthalad a Skandináv-hegységen, így a domborzat is fontos éghajlatalakító tényező (25. ábra). A november–április időszakban látható, hogy 0–200 m-ig tartó magasságokhoz tartozik a legnagyobb becsült csökkenés (maximálisan 18 nap). Ehhez képest a hegység területén, 700 m és 1100 m tengerszint feletti magasságok között a csökkenés akár ennek felére is visszaesik (maximálisan 9 nap). A 200–500 m-es tartományban azonban még ennél is kisebb csökkenés figyelhető meg, ezek a rácsponatok Finnország keleti részéhez tartoznak. A téli félév többi hónapjával ellentétesen, a legnagyobb tengerszint feletti magasságokhoz tartozik a legnagyobb csökkenés is októberben. Ennek az oka, hogy a referencia-időszakban ezen a területen jelentkezett a legtöbb fagyos nap a téli félév legelején, ami miatt a várható változás mértéke is itt a legnagyobb.



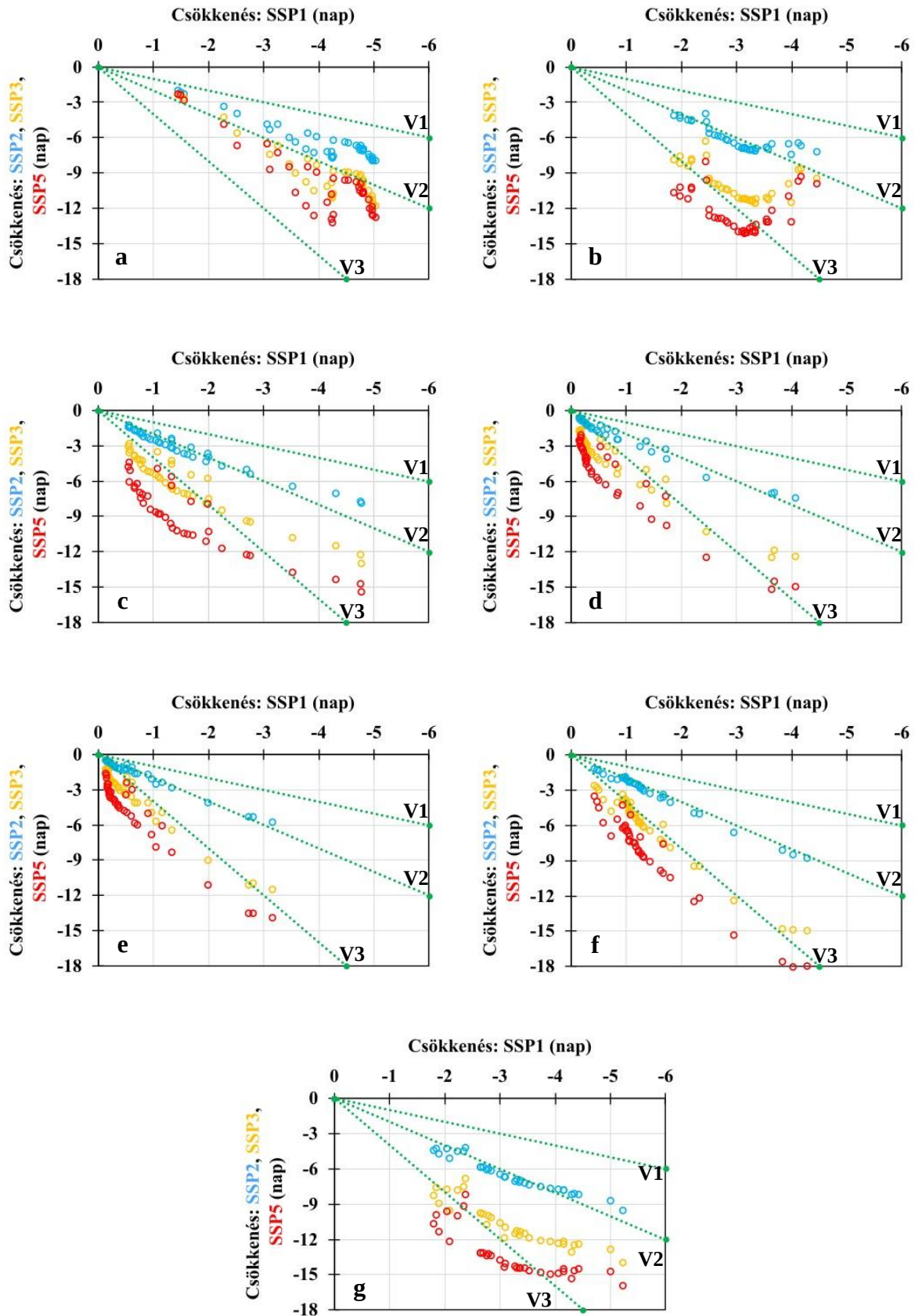


25. ábra: A fagyos napok számának várható havi változása tengerszint feletti magasságuk alapján a 2081–2100 időszakra az é.sz. 62,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

A szcenáriók összehasonlításakor – az é.sz. 52,5° és é.sz. 57,5° metszetekkel ellentétben – a pontthalmazok jellemezhetőek egy adott meredekségű lineáris egyenes segítségével (26. ábra). Így a közös regressziós együtthatónak is van jelentősége, amely maximális a legnagyobb várható csökkenést mutató márciusban ($m = 2,1$; $m = 3,5$ és $m = 3,9$ rendre az SSP2-4.5,

SSP3-7.0 és SSP5-8.5 szcenáriók esetén) és minimális áprilisban ($m = 1,2$; $m = 1,2$ és $m = 0,96$, azonos sorrendben).



26. ábra: A fagyos napok számának 2081–2100 időszakra várható havi változására az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 scenárióra kapott értékek az SSP1-2.6 forgatókönyvre kapott értékek függvényében az é.sz. 62,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

V1: 1· SSP1, V2: 2· SSP1, V3: 4· SSP1

4. Összefoglalás

Kutatásunk során két extrém hőmérsékleti index (forró napok és fagyos napok) havi számának változását vizsgáltuk Európában, 5-5 szélességi metszeten. Ehhez az IPCC Interaktív Atlaszában elérhető CMIP6 modellszimulációs adatbázis adatait használtuk fel. A projekciók négy különböző forgatókönyv alapján álltak rendelkezésre, ezek az SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 scenáriók voltak.

A TX35 számát illetően a legnagyobb havi növekedés (18 nap az SSP5-8.5 scenárió alapján) az é.sz. 42,5°-os metszethez köthető, augusztus hónapban. Ezt az értéket az é.sz. 37,5°-os és 47,5°-os metszethez tartozó projekciók is megközelítik, 16 nappal. Jelentős növekedés várható még a nyári hónapokban az é.sz. 52,5°-os metszet keleti részén, míg az é.sz. 62,5°-os metszet esetén nem várható változás a TX35 értékében.

A FD esetén a legnagyobb havi csökkenés az é.sz. 62,5°-os metszethez köthető (18 nap az SSP5-8.5 scenárió esetén), március hónapban. Az é.sz. 57,5°, é.sz. 52,5° és é.sz. 47,5°-os metszetek rácspontjainak projekciói (legnagyobb csökkenés 13-14 nap) hasonlóak, míg az é.sz. 42,5°-os metszet esetén a csökkenés maximálisan 10 nap. Az é.sz. 37,5°-os metszet esetén nem várható jelentős változás az FD számában, mivel már a referencia-időszakban sem volt sok fagyos nap a területen.

A scenáriók összehasonlításában a legnagyobb változást mutató értékek rendre az SSP5-8.5 forgatókönyvhöz tartoznak, míg az SSP1-2.6 scenárió esetén kaptuk a legkisebb változásokat. Az SSP2-4.5 projekciói jellemzően 2-3-szorosai, az SSP3-7.0 projekciói 3-4-szeresei, míg az SSP5-8.5 projekciói 4-5-szöröse az SSP1-2.6 projekcióinak, ezek az összefüggések azonban egyes metszetek esetén akár metszeten belül is változhatnak. Ennek hátterében az áll, hogy egyes hónapokban az adott index értékei már a referencia-időszakban is magasak voltak. Az egyre növekvő sugárzási kényszer hatására a TX35 esetén egyre közelebb érünk az elvi felső határhoz, amelynél több 35 °C feletti maximumhőmérsékletű nap az adott hónapban már nem lehetséges. Az FD esetén pedig a sugárzási kényszer további növelésével sem érhető el nagyobb mértékű csökkenés a fagyos napok havi számában.

A változásokat befolyásoló hatások közül a szárazföldek és vízfelületek eltérő felmelegedése a legerősebb hatás, főként az é.sz. 37,5°-os és é.sz. 42,5°-os metszetek esetén, ahol a metszet területén jelentős kiterjedésű vízfelületek vannak. Az é.sz. 47,5°-os és 52,5°-os metszetek esetén a kontinentális hatás a legfontosabb éghajlatalakító tényező (amely közvetett módon szintén kapcsolható a vízfelszínhez, az attól való távolság révén). A domborzati hatás mindhárom közül a legkevésbé érvényesült az extrém hőmérsékletek tekintetében, főként a nagyobb vízfelszínekkel rendelkező metszetek esetén szorult háttérbe. Az FD esetén az é.sz. 62,5°-os, a TX35 esetén pedig az é.sz. 47,5°-os metszeteken látható jelentős domborzati hatás, főként a legnagyobb változást mutató hónapokban.

Végül a magyarországi rácspontokat európai kontextusban elemezve, a vizsgálatunk alapján a jövőbeni változásokat az extrém hőmérsékletekben elsősorban a kontinentális hatás, és az Alpokhoz viszonyított keleties helyzetünk befolyásolja. E kettő eredményeképpen mind a forró napok, mind a fagyos napok esetén jelentős változásokra számíthatunk. Ez a TX35 esetén maximálisan 11-13 napos növekedést jelent augusztusban az SSP5-8.5 szcenárió alapján, míg az FD-re 13 napos csökkenést decemberben és januárban.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat a K-129162 NKFI projekt, valamint az RRF-2.3.1-21-2022-00014 Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium támogatta. Köszönet az IPCC Interaktív Atlasznak az adatok elérhetőségéért.

Irodalomjegyzék

- Alvarez, I., Diaz-Poso, A., Lorenzo, M. N., Roye, D., 2024: Heat index historical trends and projections due to climate change in the Mediterranean basin based on CMIP6. *Atmospheric Research* 308, 107512. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107512>
- Beck, S., Mahony, M., 2018: The IPCC and the new map of science and politics. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 9(6), e547. <https://doi.org/10.1002/wcc.547>
- Cano Pecharroman, L., Hahn, C., 2024: Exposing disparities in flood adaptation for equitable future interventions in the USA. *Nature Communications* 15(1), 8333. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52111-0>
- Cardil, A., Molina, D. M., Kobziar, L. N., 2014: Extreme temperature days and their potential impacts on southern Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14, 3005–3014. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3005-2014>
- Christensen, O.B., Kjellström, E., Zorita, E., 2015: Projected Change—Atmosphere. In: The BACC II Author Team: Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Regional Climate Studies, Springer, Cham., 217–233. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1_11
- Cogato, A., Meggio, F., De Antoni Migliorati, M., Marinello, F., 2019: Extreme weather events in agriculture: A systematic review. *Sustainability* 11(9), 2547. <https://doi.org/10.3390/su11092547>
- Copernicus Climate Change Services (C3S), 2024: <https://climate.copernicus.eu/new-record-daily-global-average-temperature-reached-july-2024> Utolsó letöltés: 2024. 11. 17.
- Divinszki, F., 2023: A hőmérsékleti viszonyok zonális és meridionális irányú várható havi változásainak elemzése Európára a legújabb SSP-szenáriók alapján. TDK dolgozat (Témavezetők: Kis A., Pongrácz R.), ELTE, Budapest, 53p.
- Divinszki, F., Kis, A., Pongrácz, R., 2024: Hőmérsékleti extrémumok Európában várható alakulásának elemzése az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület Interaktív Atlasza alapján. *Légkör* 69(1), 25–32. <https://doi.org/10.56474/legkor.2024.1.4>
- Dosio, A., 2016: Projections of climate change indices of temperature and precipitation from an ensemble of bias-adjusted high-resolution EURO-CORDEX regional climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121(10), 5488–5511. <https://doi.org/10.1002/2015JD024411>
- Engdaw, M. M., Steiner, A. K., Hegerl, G. C., Ballinger, A. P., 2023: Attribution of observed changes in extreme temperatures to anthropogenic forcing using CMIP6 models. *Weather and Climate Extremes* 39, 100548. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100548>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E., 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Eyring, V., Gentine, P., Camps-Valls, G., Lawrence, D. M., Reichstein, M., 2024: AI-empowered next-generation multiscale climate modelling for mitigation and adaptation. *Nature Geoscience*, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01527-w>

- Fan, X., Duan, Q., Shen, C., Wu, Y., Xing, C., 2020: Global surface air temperatures in CMIP6: Historical performance and future changes. *Environmental Research Letters* 15(10), 104056. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb051>
- Gallo, E., Quijal-Zamorano, M., Méndez Turrubiates, R.F., Tonne, C., Basagaña, X., Achebak, H., Ballester, J., 2024: Heat-related mortality in Europe during 2023 and the role of adaptation in protecting health. *Nature Medicine*, 1–5. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03186-1>
- Gutiérrez, J.M., Jones, R.G., Narisma, G.T., Alves, L.M., Amjad, M., Gorodetskaya, I.V., Grose, M., Klutse, N.A.B., Krakovska, S., Li, J., Martínez-Castro, D., Mearns, L.O., Mernild, S.H., Ngo-Duc, T., van den Hurk, B., Yoon, J.-H., 2021: Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V. Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. Interactive Atlas available from <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- Ishizaki, N.N., Shiogama, H., Hanasaki, N., Takahashi, K., 2022: Development of CMIP6-based climate scenarios for Japan using statistical method and their applicability to heat-related impact studies. *Earth and Space Science* 9(11), e2022EA002451. <https://doi.org/10.1029/2022EA002451>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14, 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- King, A. D., Knutti, R., Uhe, P., Mitchell, D. M., Lewis, S. C., Arblaster, J. M., Freychet, N., 2018: On the Linearity of Local and Regional Temperature Changes from 1.5°C to 2°C of Global Warming. *Journal of Climate* 31, 7495–7514. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0649.1>
- Kreienkamp, F., Lorenz, P., Geiger, T., 2020: Statistically downscaled CMIP6 projections show stronger warming for Germany. *Atmosphere* 11(11), 1245. <https://doi.org/10.3390/atmos11111245>
- Lee, S., Zhao, J., 2021: Adaptation to climate change: Extreme events versus gradual changes. *Journal of Economic Dynamics and Control* 133, 104262. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2021.104262>
- Lesnikowski, A., Ford, J., Biesbroek, R., Berrang-Ford, L., 2016: National-level progress on adaptation. *Nature Climate Change* 6(3), 261–264. <https://doi.org/10.1038/nclimate2863>
- Lorenz, R., Stalhandske, Z., Fischer, E. M., 2019: Detection of a climate change signal in extreme heat, heat stress, and cold in Europe from observations. *Geophysical Research Letters* 46(14), 8363–8374. <https://doi.org/10.1029/2019GL082062>
- Lüthi, S., Fairless, C., Fischer, E. M., Scovronick, N., Armstrong, B., Coelho, M. D. S. Z. S., Guo, Y. L., Guo, Y., Honda, Y., Huber, V., Kysely, J., Lavigne, E., Royé, D., Rytí, N., Silva,

S., Urban, A., Gasparrini, A., Bresch, D. N., Vicedo-Cabrera, A. M., 2023: Rapid increase in the risk of heat-related mortality. *Nature Communications* 14(1), 4894.

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-40599-x>

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., Solecki, W., 2017: The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180.

<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>

Palmer, T. E., Booth, B. B. B., McSweeney, C. F., 2021: How does the CMIP6 ensemble change the picture for European climate projections? *Environmental Research Letters* 16(9), 094042. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1ed9>

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L. A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., Tavoni, M., 2017: The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T., Woznicki, S. A., 2017: Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management* 16, 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>

Schaeffer, R., Szklo, A. S., de Lucena, A. F. P., Borba, B. S. M. C., Nogueira, L. P. P., Fleming, F. P., Troccoli, A., Harrison, M., Boulahya, M. S., 2012: Energy sector vulnerability to climate change: A review. *Energy* 38(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.056>

Srivastava, A. K., Wehner, M., Bonfils, C., Ullrich, P. A., Risser, M., 2024: Local hydroclimate drives differential warming rates between regular summer days and extreme hot days in the Northern Hemisphere. *Weather and Climate Extremes* 45, 100709.

<https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100709>

Sulikowska, A.; Wypych, A., 2021: Seasonal Variability of Trends in Regional Hot and Warm Temperature Extremes in Europe. *Atmosphere* 12(5), 612.

<https://doi.org/10.3390/atmos12050612>

Tan-Soo, JS., Qin, P., Quan, Y., Li, J., Wang, X., 2024: Using cost–benefit analyses to identify key opportunities in demand-side mitigation. *Nature Climate Change*, 1–7.

<https://doi.org/10.1038/s41558-024-02146-4>

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A., 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 485–498.

<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>

Tebaldi, C., Knutti, R., 2018: Evaluating the accuracy of climate change pattern emulation for low warming targets. *Environmental Research Letters* 13(5), 055006.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabef2>

van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith,

S. J., Rose, S. K., 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

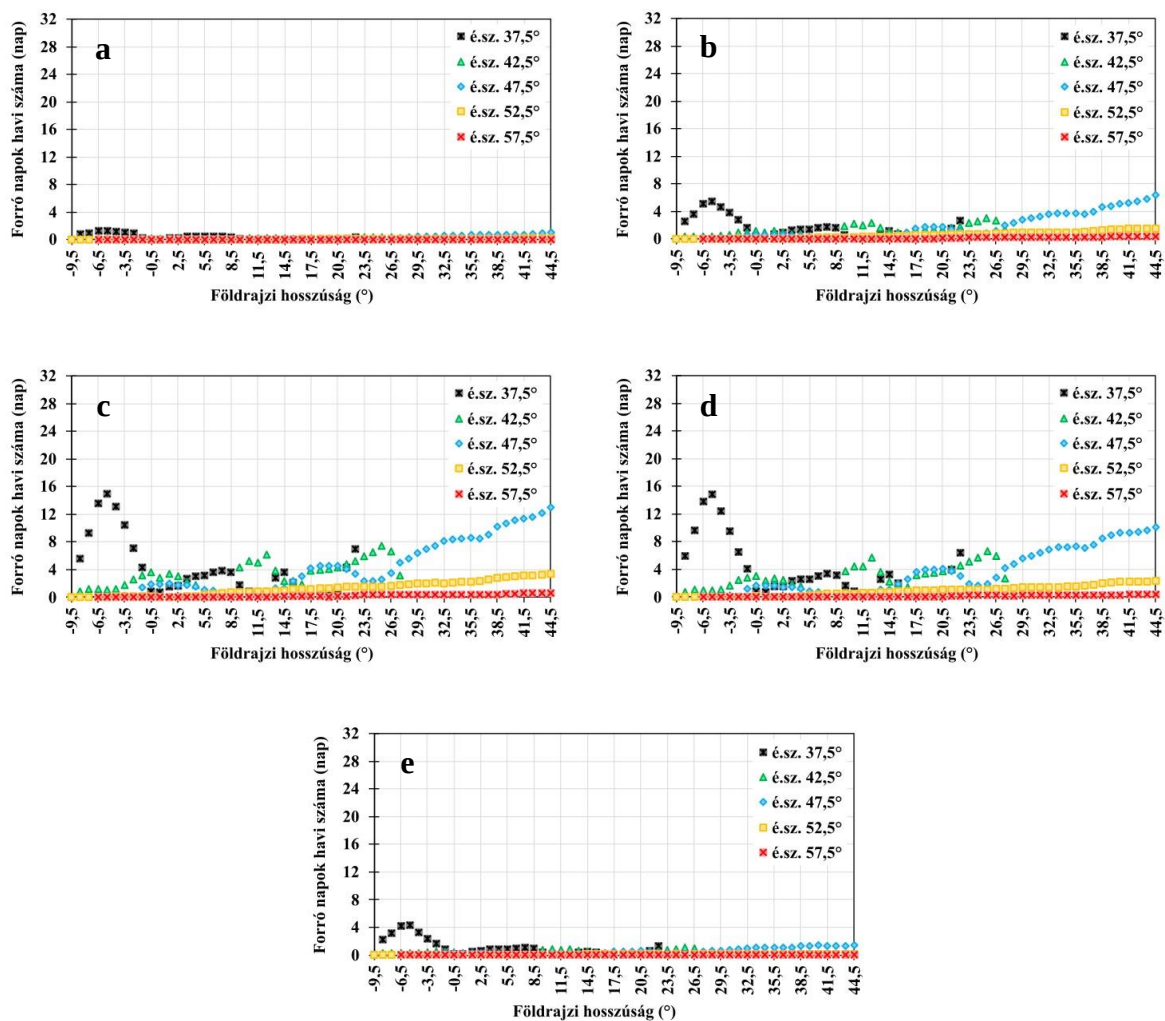
WMO, 2024: State of the Global Climate in 2023. WMO-No. 1347. 53p. ISBN: 978-92-63-11347-4

Wobus, C., Zarakas, C., Malek, P., Sanderson, B., Crimmins, A., Kolian, M., Sarofim, M., Weaver, C. P., 2018: Reframing future risks of extreme heat in the United States. *Earth's future* 6(9), 1323–1335. <https://doi.org/10.1029/2018EF000943>

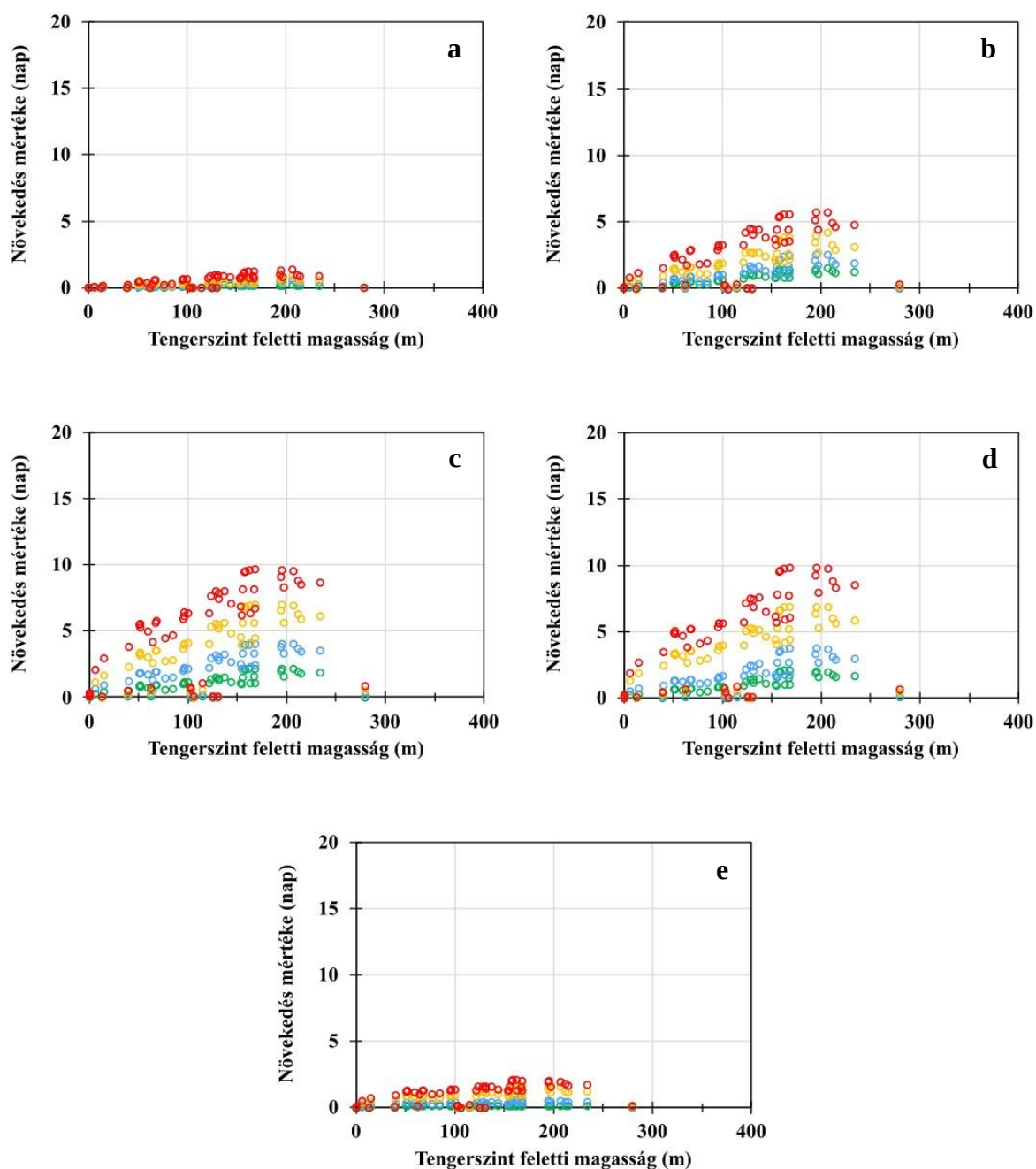
Függelék

Modellszimulációk	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP3-7.0		SSP5-8.5	
ACCESS-CM2_r1i1p1f1	O		O		O		O	
ACCESS-ESM1-5_r1i1p1f1	O		O		O		O	
AWI-CM-1-1-MR_r1i1p1f1	O		O		O		O	
BCC-CSM2-MR_r1i1p1f1	O		O		O		O	
CanESM5_r1i1p1f1	O		O		O		O	
CNRM-CM6-1_r1i1p1f2	O		O		O		O	
CNRM-CM6-1-HR_r1i1p1f2	O		X		X		O	
CNRM-ESM2-1_r1i1p1f2	O		O		O		O	
EC-Earth3_r1i1p1f1	O		O		O		O	
EC-Earth3-Veg_r1i1p1f1	O		O		O		O	
EC-Earth3-Veg-LR_r1i1p1f1	X		O		O		X	
FGOALS-g3_r1i1p1f1	O		O		O		O	
GFDL-CM4_r1i1p1f1	X		O		X		O	
GFDL-ESM4_r1i1p1f1	O		O		O		O	
HadGEM3-GC31-LL_r1i1p1f3	O		O		X		O	
INM-CM4-8_r1i1p1f1	O		O		O		O	
INM-CM5-0_r1i1p1f1	O		O		O		O	
IPSL-CM6A-LR_r1i1p1f1	O		O		O		O	
KACE-1-0-G_r2i1p1f1	O		O		O		O	
KIOST-ESM_r1i1p1f1	O	X	O	X	X		O	X
MIROC-ES2L_r1i1p1f2	O		O		O		O	
MIROC6_r1i1p1f1	O		O		O		O	
MPI-ESM1-2-HR_r1i1p1f1	O		O		O		O	
MPI-ESM1-2-LR_r1i1p1f1	O		O		O		O	
MRI-ESM2-0_r1i1p1f1	O		O		O		O	
NESM3_r1i1p1f1	O		O		X		O	
NorESM2-MM_r1i1p1f1	O		O		O		O	
UKESM1-0-LL_r1i1p1f2	O		O		O		O	

F1. táblázat: Az IA-ban elérhető adatokhoz (multi-modell átlagok) futtatott modellszimulációk felhasznált scenárió szerinti csoportosítása. Az indexek közötti különbség, hogy a KIOST-ESM_r1i1p1f1 modellt csak a TX35 indexre, az SSP1-2.6, SSP2-4.5 és SSP5-8.5 scenáriók esetén használták fel, míg az FD indexre egyáltalán nem.

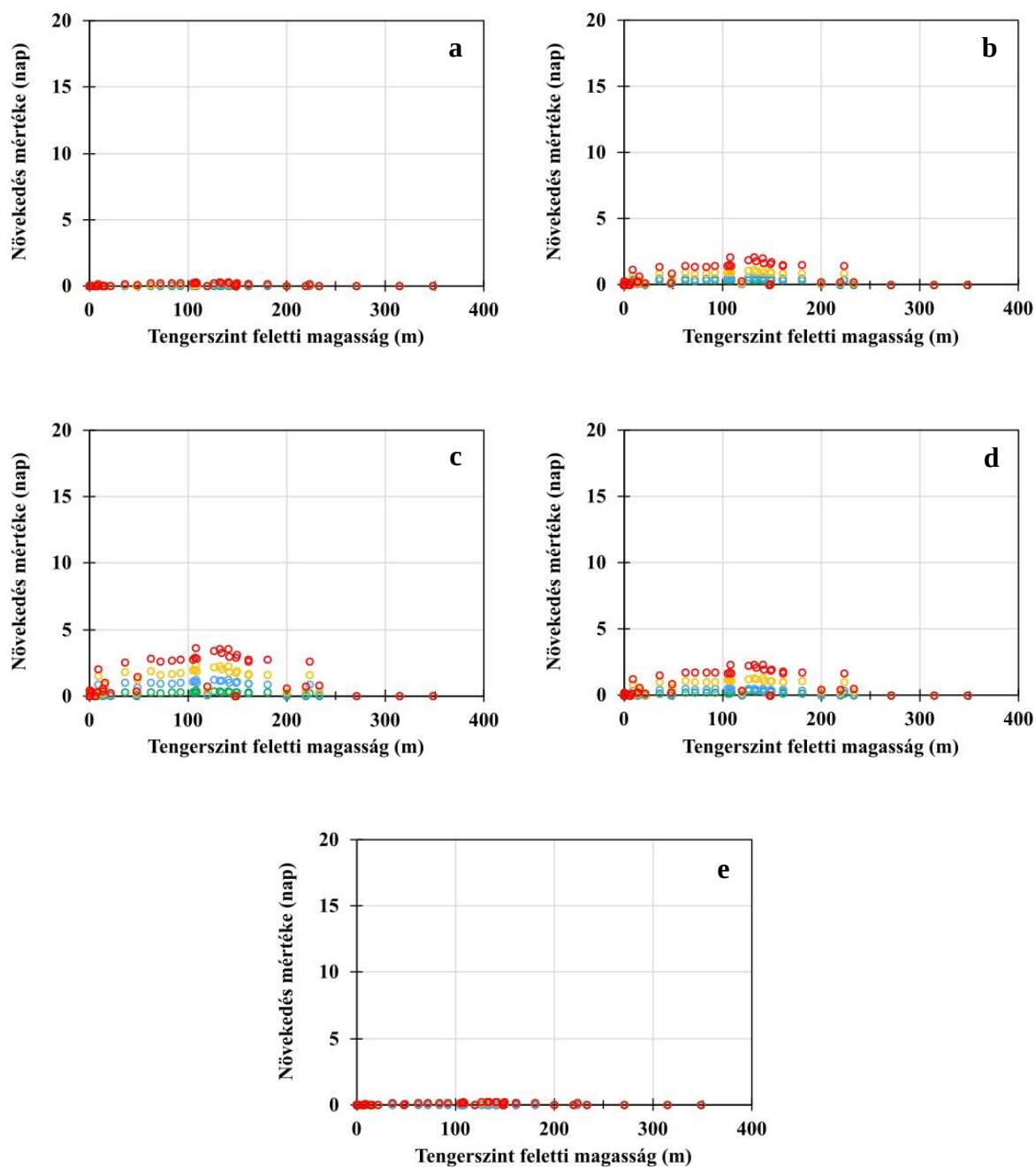


F1. ábra: A forró napok átlagos havi száma az 1995–2014-es referencia-időszakra a vizsgált metszetek esetén: a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember



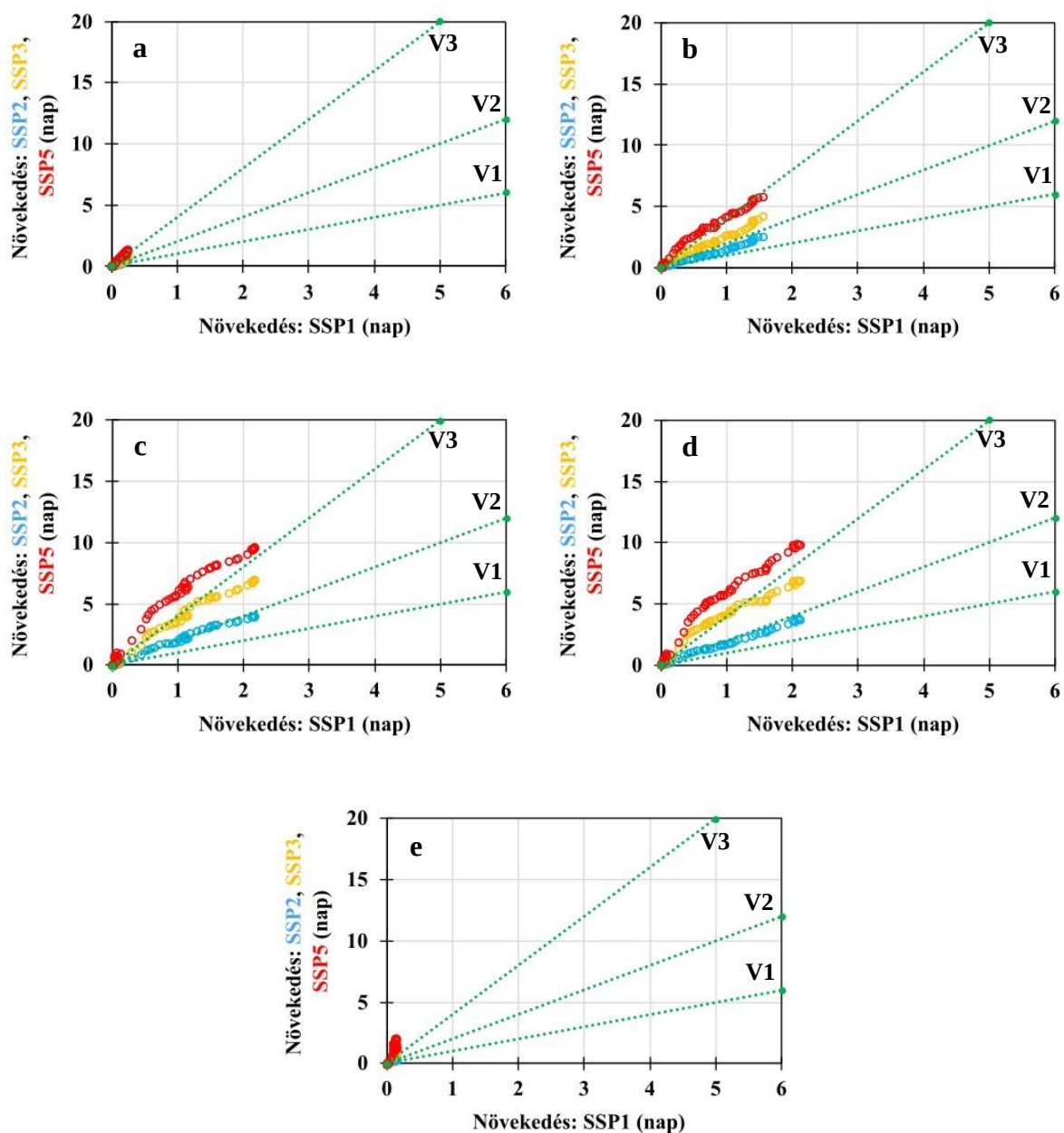
F2. ábra: A forró napok számának várható havi változása tengerszint feletti magasságuk alapján a 2081–2100 időszakra az é.sz. 52,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember



F3. ábra: A forró napok számának várható havi változása tengerszint feletti magasságuk alapján a 2081–2100 időszakra az é.sz. 57,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

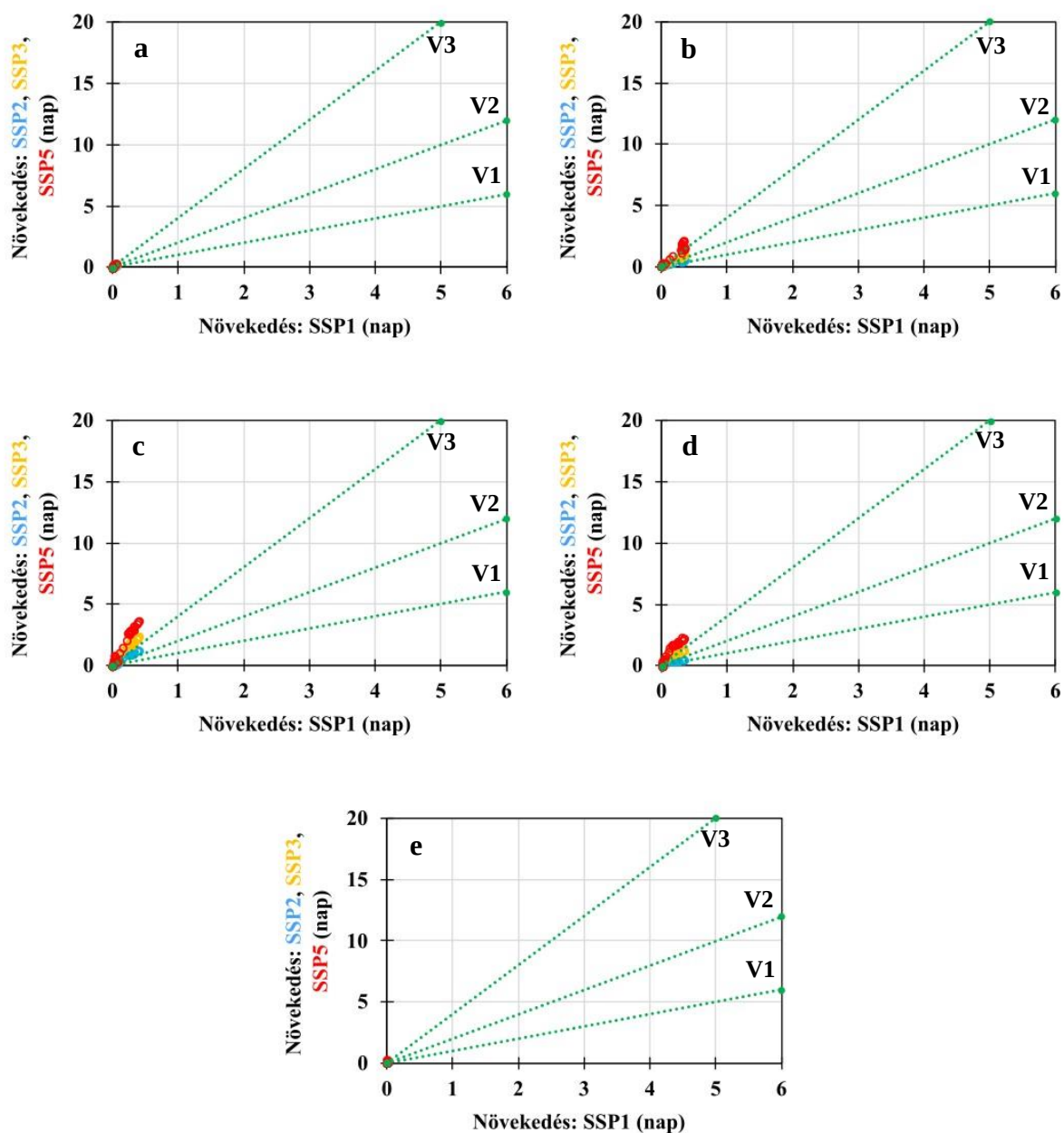
a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember



F4. ábra: A forró napok számának 2081–2100 időszakra várható havi változására az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 scenárióra kapott értékek az SSP1-2.6 forgatókönyvre kapott értékek függvényében az é.sz. 52,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

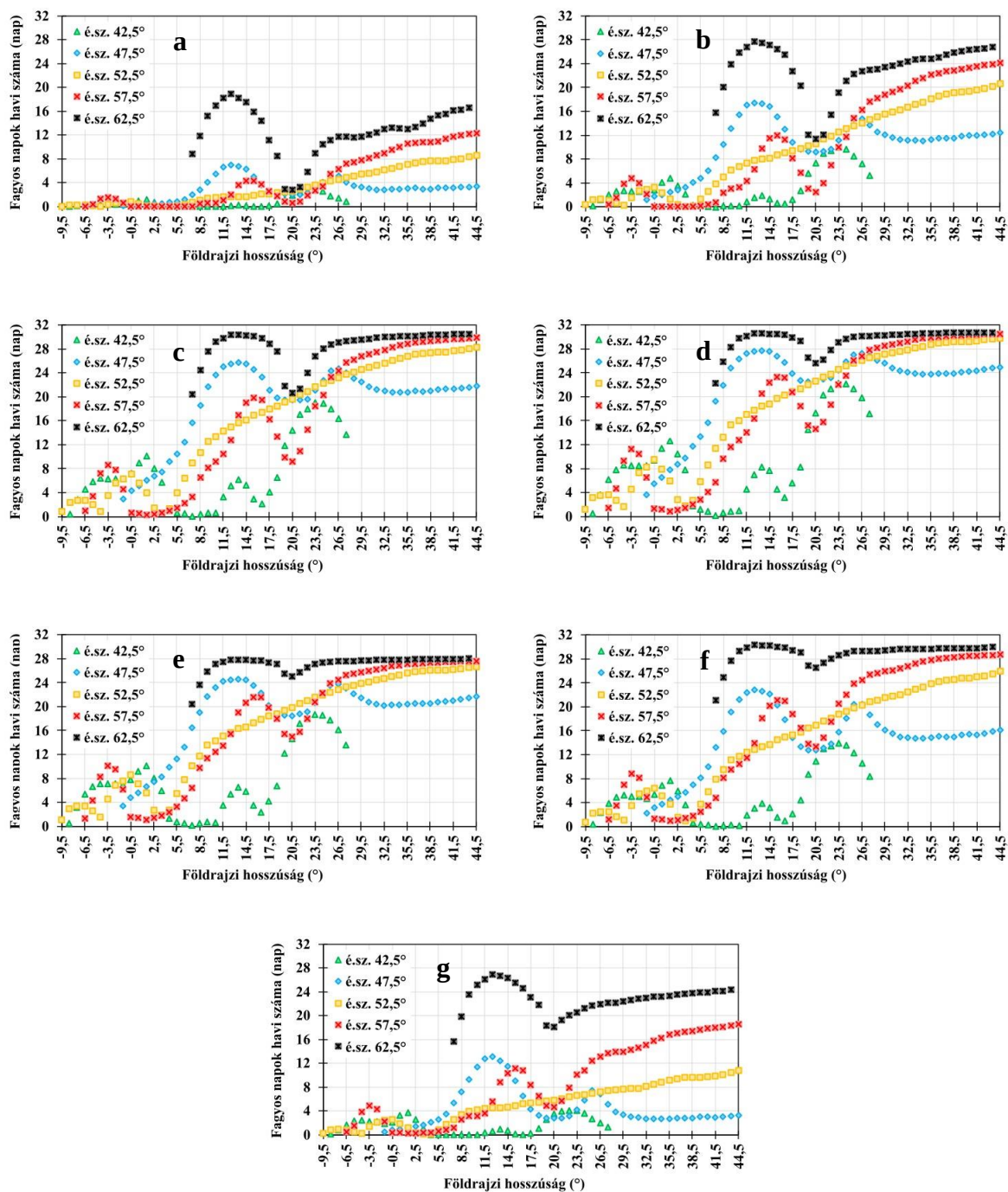
V1: $1 \cdot \text{SSP1}$, V2: $2 \cdot \text{SSP1}$, V3: $4 \cdot \text{SSP1}$



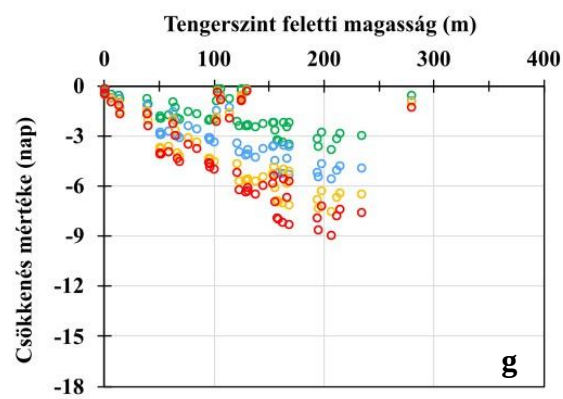
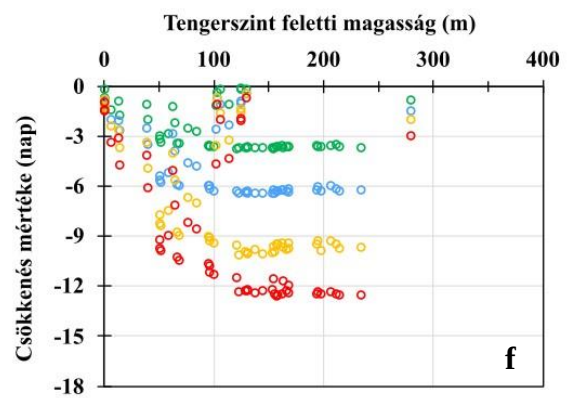
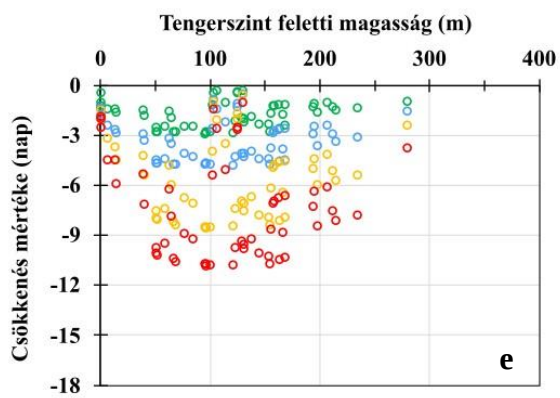
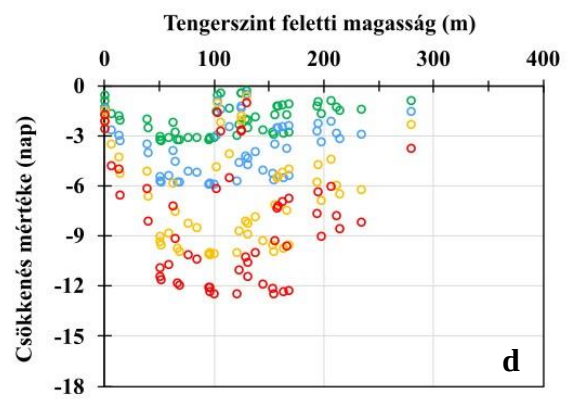
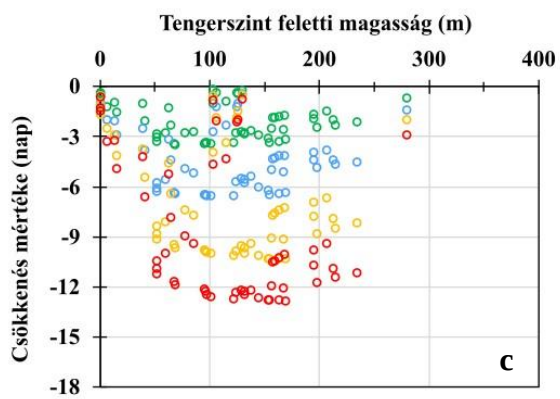
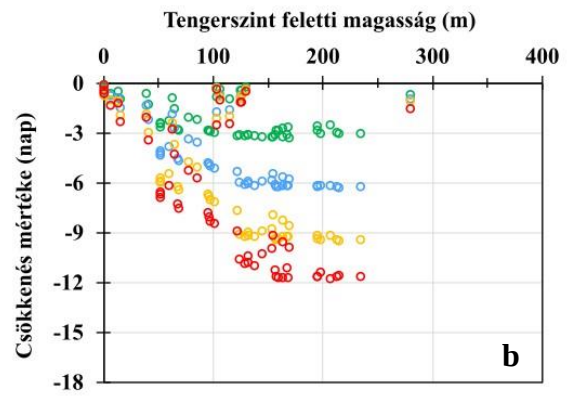
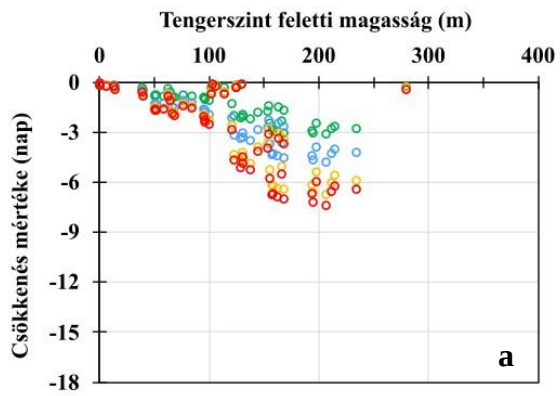
F5. ábra: A forró napok számának 2081–2100 időszakra várható havi változására az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 scenárióra kapott értékek az SSP1-2.6 forgatókönyvre kapott értékek függvényében az é.sz. 57,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) május, b) június, c) július, d) augusztus, e) szeptember

V1: $1 \cdot \text{SSP1}$, V2: $2 \cdot \text{SSP1}$, V3: $4 \cdot \text{SSP1}$

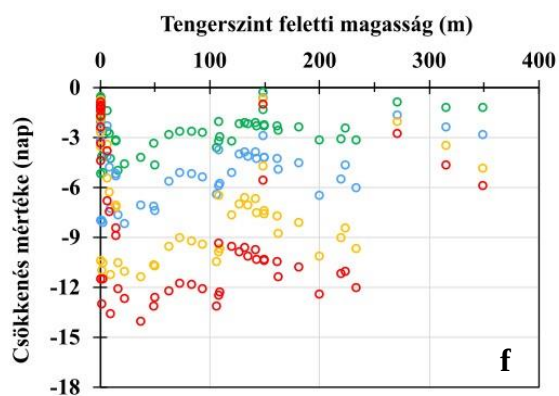
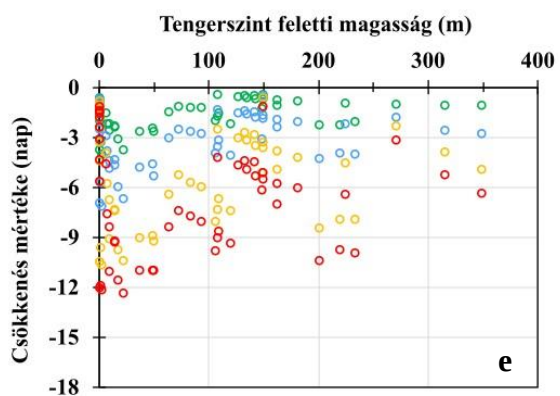
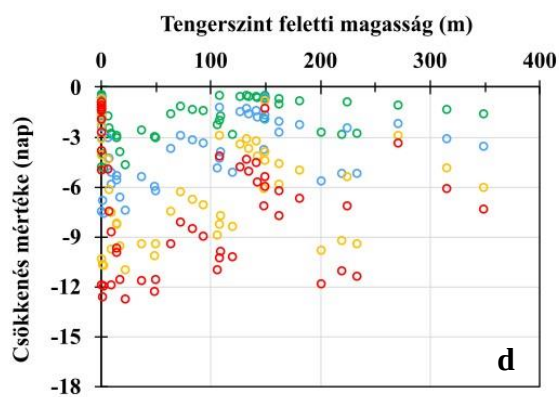
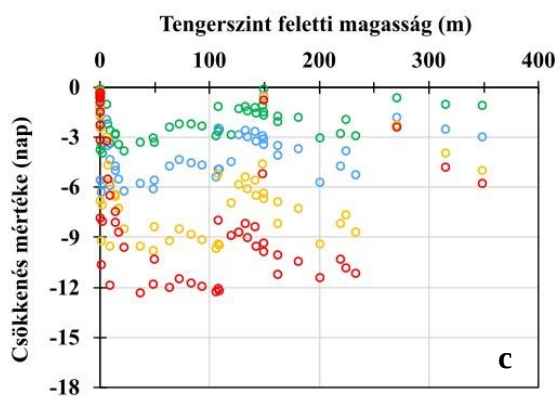
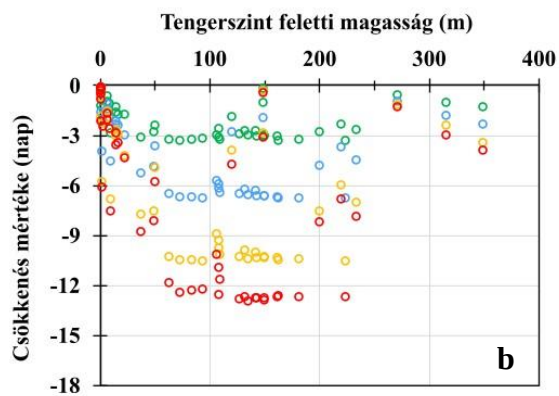
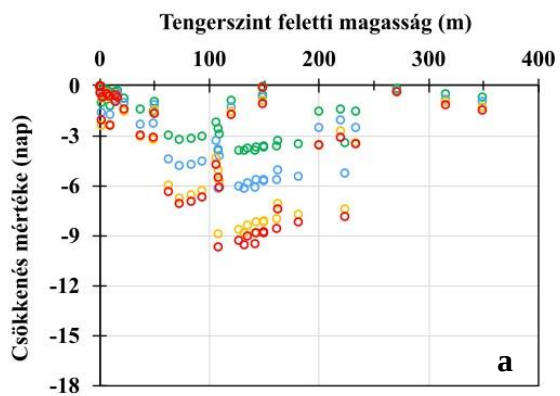


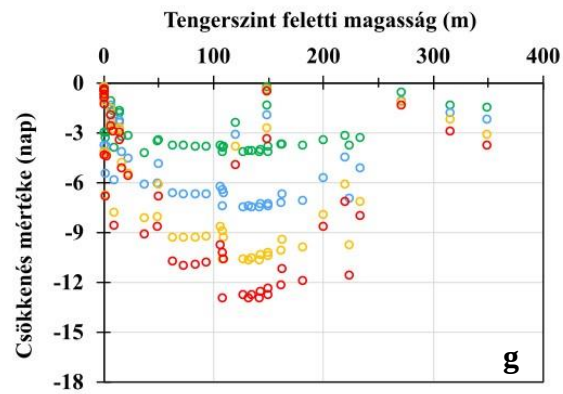
F6. ábra: A fagyos napok átlagos havi száma az 1995–2014-es referencia-időszakra a vizsgált metszetek esetén: a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március



F7. ábra: A fagyos napok számának várható havi változása tengerszint feletti magasságuk alapján a 2081–2100 időszakra az é.sz. 52,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április





F8. ábra: A fagyos napok számának várható havi változása tengersizint feletti magasságuk alapján a 2081–2100 időszakra az é.sz. 57,5° mentén (referencia-időszak: 1995–2014).

a) október, b) november, c) december, d) január, e) február, f) március, g) április

Saját eredmények

-A dolgozatban alapvetően három kérdésre fókuszáltam:

- (1) Milyen területi mintázatok fogják jellemezni az extrém hőmérsékleteket Európában a 21. század végén?
- (2) Milyen változások lépnek fel a referencia-időszakhoz képest, és mi a szerepe az egyes scenárióknak ezekben a változásokban?
- (3) Mely földrajzi hatások jelentősek a változások formálásában a kontinens egyes részein?

-Célom volt ezeket a kérdéseket a legfrissebb modellszimulációk segítségével megválaszolni, ehhez az IPCC Interaktív Atlaszáról a CMIP6 modellszimulációs adatbázis adatait töltöttem le. -Az adatokat négy jövőbeni klímaszenárióra kértem le, két éghajlati extrém indexre, a forró napok (TX35) és a fagyos napok (FD) számára vonatkozóan. Ezután a CDO szoftver segítségével a globális méretű szimulációs eredményeket leválasztottam az Európában kiválasztott szélességi metszetekre.

-Az adatok elemzését és ábrázolását Microsoft Excel és Inkscape szoftverek segítségével végeztem, a statisztikai számításokhoz szintén Microsoft Excel-t használtam.

-Saját eredménynek tekinthető tehát az általam letöltött nyers adatok formázása, leválasztása, az így kapott adattömbök ábrázolása és ezek alapján az elemzés elkészítése.