

NYILATKOZAT

Név: Bordi Sára

ELTE Természettudományi Kar, szak: Meteorológus MSc


NEPTUN azonosító: TS7XT5

Diplomamunka címe:

Extrém széllal kapcsolatos összetett események várható jövőbeli alakulása Magyarországon

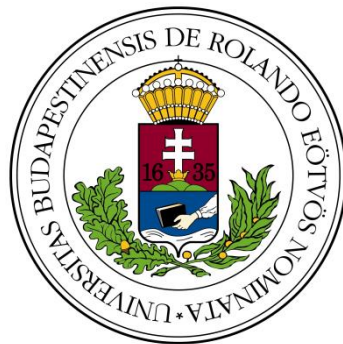
A **diplomamunka** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló szellemi alkotásom, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2023.05.28


a hallgató aláírása

Extrém széllal kapcsolatos összetett események várható jövőbeli alakulása Magyarországon

DIPLOMAMUNKA
METEOROLÓGUS MESTERSZAK
IDŐJÁRÁS-ELŐREJELZŐ SPECIALIZÁCIÓ



Készítette:
Bordi Sára

Témavezető:
Dr. Pongrácz Rita
ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2023

Tartalomjegyzék

1. Bevezető	2
2. Irodalmi áttekintés.....	4
2.1 Ciklonokhoz kapcsolódó összetett extrém szél és extrém csapadék események	5
2.2 Összetett szeles-csapadékos extrém események hatásai	8
3. Adatok, módszertan.....	13
3.1 Megfigyelési adatok	13
3.2 Klímamodell szimulációk	14
3.3 Módszerek	16
4. Eredmények.....	20
4.1 Szélviharos napok az elmúlt 20 évben	20
4.2 Szélviharos napok a jövőben.....	24
4.3 Extrém csapadékos napok az elmúlt 20 évben	28
4.4 Összetett szeles-csapadékos események az elmúlt 20 évben	30
4.5 Összetett szeles-csapadékos események a jövőben	34
4.5.1 Jövőbeli trendek Magyarország északnyugati térségében.....	40
5. Összefoglalás	45
Köszönetnyilvánítás.....	48
Irodalomjegyzék	49
Függelék.....	53

1. Bevezető

A szélviharos időjárás gyakran felel súlyos károk kialakításáért, és éghajlattól, domborzattól függetlenül a bolygón bárhol előfordulhat. A lakott régiókban épületeket rongál meg, és az infrastruktúrában tesz kárt, a természetes környezetben pedig a növényzetre (például erdőkre) és az állatvilágra jelent veszélyt. Sok esetben az extrém szél nem önmagában jelentkezik, hanem társul hozzá még valamilyen meteorológiai tényező, annak függvényében, hogy milyen az adott térség elhelyezkedése (pl. part menti vagy a kontinens belsejében van), domborzata és felszínborítottsága (pl. erdős hegyvidék vagy éppen sivatag), illetve éghajlata (jellemzően csapadékosabb vagy szárazabb, hűvösebb vagy éppen trópusi).

Az így létrejött összetett extrém események típusát nagy mértékben befolyásolja, hogy milyen a nagytérségű áramlási rendszer. *Zscheischler et al. (2020)* négyféle típust különített el: *előfeltételes* (amikor az egyik extrémum olyan feltételeket alakít ki, melyekkel az őt követő extrémum hatása felerősödik), *többszörös* (amikor az adott térségben egyszerre jelentkezik több extrém időjárási tényező), *térben összetett* (ha az extrémumok különböző térségekben jelentkeznek, de ugyanabban az időben – pl. El Niño esetén) és *időben összetett* (amikor az extrémumok egymás után, egy adott térségben fordulnak elő).

Szaktervezésben (*Bordi, 2021*) részletesen bemutattam, hogy a Föld különböző térségeiben melyek azok a tényezők, amelyek jellemzően az extrém szélhez kapcsolódnak. A sivatagos vidékeken például homok- és porviharok (ún. habubok) alakulnak ki a csapadék hiánya és a hirtelen érkező erős szél miatt; a forró, száraz területeken az extrém szél az erdőtüzek terjedéséhez járul hozzá. A partmenti térségekben a szél keltette magas hullámokhoz gyakran társul vihardagály és extrém csapadék, melyek együttesen súlyos áradásokat okoznak.

Magyarország térségében az extrém szélhez a leggyakrabban társuló tényező a csapadék, emiatt diplomamunkám célkitűzése az volt, hogy a két esemény együttes előfordulásának múltbeli gyakoriságát és jövőbeli várható változásait megvizsgáljam a *HuClim* méréseken alapuló adatbázis, illetve különböző *Euro-CORDEX* klímamodell szimulációk segítségével. A dolgozatom első fejezete egy rövid irodalmi áttekintést nyújt az összetett extrém szeles-csapadékos események jellemzőiről (mely térségekben jellemző az

előfordulásuk, milyen nagytérségű időjárási rendszerhez kapcsolódnak, milyen károkozó hatásai vannak különböző megjelenési formáinak), és az összetett események szakirodalom szerinti várható jövőbeli alakulásáról. A következő fejezet a vizsgálathoz felhasznált adatokat és az alkalmazott módszertant mutatja be, míg az utolsó fejezet az eredmények elemzését tartalmazza. Ennek keretében bemutatom, hogy az elvégzett számítások alapján hogyan alakult a 2001–2020-as időszakban a szélviharos, csapadékos és a két tényező által kialakított összetett extrém eseményes napok száma, majd a szimulációk rövid validációs elemzése után rátérek a klímamodell szimulációk szerint várható jövőbeli változások ismertetésére az extrém szélre és az extrém szeles-csapadékos összetett eseményekre vonatkozóan. Mivel a vizsgálatot két különböző üvegházhatású-gáz kibocsátási scenárióval végeztem el, az elemzésből kiderül, hogy milyen hatással lehet az emberi tevékenység az ilyen jellegű extrém események előfordulási gyakoriságára. Mivel az összetett extrém szeles-csapadékos eseményekre nézve a Bakony térsége a legveszélyeztetettebb Magyarországon, ezért a dolgozatom legvégén részletesebben bemutatom az ebben a térségben az évszázad során várható változásokat.

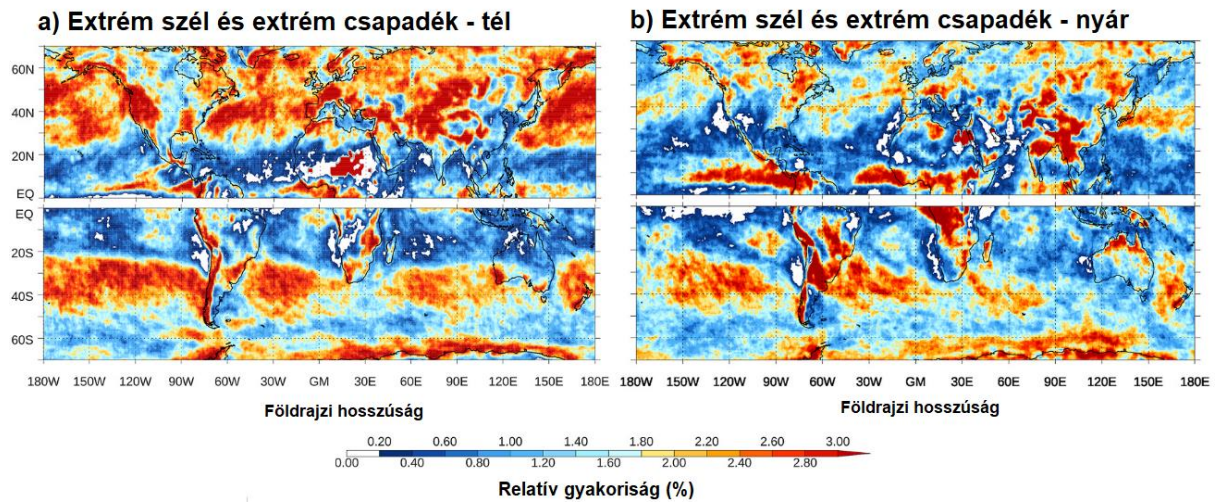
2. Irodalmi áttekintés

Az emberiség számára már a kezdetek óta veszélyt jelentenek az extrém időjárási események, melyek sokszor nemcsak súlyos anyagi károkat okoznak, hanem szinte teljes mértékben elpusztítanak élettereket, gyakran emberéleteket követelve. Bár megelőzni nem tudjuk az extrém időjárást, prognózisok segítségével felkészülhetünk a veszélyre. A rövidtávú előrejelzések mellett szükség van a hosszútávú, klimatológiai skálájú előrejelzésekre, forgatókönyvekre is, annak érdekében, hogy a veszélyeztetett térségekben olyan stratégiákat lehessen kidolgozni, melyek enyhítik az extrém esemény hatásait, és megvédik a lakosságot.

Az extrém időjárási események egy speciális formája az összetett extrém esemény, mely kialakulásáért nem önmagában egyetlen tényező a felelős, hanem több hatás együttese hozza létre. Az így létrejött összetett extrém események különösen nagy veszélyt jelentenek mind a társadalomra, mind a környezetre nézve, mivel a különböző kialakító tényezők hatásai összeadódva jelentkeznek, és bonyolult hátterük miatt előrejelzésük is nehezebb feladattá válik (*Zscheischler et al., 2018*). Az összetett extrém események veszélyessége és előfordulási valószínűsége nagy mértékben függ attól, hogy milyen tényezők vesznek részt kialakításukban (*Zscheischler és Seneviratne, 2017; Catto és Dowdy, 2021*). Minél erősebb a kapcsolat két időjárási tényező között, annál valószínűbb, hogy összetett extrém eseményt alakítanak ki, jóval nagyobb mértékű károkat okozva, mintha külön-külön fordulnának elő. Az önmagukban is veszélyes extrém szélökések a leggyakrabban extrém csapadékkal együttesen alakítanak ki összetett extrém eseményt (*Martius et al., 2016*).

Az ilyen események létrejöttét a mérsékelt övben a mérsékelt övi ciklonok, a trópusi területeken pedig a trópusi ciklonok segítik elő, de sok esetben ezektől független zivatarcellák vagy zivatarláncok esetén is kialakulnak (*Dowdy és Catto, 2017*). A két tényező által alkotott összetett extrém események előfordulása az északi félgömbön a 20. szélességi körtől északabbra, az Egyenlítő környékén az ITCZ-hez kapcsolódóan, a déli félgömbön pedig a 40. és 60. szélességi kör között jellemző a leginkább (1. ábra). A szárazföldön főként Észak- és Dél-Amerika nyugati partja, az Ibériai-félsziget és Európa délnyugati partja, Északnyugat-Afrika, illetve az Ausztrália és Új-Zéland közötti terület veszélyeztetett, ugyanis ezekben a térségekben az extrém szél és csapadék együttes előfordulása az összes

extrém esemény 3%-át teszi ki (Catto és Dowdy, 2021)



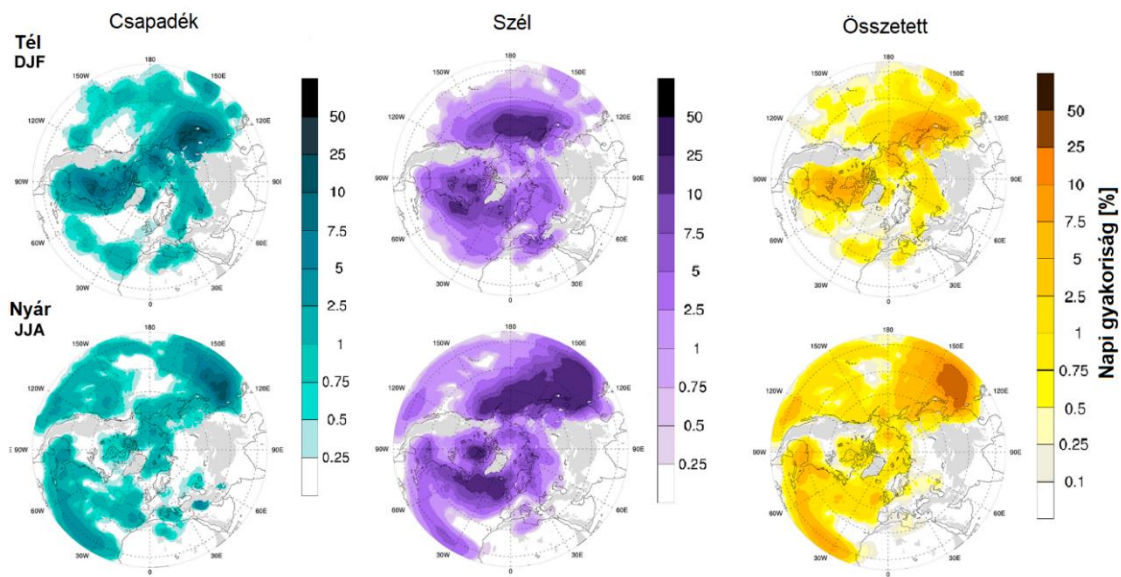
1. ábra: Az extrém szeles és csapadékos összetett események átlagos előfordulási gyakorisága (%) az összes extrém eseményhez képest (a) télen (északi félgömb: DJF, déli félgömb JJA) és (b) nyáron (északi félgömb: JJA, déli félgömb: DJF) Catto és Dowdy (2021) alapján.

2.1 Ciklonokhoz kapcsolódó összetett extrém szél és extrém csapadék események

A mérsékelt övi és trópusi ciklonokhoz kötődő szeles-csapadékos extrém eseményeket kvázi-Lagrange szemléletmóddal (vagyis a ciklonok útvonalát követve) Messmer és Simmonds (2021) vizsgálta globális léptékben, ERA5 reanalízis adatok alapján (Hersbach et al., 2020) az 1979-2018-as időszakra vonatkozóan. Azokat az eseményeket vették figyelembe, ahol az adott rácspontra a vizsgált időjárási tényező (3 órás csapadékösszeg vagy 10 m-es maximális szélökés) meghaladta a 98. évszagos percentilist, és ez a kritérium a ciklon által érintett terület rácspontjainak legalább 25%-ában teljesült, valamint 24 órán keresztül fennállt.

Az északi félgömbön az extrém csapadék előfordulásának napi gyakorisága ciklonok esetén jellemzően a Sziklás-hegység keleti oldalán és Kelet-Japán térségében maximális télen. Szintén jellemző az előfordulása Kelet-Európában, Oroszországban, a Mediterrán térségben és a Brit-szigeteken (2. ábra). A nyári félévben nagyobb területet fed le az extrém csapadék ciklonhoz köthető előfordulása. Ekkor a maximális értékek jellemzően délebbre tolódnak a téli időszakhoz képest, és a trópusi ciklonok útvonalai is kirajzolódnak az alacsonyabb szélességeken. Európában nyáron főleg a partok mentén kapcsolódik gyakran extrém csapadék ciklonhoz, viszont a kontinens belsejében ez szinte egyáltalán nem

jellemző – a téli félévvel ellentétben. Az extrém szél esetén hasonló a területi eloszlás a csapadékéhoz mind a téli, mind a nyári félévben. Ugyanakkor az értékek ebben az esetben nagyobbak – tehát ciklonokhoz több esetben kapcsolódik extrém szél, mint extrém csapadék. A maximális értékek Európában főként Skandináviában és Nagy-Britanniánál figyelhetők meg, ugyanis az izlandi alacsony nyomáshoz köthetően kialakuló ciklonok gyakran viharos jelleget öltenek. Összességében egész Európára nézve télen és nyáron is több esetben hoznak szélvihart a ciklonok, mint extrém csapadékot. Nyáron a szél esetében is megjelennek a trópusi ciklonok jellemző útvonalai az alacsonyabb szélességeken.

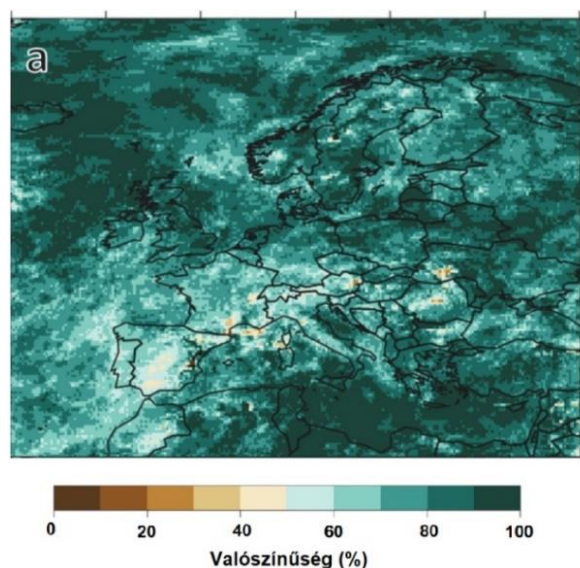


2. ábra: **Extrém csapadék, extrém szél és az általuk kialakított összetett extrém események napi gyakorisága, amikor ezek ciklonhoz kapcsolódnak, Messmer és Simmonds (2021) nyomán.**

A 2. ábra az összetett extrém szeles és extrém csapadékos esetek napi gyakoriságát is bemutatja, itt csak azok a ciklonok vannak figyelembe véve, amelyek esetén mind az extrém szél, mind az extrém csapadék feltétele teljesül, viszont az nincs megkövetelve, hogy azonos időlépcsőben teljesüljön mindkettő. Mivel az extrém csapadék előfordulása kisebb területet fed le, mint az extrém szélé, ezért az összetett események gyakoriságának térbeli eloszlása is jellemzően inkább a csapadékéhoz hasonló. A maximális értékek tehát Észak-Amerika keleti felénél és Ázsia keleti partjánál jelennek meg. Európában télen a Földközi-tenger térsége mellett inkább a kontinens belsejében, míg nyáron a nyugati partvidéken jelentkeznek. A ciklonok életpályája során a csapadék extrémuma jellemzően korábbra tehető, mint az extrém szél, de mindkét esemény még a ciklon életének első felében következik be. Trópusi ciklonokhoz kapcsolódóan szinte minden esetben mindkét extrémum

együttesen megjelenik (Messmer és Simmonds, 2021).

Külön Európára vonatkozóan Owen *et al.* (2021) vizsgálták, hogy milyen gyakorisággal kapcsolódik szeles-csapadékos összetett extrém esemény ciklonokhoz (3. ábra). Ciklonok okozzák a leggyakrabban az ilyen jellegű szélsőséges időjárást a mediterrán térségben, az Egyesült Királyságban és Észak-Európában (81%-os valószínűséggel), de összességében a teljes kontinensen – néhány kisebb terület kivételével – nagy valószínűséggel, az esetek több mint felében ciklonok felelősek az extrém helyzetek kialakulásáért. Magyarországon Budapest térségében figyelhető meg egy kisebb terület, ahol az összetett extrém szeles és csapadékos események kisebb valószínűséggel kapcsolhatók ciklonokhoz. Ennek Owen *et al.* (2021) szerint az oka, hogy míg az extrém csapadékot okozó ciklonok központja jellemzően Magyarországtól délnyugatra, a mediterrán térségben helyezkedik el, az extrém szelet okozó ciklonok középpontja inkább az országtól északkeletre található. Az ország többi részében ennek ellenére szintén 50% körüli, vagy annál nagyobb, helyenként akár 80% fölötti valószínűséggel köthetők ciklonokhoz az ilyen jellegű extrém események. A magyarországi szinoptikus meteorológiai mérőállomásainak adatai alapján a 2000-2019-es időszak legextrémebb szeles eseményeihez (ahol a szélsébség meghaladta a 30 m/s-ot) a legtöbb esetben társult extrém csapadék is (>10 mm), és ezeket az összetett extrém eseményeket sok esetben okozta ciklon (Bordi, 2021).



3. ábra: Annak a valószínűsége, hogy extrém szeles és csapadékos összetett klimatológiai esemény ciklonhoz kapcsolódóan fordul elő Európa térségében (Owen *et al.*, 2021).

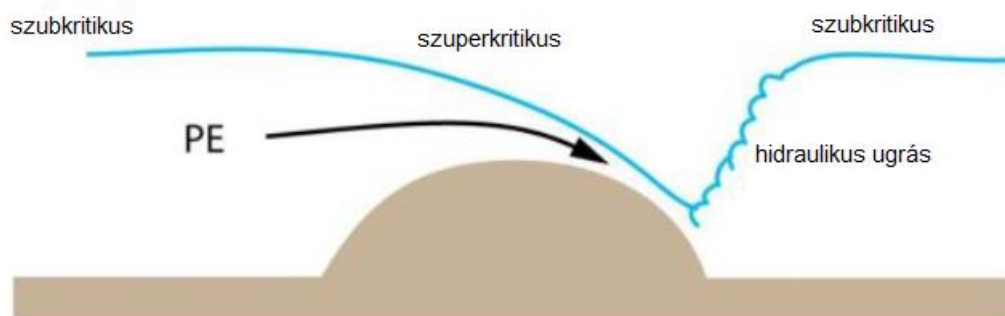
2.2 Összetett szeles-csapadékos extrém események hatásai

Az extrém szél önmagában is rendkívül nagy károkat képes okozni, és többféle megjelenési formája is van, amelyek más-más jellegű hatásokkal járnak. A tornádók az egyik legnehezebben előrejelezhető és vizsgálható időjárási jelenségek, bennük az extrém szél kis területre koncentrálódik, így az okozott károk a tornádó útvonala mentén egy sávban a legsúlyosabbak. A szél sebessége belsejükben elérheti a 140 m/s-ot, így a legerősebb kategóriájú tornádók akár kőépületeket is képesek teljesen lerombolni (*Bluestein, 2013*). Az intenzív tornádók kialakulása általában szupercellákhoz kapcsolódik, és a leggyakrabban az Amerikai Egyesült Államokban fordulnak elő, az úgynevezett *Tornado Alley*-ben („tornádók völgye”), mely elsősorban Texas, Oklahoma, Kansas és Nebraska állam területét fedi le. Ritkábban ugyan, de tornádók Európában is kialakulnak (éves számuk a kontinensen pár száz), és bár általában nem olyan magas kategóriájúak, mint az USA-ban, mégis jelentős károkkal járnak (*Groenemeijer és Kühne, 2014; Antonescu et al., 2017*). Magyarország térségében 2021. június 24-én volt példa egy különösen erős (az *Enhanced Fujita Scale*¹ szerint EF4-es kategóriájú) tornádóra, mely Csehország délkeleti részén pusztított (*Komjáti et al., 2022*). A tornádó kialakulásában két szupercella összeolvadása játszott fontos szerepet. Az eset legalább 6 emberi életet követelt, és több mint 200-an sérültek meg, több településen megrongálta a lakóházak tetőszerkezetét, kárt tett iskolákban és templomtornyokban is.

Európában a hegységek mentén az extrém szél lejtővihar formájában is előfordul (*Kurcsics és Horváth, 2022*), mely a hegyek lee-oldalának lábánál fekvő településeket veszélyeztetik. Amikor az áramlás merőlegesen érkezik a hegyvonulatra, és a sebessége kritikus (vagyis az áramlást jellemző Froude szám az 1-hez nagyon közeli érték), a légréteg a hegytetőn összeszűkül, az áramlás szubkritikusból szuperkritikussá válik, így a lejtő mentén a légréteg nem tud újra kitágulni, hanem tovább szűkül, és vele a szélesebbesség egyre nő (4. ábra). Az eredeti állapotába az áramlás a hegy lábánál, egy hidraulikus ugrás segítségével nyeri vissza eredeti állapotát (*Markowski és Richardson, 2011*). Emiatt a szélesebbesség a legmagasabb értéket közvetlenül a hegy lábánál éri el, így az okozott károk mértéke is itt a legnagyobb. A hegytől távolodva a szélesebbesség gyorsan csökken, így a távolabb fekvő településekre már nem jelent komoly veszélyt. Lejtőviharok gyakran

¹ Enhanced Fujita Scale: Módosított Fujita Skála

alakulnak ki a Tátrában, az egyik legemlékezetesebb esemény ebből a térségből a 2004. november 14-i „tátrai vihar” néven is ismert szélvihar volt (*Simon et al.*, 2006). A Magas Tátrában az erdőt 120 km²-es területen tarolta le a vihar, a legnagyobb szélsébséget a Kő-pataki-tónál mérték (54 m/s). Szintén jellemző lejtővihar kialakulása a horvát tengerparton is, kb. 20 m/s-os átlagszéllel és 50 vagy akár 70 m/s-os széllesekkel. Ismertebb nevén ez az ún. bóra helyi szél, melynek hatása gyakran érezhető Olaszország és Szlovénia egyes területein is (*Grisogono és Belusšić*, 2009).



4. ábra: Lejtőszél kialakulása (*Markowski és Richardson*, 2011).

Kontinensünkre kevésbé jellemző a nagy méretű homokviharok (pl. habubok) kialakulása, ám kisebb porviharok Európában is előfordulnak, a hozzájuk kapcsolódó kár pedig igen nagy lehet. A porviharok kialakulásának szükséges előfeltétele a száraz talaj, tehát jellemzően aszályos időszak végén érkező hidegfront, vagy egy zivatar kifutófrontjának hirtelen megerősödő szele alakítja ki. A porviharokban jelentősen lecsökken a látástávolság, ezért különösen veszélyesek a közúti közlekedésre. Magyarországon egy ilyen váratlanul kialakult kis méretű sűrű porvihar okozott tömegbalesetet az M1-es autópályán 2023. március 11-én [1 – szte].

Az extrém mennyiségű csapadék főként villámárvizek, vagy nagyobb méretű áradások létrejöttéért felelős. Villámárvizek akkor jönnek létre, ha a nagy mennyiségű csapadék rövid idő alatt hullik le, kis területen (*Diakakis et al.*, 2020). A csapadék általában konvektív jellegű és lassú mozgású, vonal mentén fejlődő zivatarcellákhoz kötődik. Ekkor a cellák sok időt töltenek egy adott terület felett, ahol a kiadós csapadék lokális áradást okoz, amely igen nagy károkat eredményez az érintett területeken. Például 2021. júliusában Nyugat-

Európában pusztítottak villámárvizek. Az ún. cut-off ciklonból származó folyamatos nagy mennyiségű konvektív eredetű csapadék (bizonyos területeken a három nap alatt lehulló csapadékmennyiség meghaladta a 100 mm-t) Németországot, Belgiumot és Hollandiát érintette. A víz házakat mosott el, és súlyos kárt tett a vasutakban (az anyagi károk mértékét 1 milliárd euró körülire becsülték), sőt mindezek mellett emberi áldozatokat is követelt [2 – met.hu]. Az áradások földcsuszamlásokhoz is vezethetnek, amelyek a keletkezett károkat még inkább súlyosbítják. A közelmúltban például 2023. február 19-én Brazíliában Beritoga településen 683 mm csapadék hullott 24 óra alatt, aminek hatására fellazult a talaj, földcsuszamlások keletkeztek, melyek utakat, és épületeket tettek tönkre [3 – floodlist.com].

A szeles-csapadékos összetett extrém események a kontinensek különböző területeit más-más formában veszélyeztetik. A partmenti térségekben – pl. Hollandiában (*van den Hurk et al., 2015*) – az extrém szél magas tengeri hullámokat kelt, melyek a part mentén áradást okozhatnak. Hogyha e mellé extrém csapadék is társul, akkor az áradás még súlyosabbá válik, a vízszint jobban megnövekszik, és a parttól távolabb fekvő területek is veszélybe kerülnek. Mivel sok esetben a két extrémum együttes előfordulása ciklonhoz kapcsolódik, melynek alacsony nyomású központja lokálisan megemelve a tengerszintet vihardagályt kelt, a szél miatt kialakuló magas hullámok egy eleve magasabb tengerszintről a partot elérve még súlyosabb károkat okoznak. A kontinensek belsejében ugyan a vihardagály nem jelent veszélyt, a szeles-csapadékos extrémumok mégis rendkívül súlyos károkat tudnak okozni. Európában például a 2007 januárjában lecsapó Kyrill vihar utakban, vasúti sínekben tett kárt, és a repülőgépes szállítást is akadályozta (*Fink et al., 2009*). Összesen kb. kétmillió lakóház maradt áramellátás nélkül az erős szél által megrongált vezetékek miatt, ami 62 millió fát csavart ki összesen. A vihar csak Németországban körülbelül 2,4 milliárd euró anyagi kárral járt.

Az összetett szeles-csapadékos extrém helyzetek leginkább az infrastruktúrára jelentenek veszélyt. Éppen ezért rendkívül fontos az, hogy a veszélyeztetett területeken olyan módon végezzenek fejlesztéseket, amelyek enyhítik az extrémumok hatásait. Az extrém csapadék okozta áradások szempontjából kulcsfontosságú, hogy milyen a vízelvezetés, a partmenti térségekben pedig a part kiépítettsége, amely egy esetleges tengerszint emelkedés során megtöri az extrém szél keltette magas hullámokat. Szintén fontos a vezetékek elhelyezése, hogy azok minél kevésbé legyenek kitéve a viharos

széllökések károkozó hatásainak. Ha az infrastruktúra kevésbé alkalmazkodó módon van kiépítve, egy összetett szélsőséges szeles-csapadékos időjárási esemény hatással lehet a lakhatóság mellett az iparra, szállításra, és ezeken keresztül például az élelmezésre is (Raymond *et al.*, 2020).

2.3 Összetett extrém események a jövőben

Az extrém események kapcsán napjainkban egyre inkább felmerül a klímaváltozás hatásának a kérdése is. A különböző extrémumok előfordulási gyakorisága és intenzitása más-más módon változhat meg a jövőben a globális felmelegedés következtében, és a változásuk jellege nagy mértékben függ attól, hogy a klímaváltozás hogyan hat a nagyskálájú áramlási rendszerekre. Például a Hadley-cella mérete és erőssége meghatározza a mérsékelt övi és trópusi ciklonok kialakulásának lehetséges helyszínét, s ezzel a ciklonokhoz kapcsolódó extrémumok tulajdonságaiban is szerepet játszik. Az 1980-as évek óta a Hadley-cirkuláció nagy valószínűséggel szélesedett, aminek hatására a poláris jetek – és velük együtt a mérsékelt övi ciklonok útvonalai – eltolódtak a pólusok felé (IPCC, 2021). Emiatt a délebbre fekvő térségekben ritkábban fordulnak elő csapadékot hozó ciklonok, és gyakrabban alakulhatnak ki aszályos helyzetek. Az El Niño Déli Oszcilláció (ENSO) fázisai is jelentősen befolyásolják azt, hogy éppen mely térségekben uralkodik szárazság, és hol esik a megszokottnál lényegesen több csapadék. Az elmúlt évszázadban az ENSO amplitúdójában és frekvenciájában is bekövetkeztek változások, és a jövőben is számíthatunk további változásokra. Abban nincs teljes mértékű egyetértés, hogy a változásokat az antropogén hatás vagy az alapvető légköri belső változékonyság idézi elő, de arra mindenképpen számítani kell, hogy a szárad végére azok az extrém események, amelyek az egyes fázisokhoz kapcsolódnak (mint például a nagytérségű aszály vagy éppenséggel az áradások), a klímaváltozás hatására várhatóan gyakrabban fognak előfordulni (Cai *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2018). A monszunhoz kapcsolódó cirkuláció fő meghajtója a szárazföld-óceán felszínek közti hőmérséklet-különbség, ami a klímaváltozás hatására változik, és ennek következtében a part menti térségekben még hevesebb csapadék jelentkezhet a nyári hónapokban, illetve még hosszabban tartó szárazság a téli hónapokban (Lee and Wang, 2014).

A legfrissebb IPCC (2021) jelentés alapján az extrém forró hőmérsékletek gyakorisága és intenzitása is nőni fog a jövőben, míg az extrém hideg hőmérsékletek gyakoriságában csökkenés várható. A szélsőséges viharok különböző típusaira a klímaváltozás különböző módon hat. A trópusi ciklonok esetében, míg azok teljes száma a jövőben általánosságban csökkenni fog, az erős intenzitású (4-5. kategóriás) trópusi ciklonoknak mind az aránya, mind az intenzitása növekedni fog. A szubtrópusi viharok gyakoriságában és intenzitásában szintén növekedés várható, illetve esetükben a hozzájuk kapcsolódó csapadékmennyiség is várhatóan növekedni fog, de a téli félévben hó formájában lehulló csapadék gyakorisága csökkenő tendenciát mutat. A heves konvektív viharok intenzitásában növekedés várható, az USA-ban a konvektív szezon hosszabbodására számíthatunk.

Mivel az összetett extrém események kialakulásának háttere rendkívül komplex, a jövőbeli trendek becslése is bonyolult feladat. Az aszály és hóhullám társulása esetén kialakuló erdőtüzek gyakoriságában például növekedés várható a jövőben, melyhez nagy mértékben az emberi tevékenység is hozzájárul. Azoknak a területeknek a száma is nőni fog, amelyekre erdőtüzek kialakulása jellemző, illetve ezeken a területeken a tüzek kialakulásának kedvező időjárás időszak is egyre hosszabb lesz. Ugyanakkor az összességében leégett területek mennyiségében csökkenésre számíthatunk, melyet az emberi tevékenység (öntözés, tűzoltás) segít elő (IPCC, 2021). A partmenti területekre várhatóan továbbra is a legfőbb veszélyt az áradás fogja jelenteni, melyhez az extrém szél, extrém csapadék és vihardagály mellett a tengerszintemelkedés is hozzá fog járulni.

Mivel a különböző kialakító tényezők a klímaváltozás kapcsán gyakran más-más jövőbeli trendeket mutatnak, ezért a jövőben várhatóan egyre kisebb lesz az esélye annak, hogy a már megszokott társulásokkal létrejött összetett extrém esemény újra és újra előforduljon, ugyanis sokkal változatosabb, jelenleg még ismeretlen kombinációk kialakulása is teret kap. Emellett számítani kell arra is, hogy a különböző kialakító tényezők közötti kapcsolat is megváltozhat, akár eddig még nem látott hatásokat keltve, veszélyesebb körülményeket kialakítva (Zscheischler *et al*, 2018). Az extrém szél és az extrém csapadék jövőbeli alakulása szorosan az extrém viharok jövőbeli változásához kapcsolódik, amely magába foglalja a trópusi ciklonok, mérsékeltövi viharos ciklonok és a konvektív zivatarok jellemző előfordulási területeinek, gyakoriságának és erősségének változásait.

3. Adatok, módszertan

A dolgozatban bemutatott kutatás célja, hogy a Magyarországon előfordult extrém szeles és extrém csapadékos helyzetek előfordulási gyakoriságát ismertesse, valamint, hogy hozzávetőleges képet fessen a két tényező közötti kapcsolatról is, mind a múltra, mind a jövőre vonatkozóan, lehetséges forgatókönyvek alapján. Ebben a fejezetben bemutatom a kutatás során felhasznált adatokat és az alkalmazott módszertant.

3.1 Megfigyelési adatok

Az extrém szeles és extrém csapadékos, illetve a két tényező által létrehozott összetett események múltra (a 2001–2020-as időszakra) vonatkozó vizsgálatához az Országos Meteorológiai Szolgálat által előállított *HuClim* adatbázis [4 – odp.met.hu] került felhasználásra. Ez Magyarországot lefedő, napi szintű, homogenizált, rácspontokra interpolált adatsorokat tartalmaz, melyek változóktól függően 1971-től (minimum-/maximum- és átlaghőmérséklet, csapadék, műszerszínti légnyomás, átlagos relatív nedvesség), vagy 2001-től (átlagos széleseesség, maximális szélleőkés, globálsugárzás) állnak rendelkezésre (*Izsák et al.*, 2022). Térbeli felbontása $0,1^\circ$, a változók rácsponti értékei az OMSZ mérőállomásainak adataiból állnak elő. Az állomási adatokat először a MASH módszerrel homogenizálják, korrigálják és kiegészítik (*Szentimrey*, 2008), majd interpolálják a MISH módszerrel (*Szentimrey és Bihari*, 2007). A rácspontok nem minden esetben egyeznek meg a mérőállomások pontos helyszínével, ezért előfordulhat, hogy az adatbázisban néhány extrém érték egyáltalán nem, vagy csak kevésbé kiugró értéként jelenik meg, mint amilyen a valóságban volt. Emiatt a dolgozatban bemutatott kutatás is sokkal inkább a nagyobb méretű heves eseményekre fókuszál, mintsem a lokális, rövidebb ideig tartó extrémumokra, mivel az előbbieket a rácsponti adatbázisban is jobban kirajzolódnak. Az ilyen jellegű szélsőséges szeles, csapadékos és összetett események vizsgálatára a *HuClim* adatbázis napi maximális szélleőkés (*m/s*) és napi csapadék (*mm*) adatsorait használtam fel. Az általam végzett vizsgálat elkészítéséhez az adatok letöltésekor a szélleőkés adatsor a 2001–2021-es időszakra állt rendelkezésre, és 89 állomás mérési adatainak felhasználásával készült, míg a csapadék adatok 1971–2021-es időszakra vonatkozóan voltak elérhetők, melyek 500 állomás méréseit felhasználva lettek előállítva [5 – *HuClim*].

3.2 Klímamodell szimulációk

A jövőre vonatkozó elemzésekhez a Euro-CORDEX² projekt keretén belül létrehozott modelltermékek kerültek felhasználásra. A Euro-CORDEX a WRCP³ szervezésével indult CORDEX projekt Európára vonatkozó része, melynek célkitűzése nemzetközileg koordinált regionális klímamodell projekciók készítése az egyes szárazföldi régiókra vonatkozóan [6 – EuroCordex]. Az adatbázisok létrehozásához a CMIP5⁴ keretén belül futtatott globális modellkísérletek (GCM⁵-ek) produktumait skálázták le regionális klímamodellek (RCM⁶-ek) segítségével.

A dolgozatban két modellváltozót vizsgáltam – a napi maximális szélökést és a napi csapadékösszeget. A kiválasztott két változóra összesen hat modellszimuláció állt rendelkezésre (1. táblázat), így a vizsgálat során ezek eredményeit használtam fel.

Intézet	Globális meghajtó modell	Regionális modell	Rövid elnevezés
SMHI ⁷	CNRM-CM5	RCA4	CNRM-CM5-RCA4
SMHI	EC-EARTH	RCA4	EC-EARTH-RCA4
SMHI	IPSL-CM5A-MR	RCA4	IPSL-CM5A-MR-RCA4
SMHI	NorESM1-M	RCA4	NorESM1-M-RCA4
KNMI ⁸	EC-EARTH	RACMO22E	EC-EARTH-RACMO22E
KNMI	CNRM-CM5	RACMO22E	CNRM-CM5-RACMO22E

1. táblázat: Felhasznált klímamodell szimulációk a Euro-CORDEX projekt adatbázisából.

Annak érdekében, hogy a modellek különbözőségéből adódó bizonytalanságok mellett az emberi tevékenység hatására is következtetni lehessen, különböző RCP⁹

² Euro-CORDEX: Coordinated Regional Downscaling Experiment – Összehangolt regionális leskalázási kísérlet

³ WRCP: World Climate Research Program – Globális Klímakutató Program

⁴ CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project 5 – Kapcsolt Modell Összehasonlítási Projekt 5. fázisa

⁵ GCM: Global Climate Model – Globális Klímamodell

⁶ RCM: Regional Climate Model – Regionális klímamodell

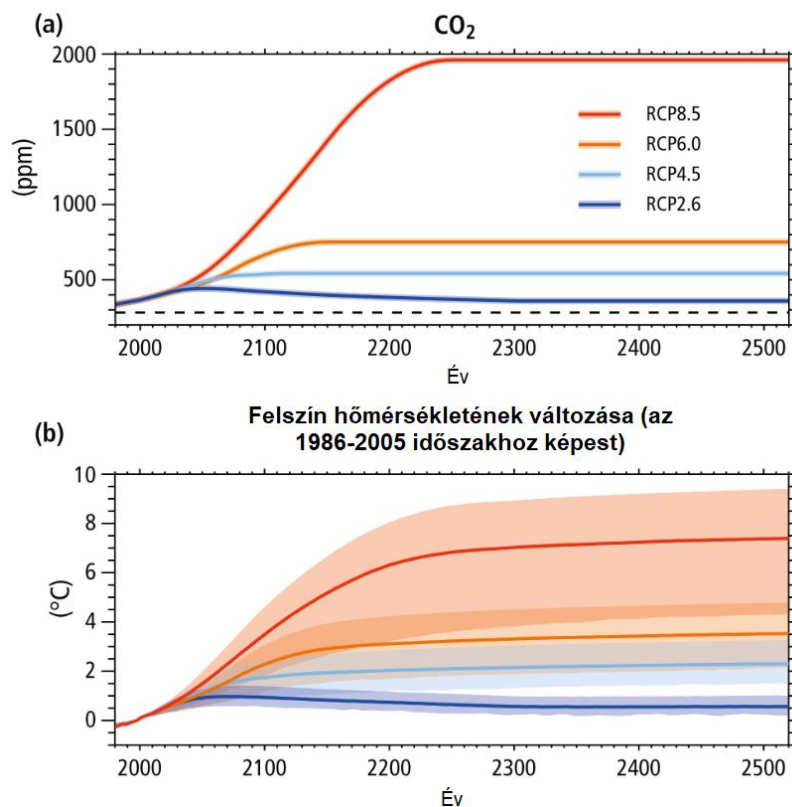
⁷ SMHI: Swedish Meteorological and Hydrological Institute – Svéd Meteorológiai és Hidrológiai intézet

⁸ KNMI: Royal Netherlands Meteorological Institute – Holland Királyi Meteorológiai Intézet

⁹ RCP: Representative Concentration Pathway – Reprezentatív koncentrációs pálya

forogatókönyvekkel meghajtott modellszimulációkkal dolgoztam, melyek lényege, hogy annak függvényében feltételeznek különböző lehetséges üvegházhatású gáz kibocsátási koncentrációt és felszínhasználat változást a jövőre vonatkozóan, hogy milyen sugárzási kényszert és széndioxid-koncentráció trajektóriákat eredményeznek (*van Vuuren et al., 2011*).

Összesen négy ilyen forogatókönyv van, amelyek közül a jelen kutatáshoz kettőt használtam fel (5. ábra). Az egyik a közepesen optimista RCP 4.5-ös scenárió. Ez olyan üvegházhatású gáz kibocsátást és felszínhasználatot feltételez, amely során a század végére $4,5 \text{ W/m}^2$ értékű sugárzási kényszer és körülbelül 650 ppm nagyságú szén-dioxid koncentráció stabilizálódik, melyek értéke ezután már nem nő tovább (*Thomson et al., 2011*). A globális felszínhőmérséklet várhatóan 2100-ra körülbelül $2 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal növekszik meg az 1986–2005 időszakhoz képest, amely érték szintén stabilizálódik a század végén.



5. ábra: A globális légköri szén-dioxid koncentráció (a) és a globális felszíni hőmérséklet (b) változása a jövőben a különböző RCP scenáriók esetén [7 - ipcc].

Ahhoz, hogy az RCP 4.5-ös forgatókönyv valósuljon meg, arra van szükség, hogy a 2040-es években globálisan megkezdődjön az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése. Abban az esetben, ha ez nem történik meg, és az emberiség nem változtat a kibocsátáson kellő időn belül, az RCP 8.5-ös forgatókönyv érvényesülése várható. Ez a legpesszimistább scenárió, amely nagy népességszámmal, lassú technológiai fejlesztésekkel és nagy energiafelhasználással számol – így azt feltételezi, hogy egyáltalán nem lesz törekvés a klímaváltozás megfékezésére (*Riahi et al.*, 2011). Esetében az üvegházhatású gázkibocsátás jelentősen nőni fog az idő múlásával, a sugárzási kényszer a század végére $8,5 \text{ W/m}^2$ értékű lesz, aminek az elérése után a CO_2 koncentráció továbbra is nőni fog, és 2100-ra meghaladja az 1000 ppm-et (sőt, 2300-ra már a 2000 ppm-et is), a globális felszínhőmérséklet pedig több mint $4 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal növekszik meg.

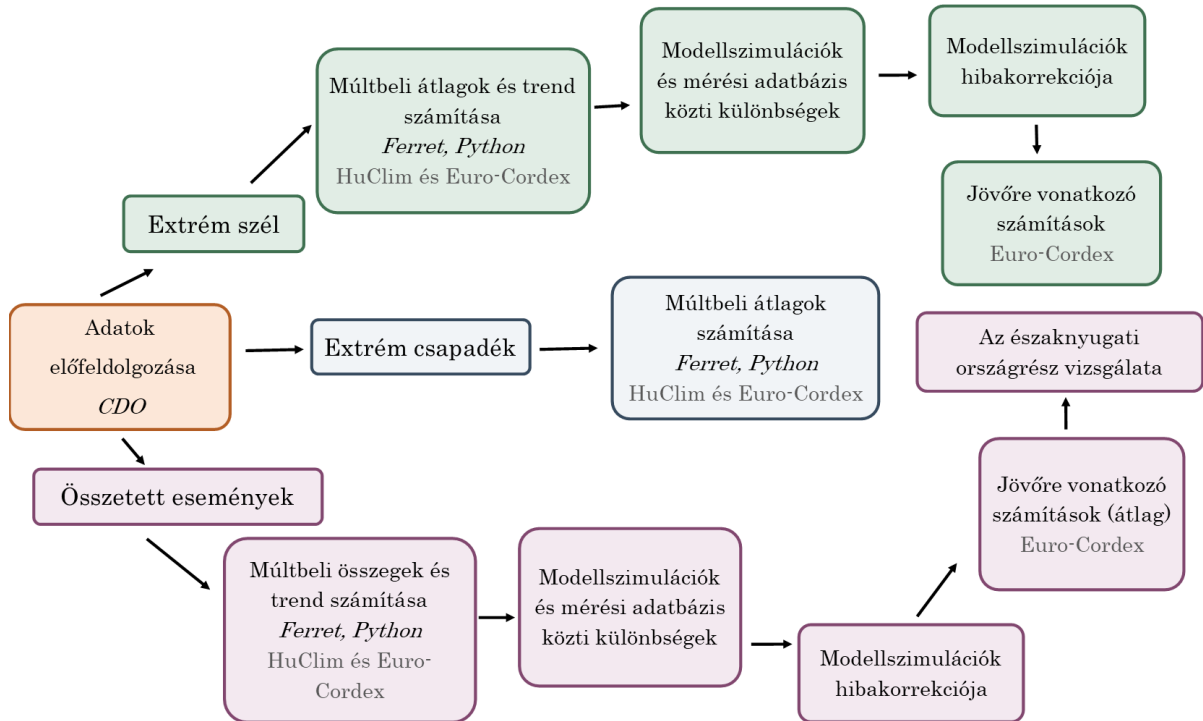
Ha a két különböző forgatókönyv alapján összehasonlítjuk a klímaváltozással módosuló extrém események (ebben az esetben extrém szél és összetett szeles-csapadékos extrémumok) vizsgálatára kapott eredményeket, betekintést nyerhetünk abba, hogy milyen hatással van az emberi tevékenység az adott időjárási tényezőre (*Stott et al.*, 2016; *Zscheischler és Lehner*, 2022).

3.3 Módszerek

A dolgozatban bemutatott vizsgálat menete a 6. ábrán követhető nyomon. Az első lépés az adatok előfeldolgozása volt, melyet CDO¹⁰ (*Schulzweida*, 2020) segítségével végeztem el. Az elemzéshez kiválasztott időszak a múltira 2001–2020, a jövőre pedig 2021–2100 volt. Az extrém szélre vonatkozó feltétel, mind a *Euro-CORDEX* modellek, mind a *HuClim* megfigyelési adatok esetén úgy lett megválasztva, hogy a napi maximális széllelökés elérje vagy meghaladja a 17 m/s -ot, ami a Beaufort-skála szerinti viharos kategória alsó határa [8 – met.hu]. Az extrém csapadékos napok meghatározásához a napi csapadékmennyiségre vonatkozó feltétel a minimum 10 mm volt, az összetett extrém szeles és extrém csapadékos helyzetek leválogatásához pedig mindkét feltételnek egyszerre kellett teljesülnie. A csapadék adatokat egy nappal korábbra toltam, ugyanis míg a napi maximális széllelökés mérések az adott dátumra vonatkoznak, a napi csapadékmennyiség a mérési adatbázisban az előző napot tartalmazza nagyobb arányban. Az így megkapott extrém

¹⁰ CDO: Climate Data Operators – Éghajlati adatkezelő

helyzetes napok száma minden változóra külön-külön, évenként került összegzésre. Az előfeldolgozást követő számolásokat *Ferret* nyelven [9 – ferret] írt programokkal végeztem, az eredményeket pedig *Python* nyelven írt programmal ábrázoltam.



6. ábra: A dolgozatban szereplő kutatás menetének folyamatábrája.

A múltra vonatkozóan az extrém szellőkéses és az extrém csapadékos napok átlagos éves számát határoztam meg a vizsgált húsz éves időszakra rácspontonként, a *HuClim* adatbázis alapján. Mivel az összetett események lényegesen kisebb számban fordultak elő, ezeknek nem az éves átlagos előfordulását, hanem a húsz év alatt történt összes előfordulásának számát vizsgáltam.

Az extrém szeles napok és az összetett extrém szeles-csapadékos napok számával kapcsolatos időbeli változások meghatározására trendvizsgálatot végeztem, az elmúlt 20 éves időszakra vonatkozóan. Ehhez lineáris regressziót alkalmaztam. Megvizsgáltam, hogy a kapott trendek vajon szignifikánsnak tekinthetők-e. Ehhez t-próbát alkalmaztam $\alpha = 0,05$ szignifikancia szint mellett. Azokon a területeken, ahol ezek alapján szignifikáns a meghatározott trendegyüttható, ott a változás nagy valószínűséggel nem csak a vizsgált időjárási tényező pillanatnyi változékonyságának következménye.

A jövőbeli időszakra futtatott modellszimulációk eredményeinek feldolgozása előtt fontos volt ellenőrizni, hogy az egyes modellekhez tartozó múltra vonatkozó futtatási eredmények összeesengenek-e a mérési adatokból összeállított *HuClim* adatbázisból számított eredményekkel. Ezért a modellszimulációkra szintén kiszámoltam a 2001–2020-as időszakra vonatkozó extrém széllelkéses napok és összetett extrém eseményes napok átlagos éves számát. Az eredményeket összevettem a *HuClim* adatbázisból végzett számítások eredményeivel, majd az eltéréseket különbség térképeken ábrázoltam annak érdekében, hogy a különböző modellszimulációk torzítására következtetni lehessen. Ezután, a modellszimulációkat korrigáltam a referencia adatbázis segítségével, mind a szélviharos napokra, mind az összetett eseményekre. A hibakorrekciónak módszere a normalizálás volt, vagyis az egyes modellszimulációk idősorainak statisztikai mutatóit módosítottam a *HuClim* adatbázis segítségével, hogy azok hasonlóak legyenek a mérési adatbázis statisztikai mutatóihoz. Mindehhez az alábbi egyenletet alkalmaztam:

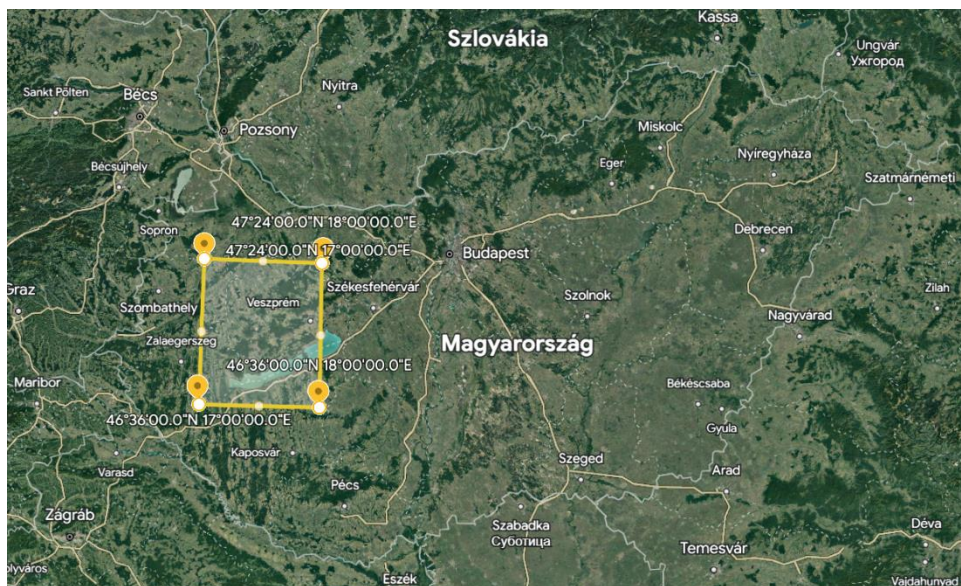
$$x_{korr} = \frac{(x_m - \bar{x}_m)\sqrt{\sigma^2_h}}{\sqrt{\sigma^2_m}} + \bar{x}_h \quad (1),$$

ahol x_{korr} a korrigált modellváltozó (a vizsgált indikátor, azaz az extrém viszonyok adott évben való előfordulási gyakorisága), x_m az eredeti modellváltozó, \bar{x}_m és \bar{x}_h rendre a modell-, illetve a megfigyelési adatbázis változóinak átlaga, σ_m és σ_h a modell- és a megfigyelési adatbázis változóinak szórása. Az így megkapott hibakorrigált modellszimulációs adatsorokból készítettem el a modellátlagot, mindkét forgatókönyvre külön-külön.

A modellek hibakorrekcióna után a jövőre vonatkozó változások vizsgálata következett, először az extrém szeles esetekre, majd az összetett extrém szeles-csapadékos eseményekre. Elsőként azt vizsgáltam, hogy az egyes modellek esetén a tekintett időszak utolsó húsz éve (tehát 2081–2100) és a referencia időszak (2001–2020) között milyen különbségek jelennek meg a különböző rácpontokban. Mivel a jövőbeli változást a legtöbb időjárási tényező esetén nagy mértékben befolyásolja az antropogén tevékenység, ezért fontosnak tartottam különböző forgatókönyvek figyelembevételét is, amelyek esetlegesen különböző végeredményekhez vezethetnek. Így a jövő-múlt különbségeket az RCP 4.5-ös és az RCP 8.5-ös scenárióval futtatott modellszimulációk esetén külön-külön elkészítettem.

A különböző modellszimulációk eltérő eredményei szintén különböző lehetséges forgatókönyveket ábrázolnak a vizsgált változókra vonatkozóan, tükrözve a modellek dinamikájában fellelhető különbségeket, bizonytalanságokat. Ezért a jövőre vonatkozó következtetések levonásához célszerűnek tartottam minden rendelkezésre álló modellszimulációból készült eredményt figyelembe venni.

Annak érdekében, hogy egy átfogóbb kép is kialakuljon arról, hogy összességében mire számíthatunk a jövőben a különböző modellbecslések alapján, átlagoltam a modellszimulációkat, és az így létrejött modellátlag alapján szintén elkészítettem a jövőbeli célidőszak és a múltbeli referencia időszak közötti különbségeket ábrázoló térképeket. Ezúttal nem csak a század utolsó 20 évére vonatkozóan (tehát 2081–2100-ra), hanem az azt megelőző 20 éves időszakokra is: 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080. Abban a térségben, ahol a legjelentősebb változások mutatkoztak meg az összetett események esetén, külön trendvizsgálatot végeztem a kisebb területre vonatkozóan (7. ábra), melyet *R* programnyelven írott program segítségével ábrázoltam. Az elemzés eredményeit a következő, *Eredmények* című fejezetben mutatom be.



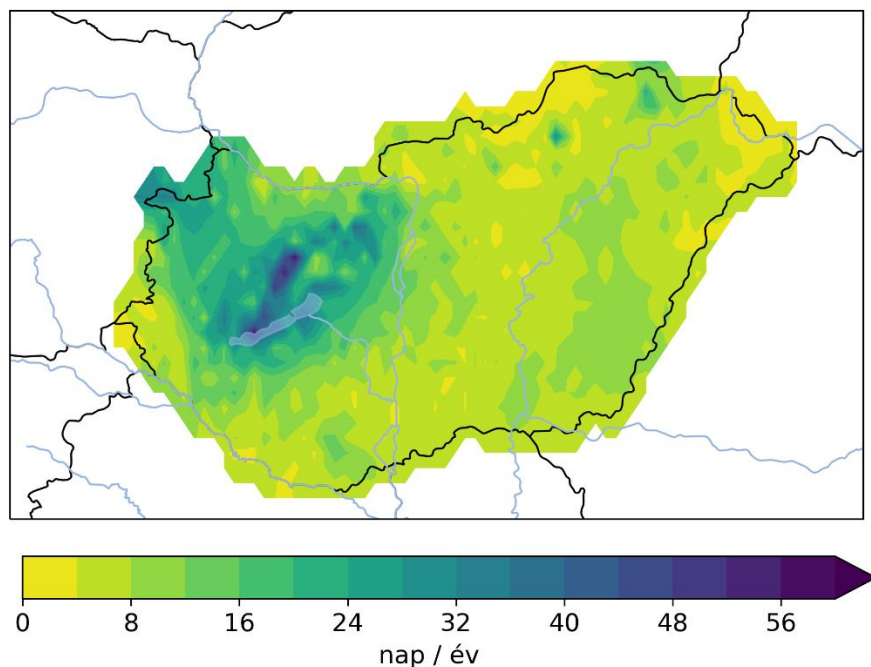
7. ábra: A kiválasztott kisebb terület, amelyre részletesebb vizsgálatot végeztem az összetett extrém szeles-csapadékos esetek jövőbeli alakulásának vizsgálatára [10 – Google Earth].

4. Eredmények

A diplomamunka dolgozat elkészítéséhez végzett kutatás a *Zscieschler et al. (2018)* szemléletmódjával leírt olyan összetett extrém események jövőbeli alakulásának vizsgálatát foglalja magába, amelynek egyik összetevője az extrém szél, a másik pedig az extrém csapadék. E két tényező múltbeli és jövőbeli előfordulásának gyakoriságát először külön-külön, majd együttesen, mint az általuk meghatározott összetett extrém esemény gyakoriságát mutatom be, különböző kibocsátási scenáriók felhasználásával. A vizsgálat célja, hogy az eredmények alapján a két időjárási extrémum kapcsolatának tulajdonságaiba is betekintést nyújtson Magyarország térségére vonatkozóan.

4.1 Szélviharos napok az elmúlt 20 évben

A 2001-2020-as időszakban Magyarországon előfordult szélviharos napok átlagos éves számát a 8. ábra szemlélteti, mely a *HuClim* adatbázis napi maximális szélsebesség adatai alapján készült. Ahogyan azt már a 3.3. fejezetben is ismertettem, szélviharos napként azokat a napokat tekintetem, amelyek során a napi maximális szélsebesség elérte a Beaufort-skála szerinti viharos kategóriát [$8 - \text{met.hu}$], tehát nagyobb volt, mint 17 m/s.



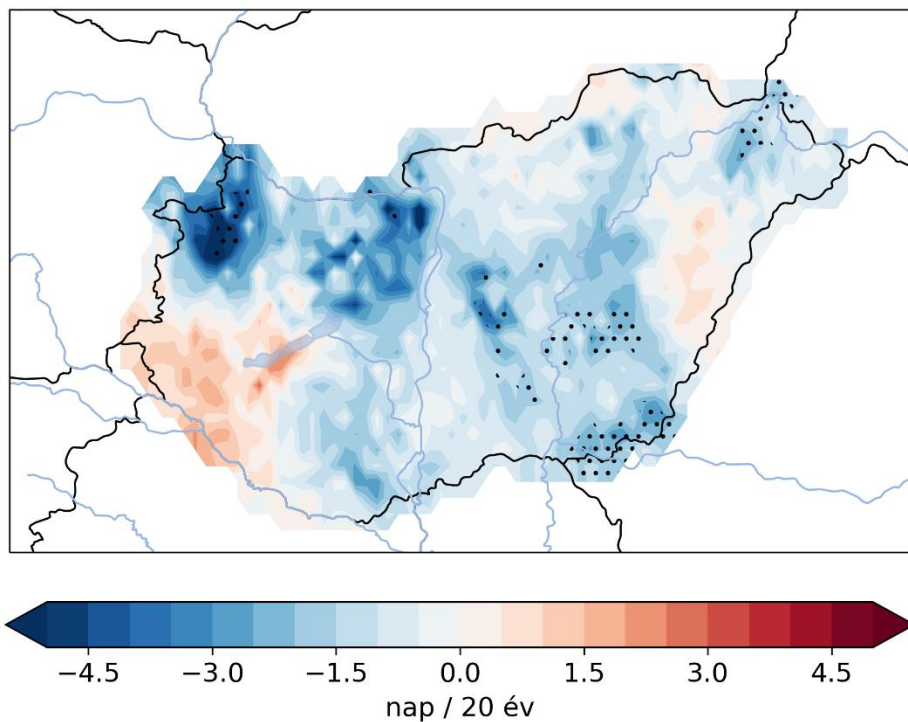
8. ábra: Szélviharos napok (napi maximális szélsebesség >17 m/s) éves átlagos száma Magyarország területén a *HuClim* adatbázis alapján, 2001–2020.

A legtöbb szélviharos nap évente átlagosan a Dunántúl térségében fordult elő, ezen belül pedig a Balaton és Bakony környékén rajzolódnak ki a maximális értékek, ahol az ilyen jellegű szélsőséges napok száma évente a 60 napot is elérte (8. ábra). A Kisalföldön szintén sok, évente jellemzően 20–40 extrém szeles nap volt. Az ország keleti fele kevésbé bizonyult szelesnek, itt ugyanis jóval kevesebb, évente legfeljebb 15 szélviharos nap fordult elő a térség legnagyobb részén. A szélviharoknak legkevesbé kitett terület a vizsgálat alapján az Alföld volt, ennek nagy részén 10 alatti az extrém szeles napok száma, de helyenként – mint például Szabolcs-Szatmár-Bereg vármegye térségében – számuk akár 5 napnál is kevesebb volt évente. Az ország domborzati sajátosságai is megmutatkoznak az extrém szellőkések előfordulási gyakoriságára vonatkozó térképen, a magasabban fekvő területeken ugyanis több extrém szeles nap volt, mint a környezetükben. Ez megfigyelhető a Bakony esetében is, az északkeleti ország részben pedig markánsan kirajzolódik például a Kékestető, ahol évente átlagosan 20-nál több, míg a környező rácspontokban kevesebb, mint fele ennyi (<10) szélviharos nap volt.

Mivel a szél egy nagy változékonyságú meteorológiai tényezőnek számít, az extrém szellőkések előfordulási számában is igen nagy különbségek mutakozhatnak meg az egymást követő évek között. Emiatt a hosszabb távú változás vizsgálata nem egyszerű feladat. Annak érdekében, hogy a tekintett elmúlt 20 éves időszakban fellépett változási trend irányáról és mértékéről mégis valamilyen képet kapjunk a rácsponti idősorokra lineáris trendet illeszttem a jól ismert legkisebb négyzetek módszerével. Ezeket a kiszámolt trendegyütthatókat a 9. ábra szemlélteti.

A vizsgált időszakban a szélviharos napok éves átlagos száma az ország nagy részén jellemzően csökkenő trendet mutatott, mely a legerősebben a Kisalföldön rajzolódott ki, nagyjából megegyező területen a szélviharos napok éves átlagos számának legnagyobb értékeinek elhelyezkedésével. Itt a vizsgált időszak alatt a csökkenés maximális mértéke 4–5 nap volt, míg az ország többi részén legfeljebb 2 napos csökkenés detektálható. A Kisalföldön a trend nagyrészt statisztikailag szignifikánsnak tekinthető, azonban országos vonatkozásban ez csak kevés területre mondható el. Ez abból az okból fakad, hogy az adatbázisban rendelkezésre álló 20 éves időszak klimatológiai szempontból viszonylag rövidnek számít egy ilyen nagy változékonyságú meteorológiai tényező esetén ahhoz, hogy a trend egyértelmű legyen. Szintén szignifikánsan csökkent a szélviharos napok száma az

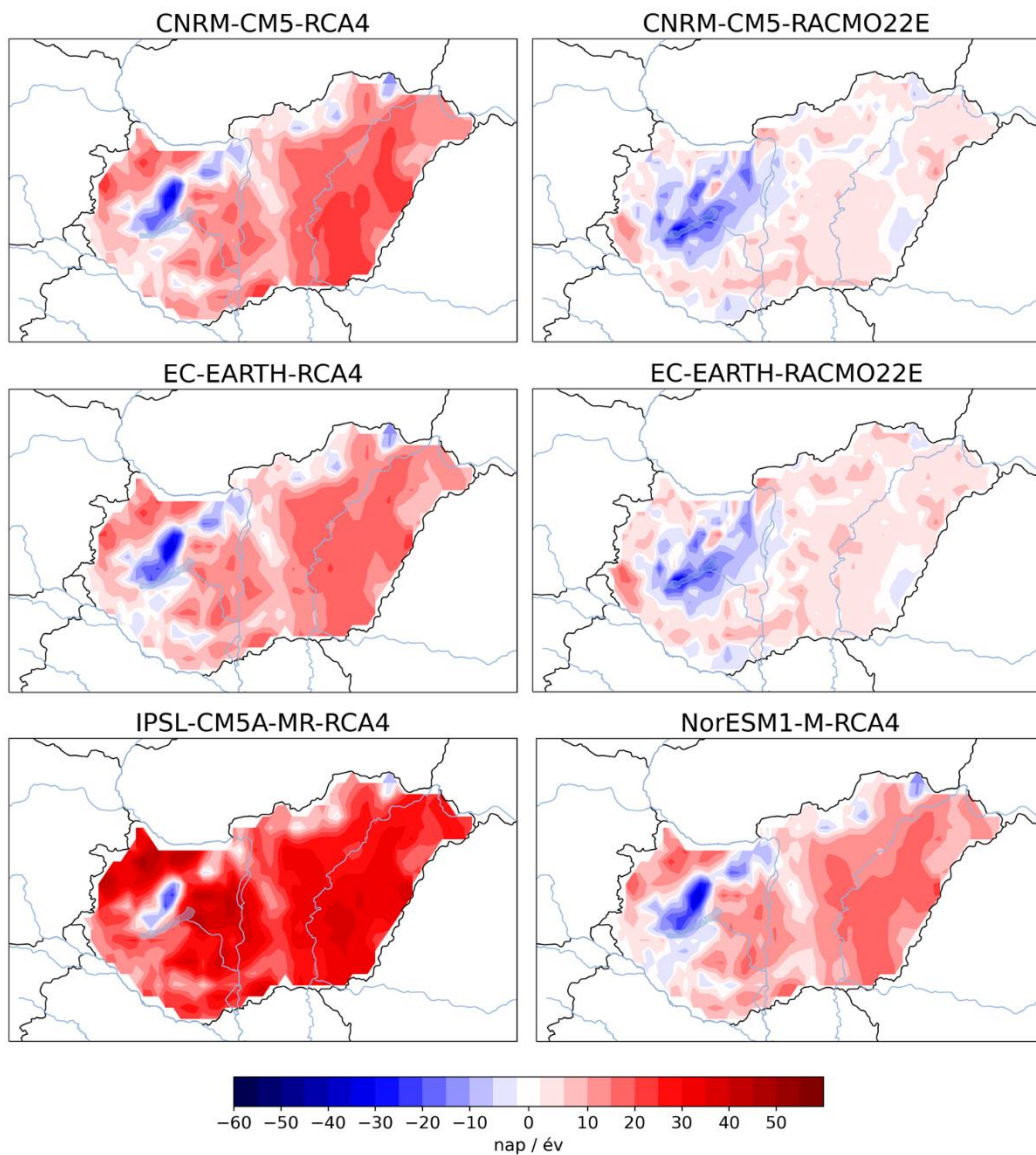
Alföld délkeleti részén, és az Északi-középhegységben. Az ország délnyugati és keleti szélén mutatkozó 1–2 napos növekvő trend azonban sehol nem volt szignifikánsnak tekinthető.



9. ábra: Szélviharos napok éves átlagos számára illesztett lineáris trendegyütthatók a 2001–2020-as időszakra. (A fekete pöttyök a 0,05 szinten szignifikáns rácsponokat jelzik.)

A Euro-CORDEX modellekkal ugyanerre az elmúlt 20 éves időszakra validációs céllal végeztem vizsgálatot. Az éves átlagos szélleökéses napok száma a modellek esetén területi eloszlás szempontjából hasonló volt a *HuClim* adatbázisból számolt eredményekhez (11. ábra), azonban a napok számában nagyobb eltérések is megjelentek a modellszimulációk eredményeiben a referencia adatbázishoz képest. Ezeket a különbségeket a 10. ábra mutatja be. A térképekről leolvasható, hogy a RACMO22E regionális modellekkal készült szimulációk jobban teljesítettek az RCA4 modellekkal futtatott szimulációknál, ugyanis esetükben a szélviharos napok éves átlagos száma kisebb mértékben tér el a mérési adatbázistól. Az ország legnagyobb részén felülbecslés mutatkozott, viszont abban a térségben, ahol a *HuClim* adatbázis alapján a legtöbb szélleökéses nap fordult elő évente (a Balaton és Bakony környéke) minden modell alulbecsli ezeknek a napoknak a számát. A legnagyobb felülbecslés az RCA4-es modellszimulációk esetén általában az Alföld keleti részén jelentkezik (több, mint 15 nap), a legnagyobb alulbecslés pedig a Bakonyban (itt is meghaladja a 15 napot). A legrosszabbul az IPSL-CM5A-MR-RCA4 modell teljesített, itt a

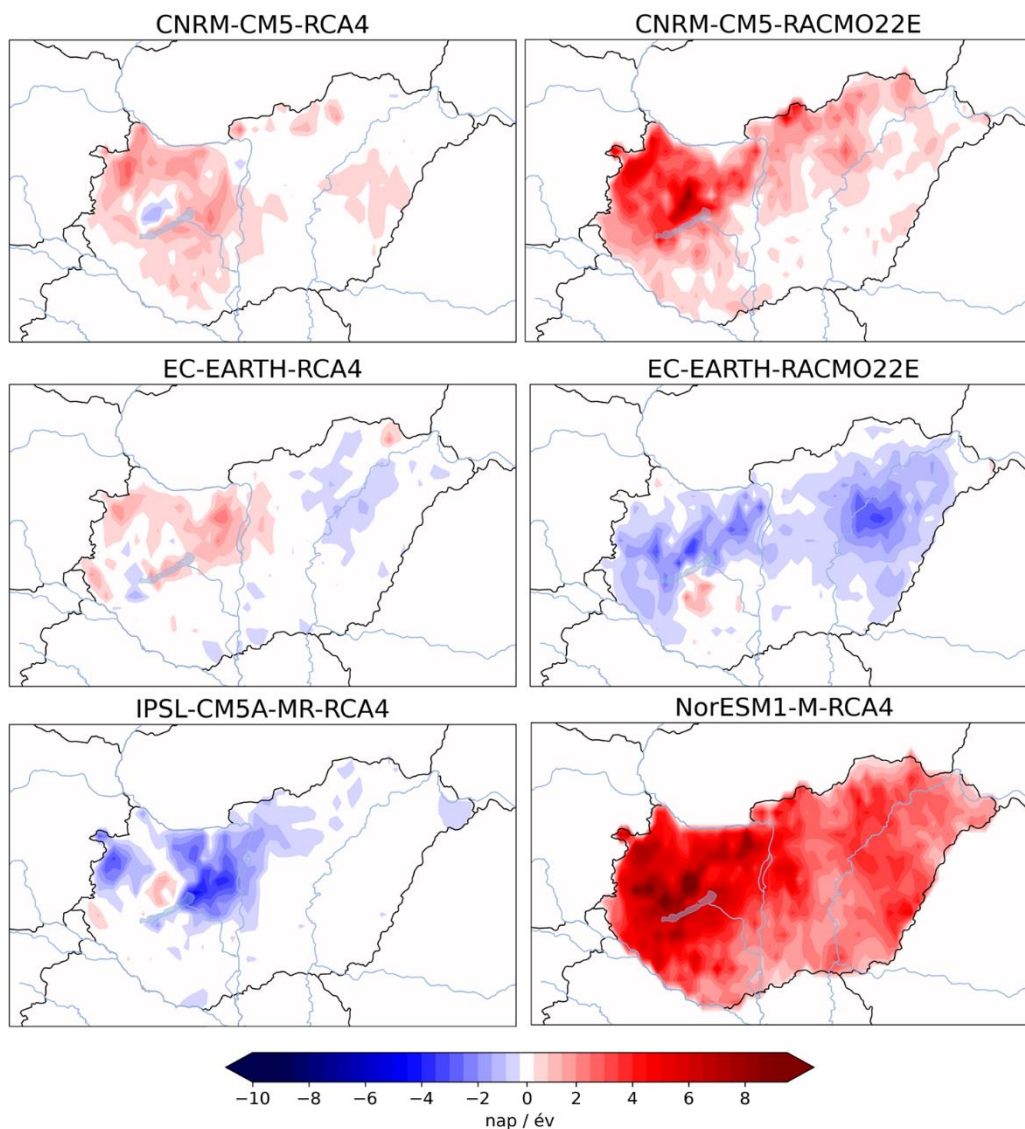
felülbecslés mértéke szinte a teljes országra vonatkozóan meghaladta a 30 napot, alulbecslés pedig csak a Bakony kisebb térségében mutatkozott.



10. ábra: Szélviharos napok éves átlagos modellezett számának eltérése a *HuClim* referencia adatbázistól 2001–2020-as időszakra, az egyes *Euro-CORDEX* modellszimulációk esetén.

4.2 Szélviharos napok a jövőben

A jövőbeli változások vizsgálatához az összes modellszimuláció esetén két üvegházgáz-kibocsátási scenáriót vettem figyelembe. A hibakorrekció elvégzése után az éves extrém szélleökéses napok átlagos számának a század végére (2081–2100) történő megváltozását vizsgáltam a 2001–2020-as referencia időszakhoz képest. Mindkét scenárió esetén az összes modell esetében megjelentek olyan térségek az országon belül, ahol valószínűsíthető valamilyen gyakorisági változás (11. és 12. ábra).

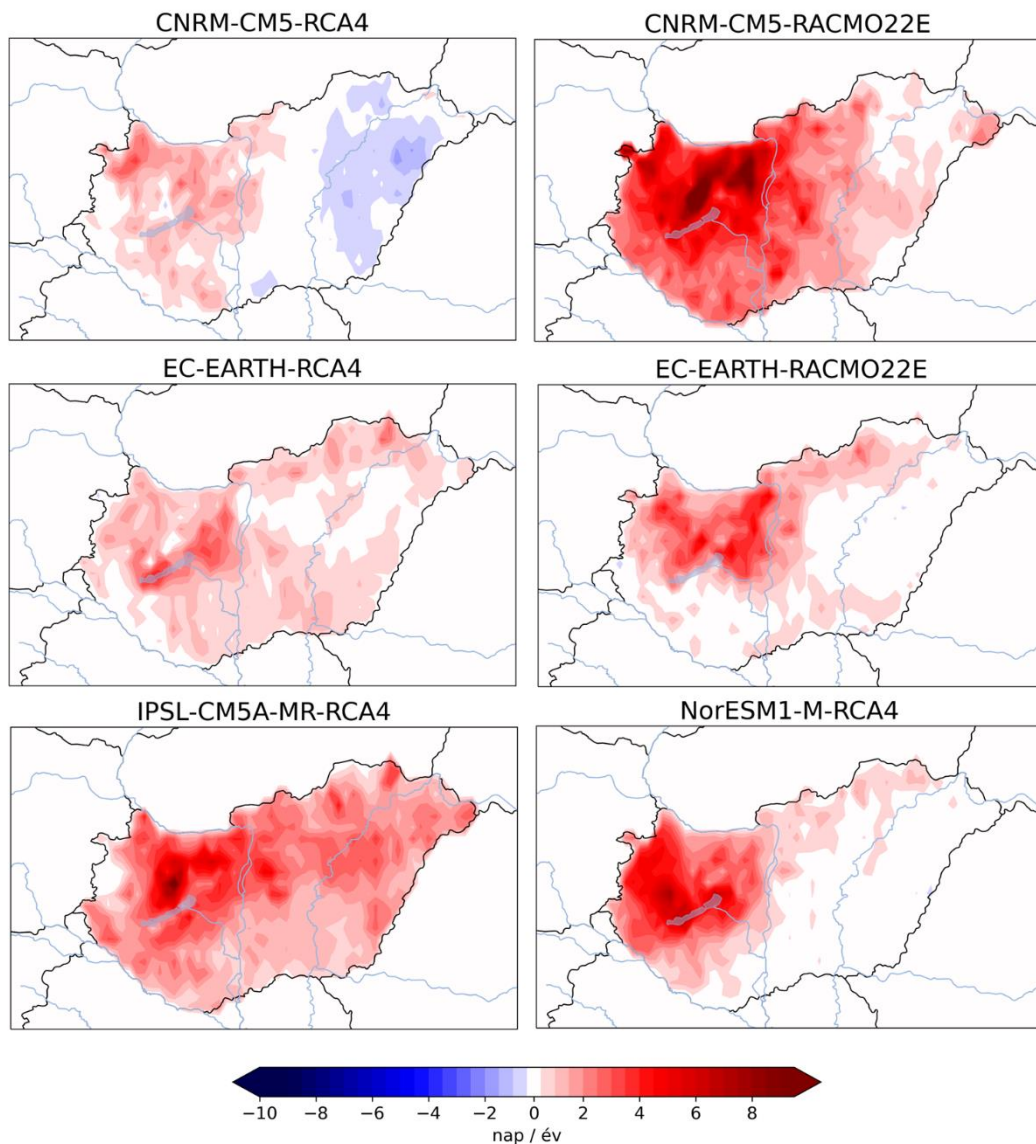


11. ábra: Éves átlagos szélviharos napok számának változása a különböző klímamodell szimulációk alapján, a 2080-2100-as időszakban a 2001-2020-as referencia időszakhoz képest, az RCP 4.5 forgatókönyv alapján.

Az optimistább, RCP 4.5 forgatókönyv szerint az egyes modellszimulációk között nem minden esetben van egyetértés a változás irányával és mértékével kapcsolatban (11. ábra). A legnagyobb, és egyben a többi szimulációhoz képest kiemelkedő növekvést a NorESM1-M-RCA4 klímamodell szimuláció becsüli, mely az ország szinte teljes területére évi 2 napos növekedést jelez. A Dunántúl térségében, ahol – mint az a *HuClim* adatbázis alapján végzett vizsgálatból kiderült – az elmúlt időszakban gyakrabban fordultak elő szélviharos napok, a modellszimuláció alapján a század végére várhatóan több mint 5 nappal fog növekedni évente az extrém szeles helyzetek száma. A Balaton és Bakony környékén, ahol a legtöbb extrém szeles esemény volt a múltban, a modellszimuláció több mint 10 napos növekedést prognosztizál. A térségben szintén nagy, körülbelül 8 napos növekedést vár a CNRM-CM5-RACMO22E szimuláció is, bár ez kisebb területre vonatkozik, mint a NorESM1-M-RCA4 szimuláció esetén. A Dunántúl legnagyobb részén növekedéssel számol az EC-EARTH-RCA4 és a CNRM-CM5-RCA4 modellszimuláció is, de mindkettő esetében ez kisebb mértékű, maximum 3 napos. Az utóbbi szimuláció annak ellenére, hogy a Bakony környezetében jellemzően több szélviharos nap előfordulását becsli, a hegyvidéken mégis 1-2 napos csökkenéssel számol. Az IPSL-CM5A-MR-RCA4 és EC-EARTH-RACMO22E modellszimulációk az eddigiekkel ellentétben az ország nagyobb részére inkább csökkenést várnak – az előbbi szimuláció az ország nyugati felében, az utóbbi pedig annak szinten teljes területére, de főként a Tiszántúlra vonatkozóan. A becsült csökkenések mértéke nem haladja meg a 6 napot. Összességében a szimulációk nagyobb mértékű változást várnak a Dunántúl térségében, mint az Alföldön, de a változás irányában nincs egyetértés az egyes modellszimulációk között az optimistább forgatókönyvet tekintve.

A pesszimistább, RCP 8.5 scenárióval számolva a modellszimulációk már sokkal inkább egyetértettek abban, hogy a század végére a szélviharos napok éves átlagos száma az ország nagy részén növekedni fog, főként annak a nyugati felében (12. ábra). A Bakony térségében szinte mindegyik szimuláció nagy mértékű növekedést vár: a CNRM-CM5-RACMO22E szimuláció esetén a referencia időszakhoz képest a század végére több, mint 10 nappal fog növekedni az extrém szeles napok száma, az IPSL-CM5A-MR-RCA4 és a NorESM1-M-RCA4 szimuláció szintén nagyobb, 5 napot meghaladó növekedésre számít. Ebben a térségben a legkisebb változást a CNRM-CM5-RCA4 modellszimuláció becsli, mely az egyetlen szimuláció, amely az ország keleti részében 1-2 napos csökkenést vár. Az RCP 4.5-ös forgatókönyvhöz képest szinte mindegyik modellszimuláció több szélviharos

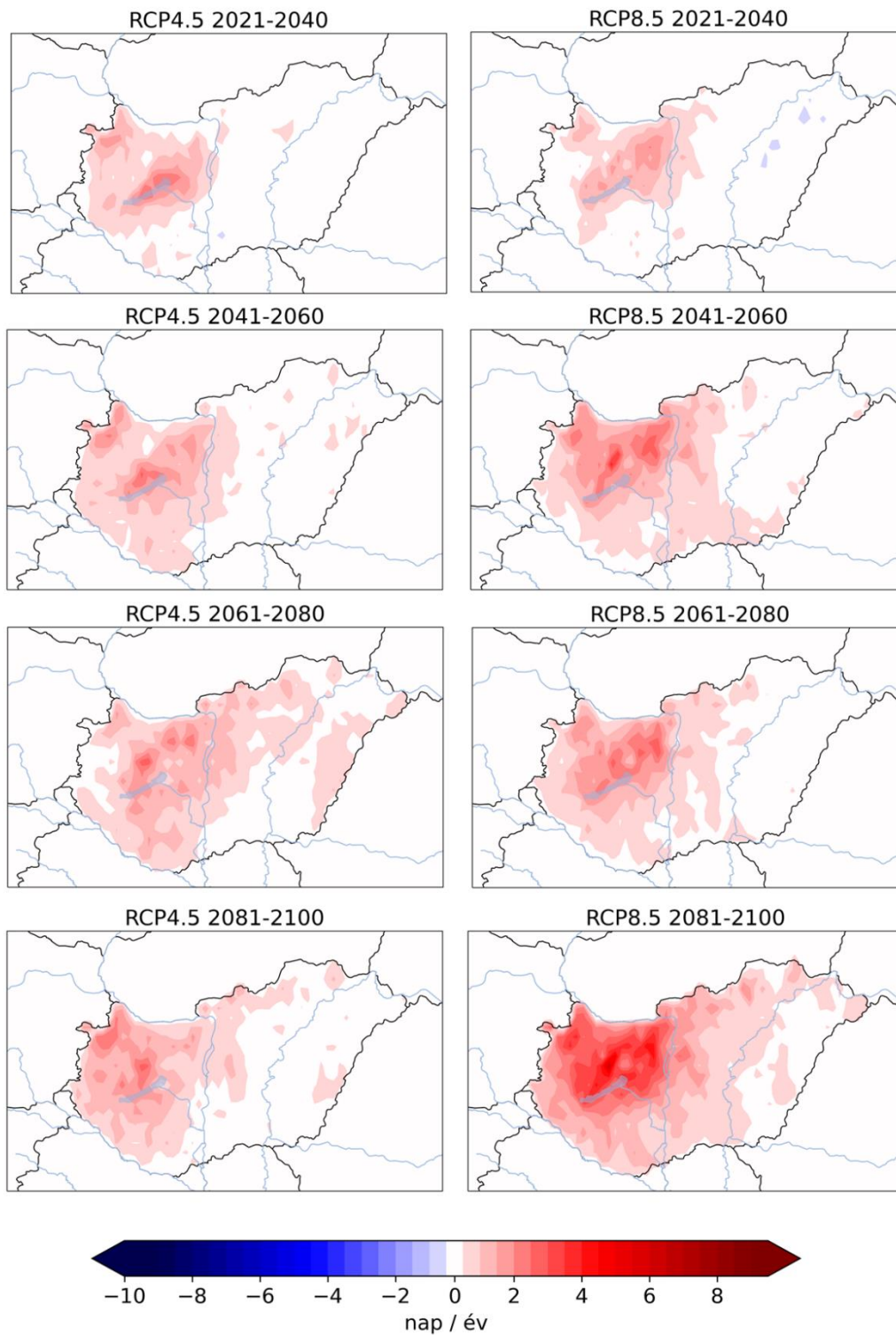
napot valószínűsít az évszázad utolsó 20 éves időszakára az RCP 8.5 forgatókönyv alapján. Az egyedüli kivétel a NorESM1-M-RCA4 szimuláció, amely amellet, hogy a pesszimistább forgatókönyv esetén kevésbé nagy mértékű növekedést vár a nyugati országrészben, a keleti országrészben az optimistább forgatókönyvvel ellentétben egyáltalán nem jelez változást.



12. ábra: Éves átlagos szélviharos napok számának változása a különböző klímamodell szimulációk alapján, a 2080-2100-as időszakban a 2001-2020-as referencia időszakhoz képest, az RCP 8.5 forgatókönyv alapján.

Összesítve az eddigieket, a 13. ábrán nyomon követhető a szélviharos napok változásának várható alakulása a modellszimulációk együttesét tekintve 2021 és 2100 között a két különböző forgatókönyv alapján. A térképeken a 20 éves időszakokra vonatkozó éves átlagos extrém szeles napok számának változása látható, a modellszimulációk átlagolásával

készített együttes modellátlag szerint.



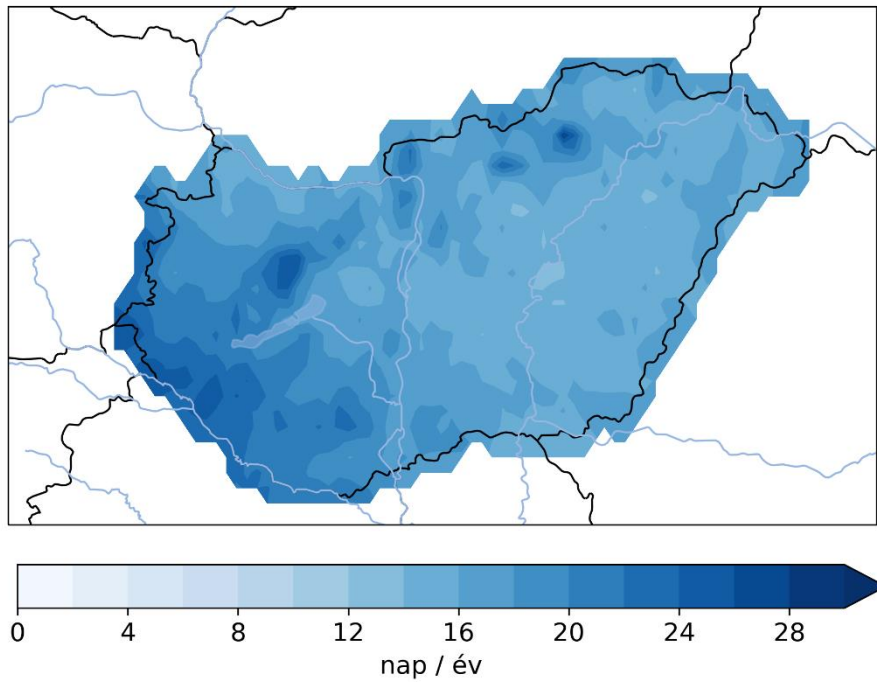
13. ábra: Éves átlagos szélviharos napok számának változása a jövőben a modellszimulációkból képzett modellátlag szerint, 20 éves időszakonként, az RCP 4.5 és RCP 8.5 forgatókönyvek alapján.
Referencia időszak: 2001–2020.

Mindkét forgatókönyv esetén a változás a 2021–2040-es időszakban az ország északnyugati részében várható, majd a század végére fokozatosan délebbre és keletebbre is kiterjed az extrém szeles napok éves számának növekedése. A modellátlag szerint is mindegyik vizsgált időszakban a legnagyobb növekedés a Balaton és Bakony térségében, valamint a Kisalföldön várható. Az RCP 4.5-ös forgatókönyv esetén az idő múlásával sokkal inkább a veszélyeztetett terület növekedése a szembeűnő, mintsem az évenként előforduló extrém szeles napok országos maximális számának növekedése. Az RCP 8.5-ös forgatókönyv esetén azonban a terület növekedése mellett a szélviharos napok éves átlagos országos maximális száma is fokozatosan növekszik, és a század végére várhatóan meghaladja majd a 6 napot.

4.3 Extrém csapadékos napok az elműlt 20 évben

Ahogy az a szakirodalomból is kiderűlt (pl.: *Catto és Dowdy, 2021; Owen et al., 2021*), az extrém szélhez Európa térségében extrém csapadék társul a leggyakrabban, ezért mielőtt a két tényező által létrehozott összetett extrém eseményeket vizsgáltam, szükségesnek tartottam, hogy külön a csapadéokra vonatkozóan is elvégezzek néhány számítás. Hasonlóan, mint az extrém szeles napok esetében, az extrém csapadékos napok számára is kiszámoltam a 2001–2020-as idűszakra vonatkozó éves átlagos értékeket Magyarország területére vonatkozóan, a *HuClim* adatbázis alapján (14. ábra). Extrém csapadékos napnak tekintetem minden olyan napot, amikor a 24 óra alatt lehullott csapadékmennyiség meghaladta a 10 mm-t.

Ilyen szélsőségesen csapadékos napok az ország teljes területén, évente átlagosan legalább egyszer előfordultak. A legtöbb alkalommal a Dunántűl délnyugati részén voltak jellemzők a nagy mennyiségű csapadékkal járó események, és szintén jelentős számban fordultak elő a Bakony térségében, illetve az Északi-középhegységben is. Ezekben a térségekben előfordulásuknak éves átlagos száma helyenként a 25 napot is meghaladta, míg az Alföld keleti részén, ahol az extrém csapadék kevésbé volt jellemző, számuk évente átlagosan 10-15 volt.

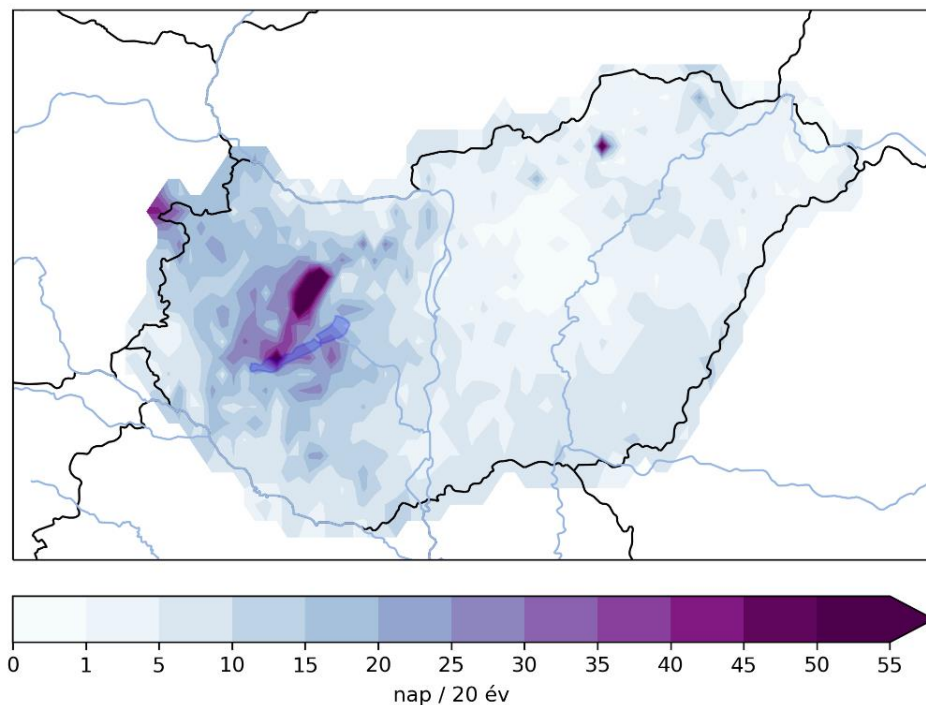


14. ábra: **Extrém csapadékos napok** (napi csapadékmennyiség >10 mm) **éves átlagos száma** Magyarország területén a *HuClim* adatbázis alapján, 2001–2021.

Az extrém csapadékos napok maximális száma (kb. 26 nap) a vizsgált 20 éves időszakban körülbelül fele annyi volt, mint az extrém szeles napok maximális éves átlagos száma (50 nap körül). E szerint, az elmúlt időszakban az extrém szeles események az ennek leginkább kitett térségben nagyobb számban fordultak elő, mint az extrém csapadékos eseményeknek kitett térségben a szélsőséges mennyiségű csapadék. Területi lefedettség szempontjából mindkét tényező esetében a nagyobb értékek a Dunántúl térségében jelentkeztek, de ezen belül míg az extrém szél inkább északnyugatabbra, az extrém csapadék inkább délnyugatabbra fordult elő jellemzőbben. A Balaton és Bakony környékén azonban mindkét tényező esetén maximális értékek rajzolódtak ki. Emiatt a két extrémum által együttesen meghatározott összetett extrém események gyakoribb előfordulását is ebben a térségben feltételeztem előzetesen. Az extrém szélhez képest azonban az extrém csapadék esetében nem olyan kontrasztos a keleti és nyugati országrész közti különbség, ugyanis míg szélviharos napok az ország keleti felében csak nagyon kevés alkalommal fordultak elő (jellemzően kevesebb mint 8 napon évente), nagy mennyiségű csapadékot általában több alkalommal (évente több mint 10 napon) jelentettek.

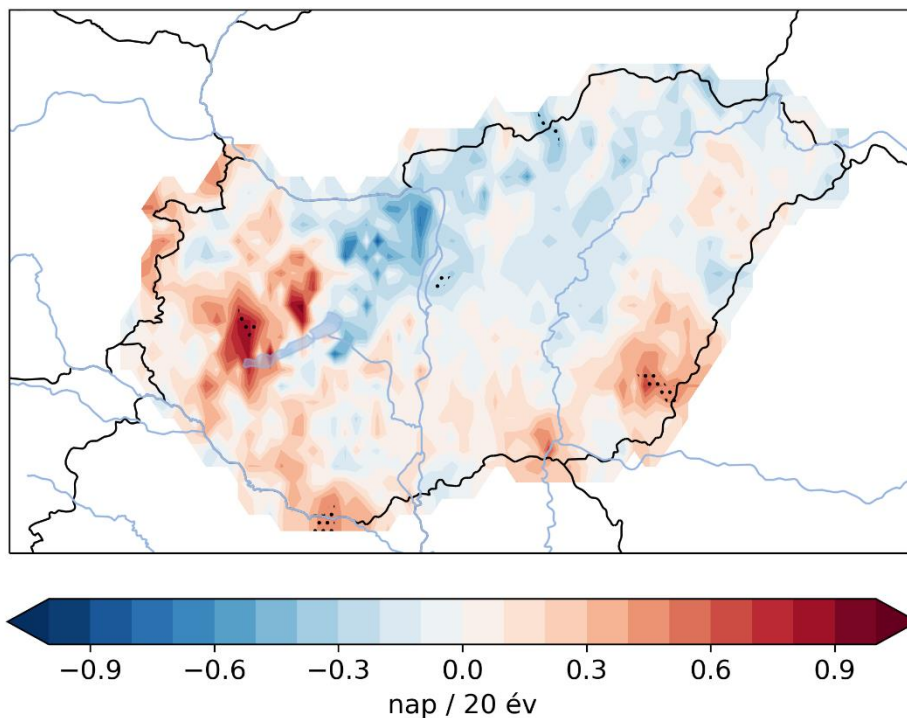
4.4 Összetett szeles-csapadékos események az elmúlt 20 évben

A viharos szellőkészekhez társuló nagy mennyiségű csapadék összetett extrém eseményeinek száma a 2001–2020-as időszakban Magyarország területének különböző részein nagyon eltérő számban jelent meg a *HuClim* adatbázis felhasználásával végzett számítások alapján (15. ábra). A 20 év alatt, ahogyan azt az extrém szélre és extrém csapadéokra vonatkozó korábbi vizsgálatokból sejteni lehetett, a legtöbb összetett esemény a Balaton és Bakony térségében fordult elő – itt összesen több mint 50 ilyen extrém nap volt. Szintén nagy számban fordult elő ilyen esemény Sopron térségében, illetve a Kékestető környékén. A Dunántúlon jellemzőbbek voltak a szeles-csapadékos összetett extrém események – azoknak a napoknak a száma, amelyek során előfordultak, 20 év alatt 10 és 20 közötti volt. Az Alföld keleti részén ezzel szemben az ilyen események lényegesen ritkábban fordultak elő (általában 1–10 napon). A Jászságban nagyobb területen egyetlen napon sem fordult elő ilyen heves esemény a teljes vizsgált időszak alatt, így a múltbeli tapasztalatok alapján ez a térség tekinthető a legkevésbé veszélyeztetettnek az országon belül.



15. ábra: **Összetett extrém szeles-csapadékos napok** (napi maximális szellőkés > 17 m/s és napi csapadékmennyiség > 10 mm) **összes száma Magyarország területén** a *HuClim* adatbázis alapján, **a 2001–2020-as időszak alatt.**

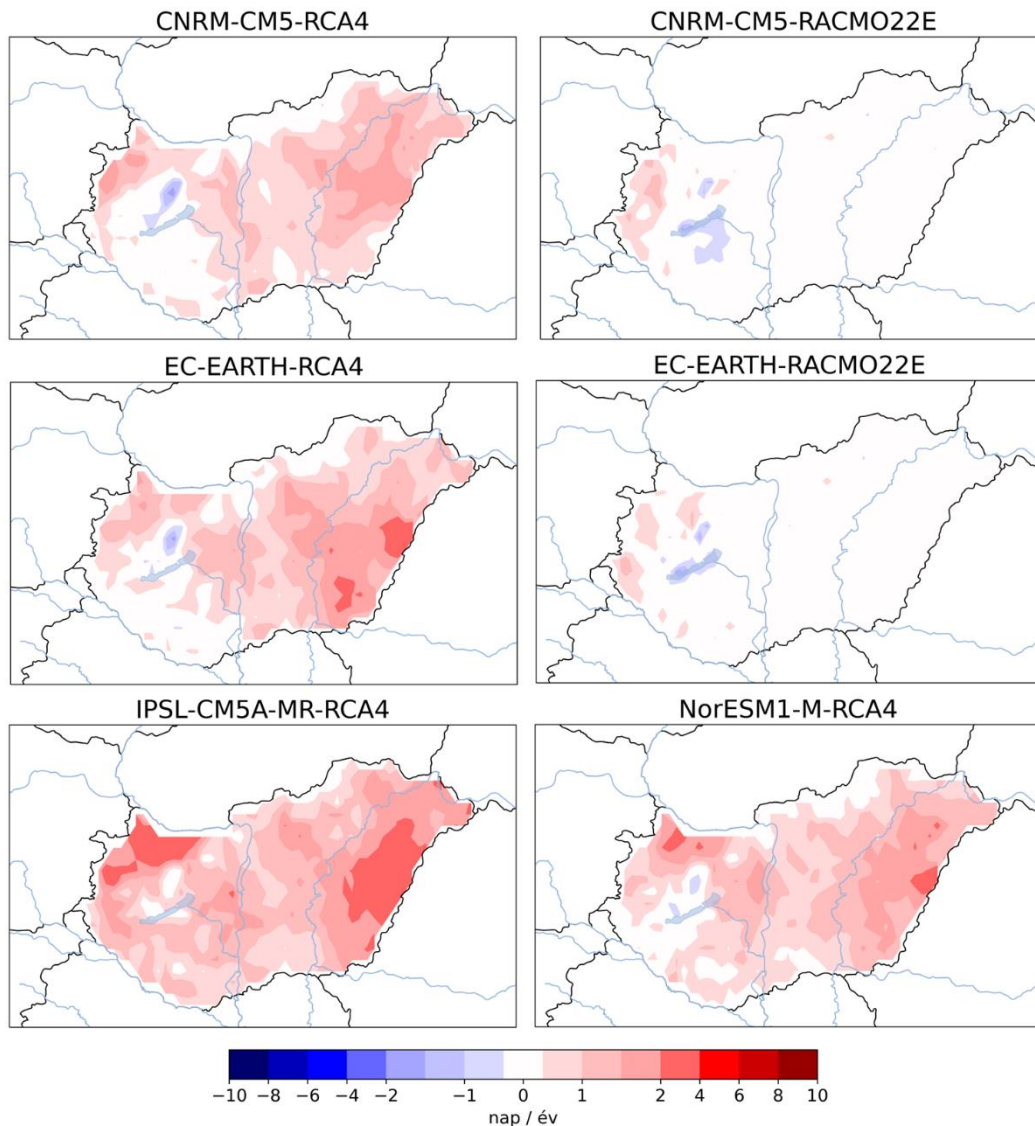
Az összetett szeles-csapadékos extrém események éves átlagos számának trendje még a szélviharos napok éves átlagos számának trendjéhez képest is kisebb területen szignifikáns (16. ábra). Sem a növekedés, sem a csökkenés mértéke nem haladta meg az 1 napot a vizsgált elmúlt 20 éves időszak alatt. A szélviharos napok számának trendjéhez képest azonban az összetett extrém események trendje nagyobb területen pozitív, és a növekedés leginkább a Bakony térségében mutatkozott meg. Itt néhány rácspontot lefedően az illetékt lineáris trend szignifikáns volt 0,05 szinten. Az ország délkeleti részén szintén akad néhány rácspont, ahol szignifikáns növekvő trend rajzolódott ki, ellentétben a szélviharos helyzetek esetével. Az ország északkeletre fekvő térségeiben azonban a szeles-csapadékos összetett események esetén is negatív a trend, mely csak a főváros környékén és az Északi-középhegységben tekinthető szignifikánsnak, pár rácspontot kitevő kisebb területeken.



16. ábra: Összetett extrém szeles-csapadékos napok éves átlagos számának lineáris trendje Magyarországon a HuClim adatbázis alapján, a 2001–2020-as időszak alatt. (A fekete pöttyök a 0,05 szinten szignifikáns rácspontokat jelzik.)

A *Euro-CORDEX* modellszimulációk validációját az összetett extrém eseményekre vonatkozóan is elvégeztem, akárcsak a korábban már bemutatott extrém szél esetén. Mivel összességében egy nagyságrenddel kevesebb összetett esemény fordult elő (évente átlagosan 5 nap körül a Bakony térségében), mint amennyi szélviharos eset (évente átlagosan 50 nap

körül ugyanebben a térségben), a modellszimulációk referencia mérési adatbázishoz (*HuClim*) képesti abszolút eltérése is kisebb volt az összetett extrémumok esetében, mint az extrém szélnél.



17. ábra: Összetett extrém szeles-csapadékos napok éves átlagos modellezett számának eltérése a HuClim referencia adatbázistól 2001–2020-as időszakra, az egyes Euro-CORDEX modellszimulációk esetén.

A legjobban ismét a RACMO22E regionális klímamodellekkel készült szimulációk teljesítettek, az éves átlagos szeles-csapadékos napok számában ugyanis ezek esetében csak 1–1,5 nap volt az eltérés az ország nyugati felének kisebb területein (17. ábra). A szimulációk mindegyike inkább túlbecsülte az összetett extrém események éves átlagos előfordulási számát, kisebb alulbecslés csak a Balaton és Bakony térségében volt jellemző. Az

összességében legrosszabbul teljesítő IPSL-CM5A-MR-RCA4 modellszimuláció azonban ebben a térségben jól teljesített, míg az ország többi részében jelentősebben felülbecsülte az extrém helyzetes napok számát, mint a többi szimuláció. A Kisalföldön és az Alföld keleti részén is meghaladta a felülbecslés mértéke az évi átlagos 2 napot. A többi szimuláció általában kevesebb nappal, vagy ilyen mértékben csak kisebb területen tévedett.

Területi eloszlás szempontjából a legtöbb modellszimuláció hasonló volt a *HuClim* adatbázisból számolt 20 év alatt előfordult összetett extrém eseményes napok számának országon belüli eloszlásával (*F2. ábra*). Az RCA4 regionális klímamodell szimuláció esetében azonban a keleti országrészben lényegesen nagyobb számban fordultak elő összetett heves események, mint amennyi a méréseken alapuló adatbázisban szerepel, így az országon belüli eloszlás esetükben kiegyenlítettebbnek mutatkozik.

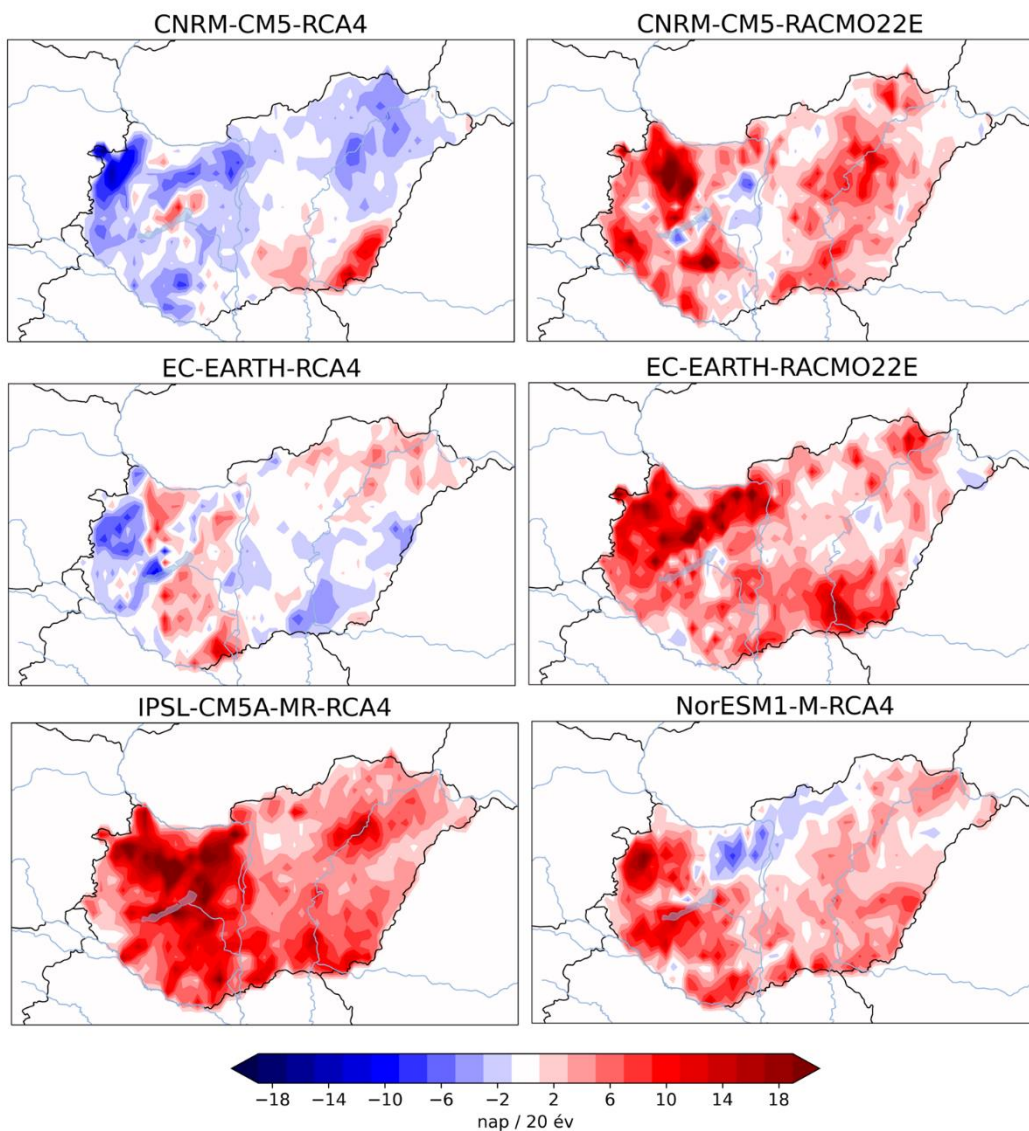
4.5 Összetett szeles-csapadékos események a jövőben

A modellszimulációk összetett extrém szeles-csapadékos eseményekre vonatkozó korrekciója után, melyet a *HuClim* adatbázis alapján végeztem el, az extrém helyzetek jövőbeli változásának vizsgálata következett. Ebben az esetben nem az összetett extrém eseményes napok számának éves átlagos számát (ahogyan azt az extrém szél vizsgálatának esetében tettem), hanem a 20 év alatt összesen előforduló ilyen jellegű szélsőséges napok számát tekintettem. Itt is két üvegházhatású-gáz kibocsátási scenáriót vettem figyelembe: az RCP 4.5 és RCP 8.5 forgatókönyvet, melyek alapján a vizsgált változó század végére (2081–2100-ra) előrejelzett értékeit hasonlítottam össze a referencia időszakkal (2001–2020).

Az RCP 4.5 forgatókönyv szerint nem minden modellszimuláció esetén látszik egyetértés abban, hogy az ország nagyobb területén inkább csökkenés vagy növekedés várható a szeles-csapadékos napok számában (18. ábra). A legtöbb szimuláció azonban inkább növekedést vár, mely az északnyugati országrészben a legjelentősebb: ez a becsült növekedés bizonyos térségekben akár a 20 napot is meghaladhatja. Országosan a legnagyobb növekedést, hasonlóan az extrém szeles napok számához, ebben az esetben is az IPSL-CM5A-MR-RCA4 klímamodell szimuláció becsli, mely – a többi szimulációval ellentétben – csökkenésre egyáltalán nem számít Magyarországon. 20 napnál is több lehet az extrém szeles-csapadékos napok száma a Bakony térségén kívül a Kisalföld nagy részén is, de az ország keleti felében is jelentős, általában 8 napot meghaladó különbség léphet fel a két vizsgált időszak között.

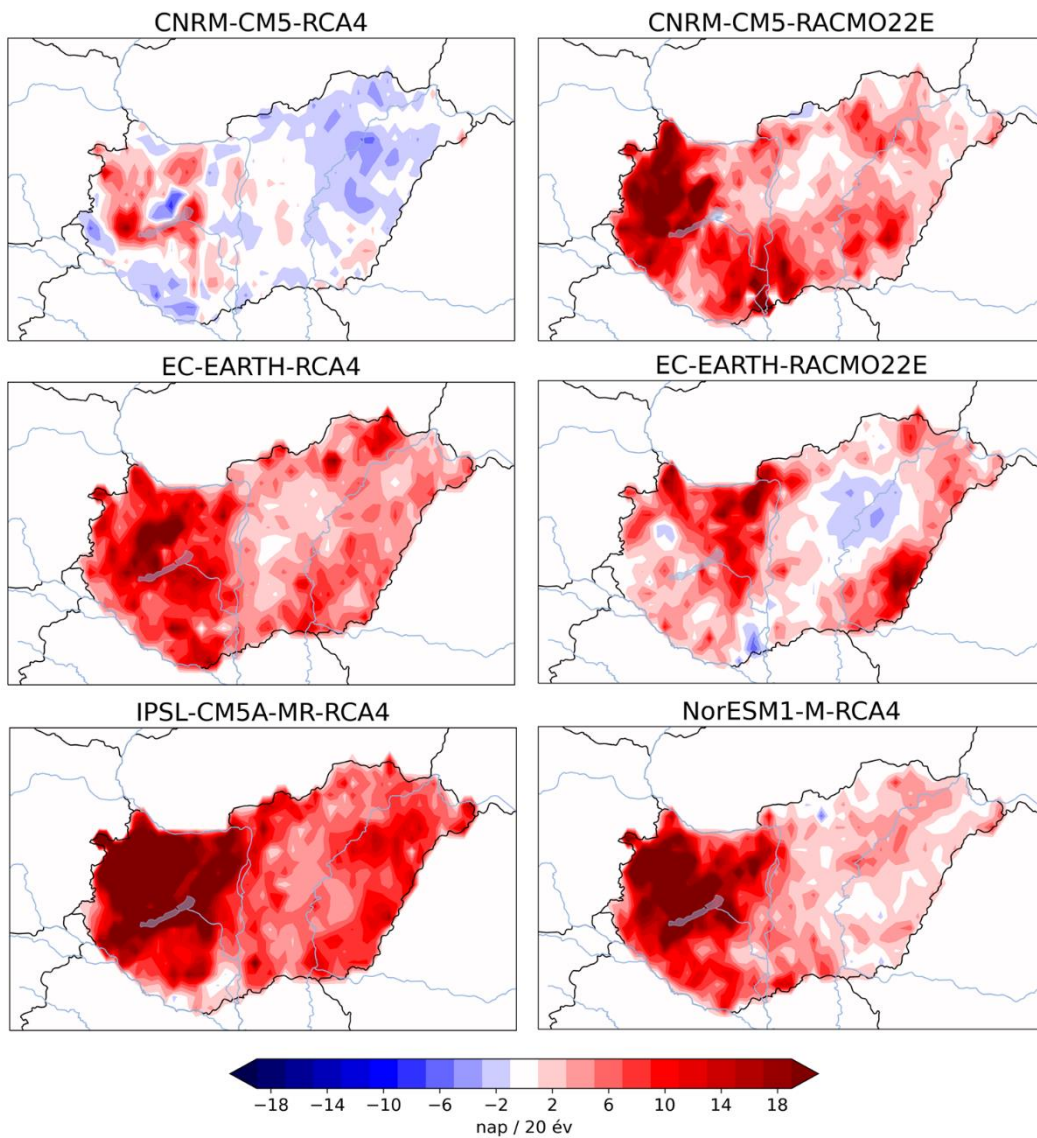
A modellszimulációk többsége egyetért abban, hogy növekedés inkább a nyugati országrészben várható, azonban az, hogy hol várható csökkenés már sokkal bizonytalanabb. Az EC-EARTH-RACMO22E szimuláció csak nagyon kis térségekben valószínűsít csökkenést, az ország területén elszórtan. A CNRM-CM5-RACMO22E szimuláció inkább az ország középső részén vár 2–8 napos csökkentést, de az érintett terület ebben az esetben is viszonylag kicsi. Az ország északi részében, nagyobb térbeli kiterjedésű 2–8 napos csökkenést jelez előre a NorESM1-M-RCA4 klímamodell szimuláció, az EC-EARTH-RCA4 szimuláció pedig ennél még nagyobb arányban, az ország nyugati határa környékén és az Alföld egyes keletebbre fekvő térségeiben vár csökkenést. A

CNRM-CM5-RCA4 szimuláció az egyetlen, amely az ország túlnyomó részében csökkenést prognosztizál, mely az északnyugati határvonal környékén a legjelentősebb (15 napot meghaladó), de szintén jelentős északkeleten is (2–6 nap). Növekedést az RCP 4.5 forgatókönyvvel számolva ez a modellszimuláció csak a Bakony térségére és az ország délkeleti szélére vár (kb. 10 nap).



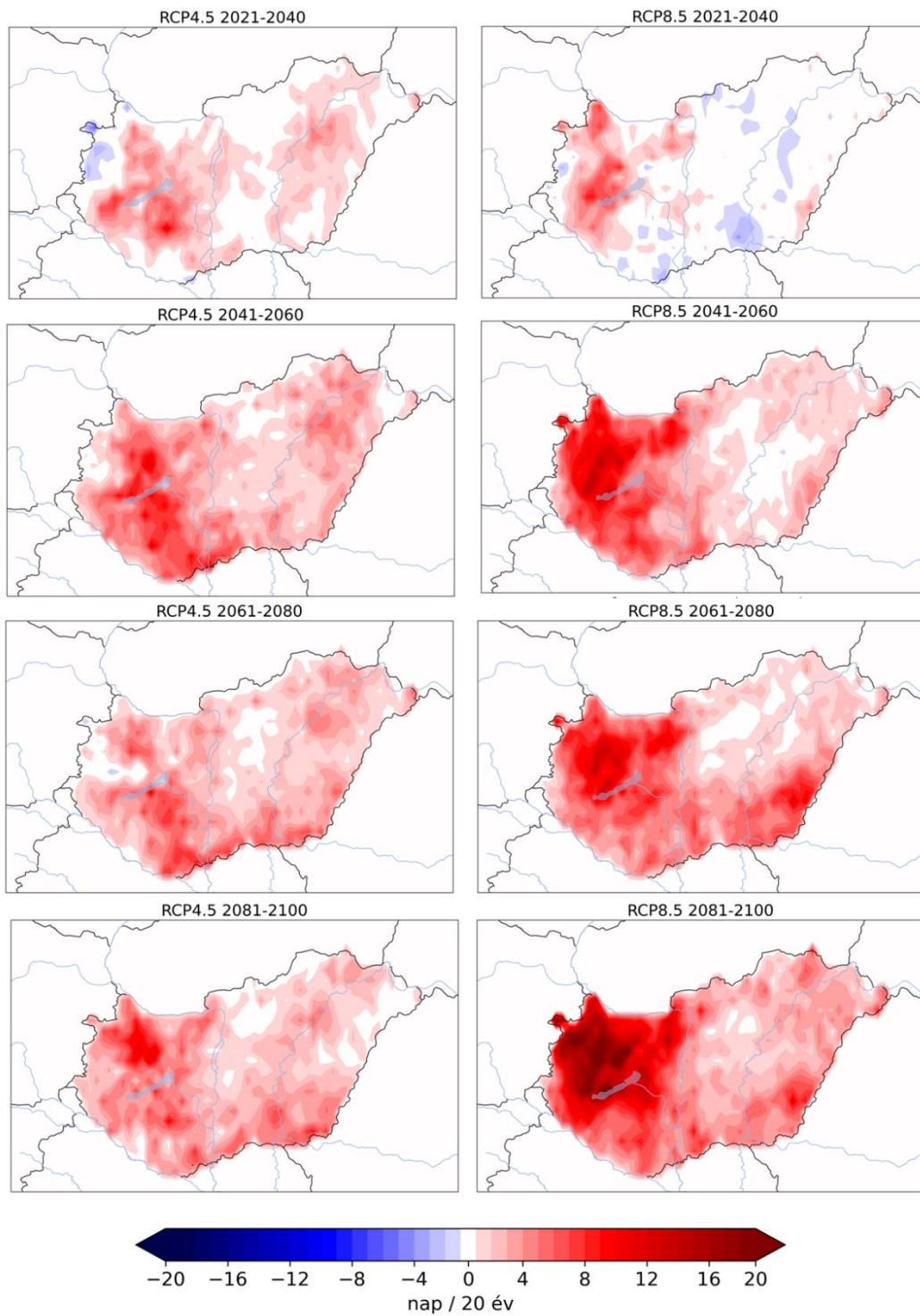
18. ábra: 20 év alatt előforduló összetett extrém szeles-csapadékos napok számának változása a különböző klímamodell szimulációk alapján, a 2080–2100-as időszakban a 2001–2020-as referencia időszakhoz képest, az RCP 4.5 forgatókönyv alapján.

Az RCP 8.5 forgatókönyv alapján a modellszimulációk már sokkal nagyobb területre és nagyobb mértékben valószínűsítik a 20 év alatt előforduló összetett szeles-csapadékos események számának növekedését (19. ábra). A legnagyobb növekedés az északnyugati országrészben várható, ahol négy modell esetében is több mint 20 nappal növekszik meg az ilyen jellegű heves eseményes napok száma. Az IPSL-CM5A-MR-RCA4 szimuláció a pesszimistább forgatókönyv esetén is kiemelkedően nagy mértékű növekedést jelez az ország szinte teljes területére. Az EC-EARTH-RCA4, CNRM-CM5-RACMO22E és NorESM1-M-RCA4 szimulációk szintén nem várnak jelentős nagyságú területen csökkenést, szinte a teljes ország területén növekedéssel számolnak. Az EC-EARTH-RACMO22E modellszimuláció a Jászságban és a Mátra környékén vár 2–4 napos csökkenést, az ország nagyobb részén azonban szintén növekedést becsül, melynek maximuma Nógrád, illetve Békés vármegye térségében várható. A CNRM-CM5-RCA4 szimuláció az RCP 8.5 forgatókönyvvel számolva is nagyobb területen prognosztizálja az összetett extrém szeles-csapadékos napok számának csökkenését, mely az Alföldön kívül a Bakony térségében is viszonylag jelentős – 4 napot meghaladó.



19. ábra: 20 év alatt előforduló összetett extrém szeles-csapadékos napok számának változása a különböző klímamodel szimulációk alapján, a 2080–2100-as időszakban a 2001–2020-as referencia időszakhoz képest, az RCP 8.5 forgatókönyv alapján.

A modellszimulációk együtteséből képzett átlagot tekintve az érintett terület mindkét forgatókönyv esetén fokozatosan növekszik, először az ország nyugati felében, majd annak keleti szélén (20. ábra). Legkésőbb a Duna-Tisza közében kezd el növekedni az összetett extrém szeles-csapadékos napok száma. A 2021–2040-es időszakban az RCP 4.5 forgatókönyv alapján a növekedés mértéke nagyobb területen várható, mint az RCP 8.5 alapján, amely szerint több térségben várható az összetett szeles-csapadékos események előfordulási gyakoriságának csökkenése. A következő 20 éves időszakban azonban a csökkenés mindkét forgatókönyv esetén teljesen eltűnik, és a növekedés mértéke az RCP 8.5-ös scenárió alapján a Balaton térségében már nagyobb, mint az RCP 4.5-ös forgatókönyv szerint. Ezután a pesszimistább forgatókönyv alapján azoknak a napoknak a száma, amelyek során heves események fordulnak elő, tovább növekszik, az optimistább forgatókönyv szerint viszont stabilizálódik előfordulási gyakoriságuk, a következő két 20 éves időszak között ugyanis csak kisebb különbségek várhatók. Összességében tehát az RCP 8.5-ös forgatókönyv esetén az extrém szeles csapadékos napok számának növekedése később kezdődik meg, mint az optimistább RCP 4.5-ös forgatókönyvet követve, azonban később sokkal gyorsabban várható a változás. A század végére pedig már kontrasztos a különbség a két forgatókönyv között – míg az RCP 8.5 scenárióval számolva a modellátlag alapján az északnyugati országrészben összességében több mint 20 napos növekedésre számíthatunk, az RCP 4.5-ös forgatókönyvvel ugyanebben a térségben csak körülbelül fele ennyire, 10 nappal nő meg várhatóan az extrém szeles-csapadékos napok száma.



20. ábra: 20 év alatt előforduló összetett extrém szeles-csapadékos napok számának változása a jövőben a modellszimulációk együtteséből képzett **modellátlag szerint**, 20 éves időszakonként, az **RCP 4.5 és RCP 8.5** forgatókönyvek alapján. Referencia időszak: 2001–2020.

4.5.1 Jövőbeli trendek Magyarország északnyugati térségében

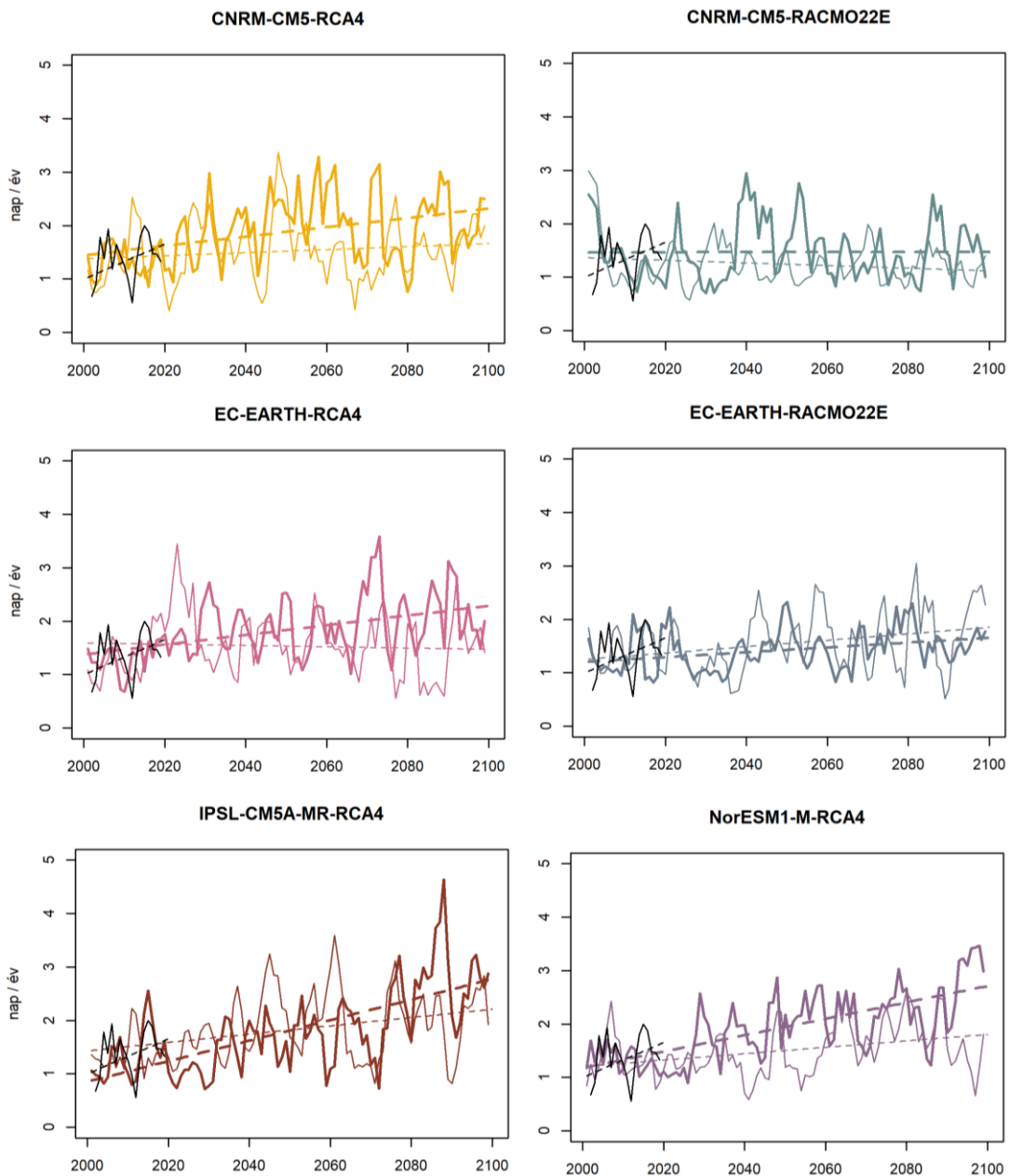
Mivel a legnagyobb változás az összes modellszimuláció szerint mindkét kibocsátási scenárió alapján a Bakony térségében várható a század végére, ezért ebben a térségben trendvizsgálatot végeztem, hogy az extrém szeles-csapadékos napok éves számának alakulását részletesebben nyomon lehessen követni.

A 21. ábrán a hibakorrigált hat modellszimuláció mindkét kibocsátási scenárió szerinti előrejelzését jeleníti meg: az összetett szeles-csapadékos események adott éven belüli előfordulási számát (3 éves simítással) és az illesztett lineáris trendjét, 2001-től 2100-ig, a 3.3. fejezet 7. ábrán bemutatott kiválasztott régió területi átlagára vonatkozóan (é.sz.: $46^{\circ}36' - 47^{\circ}24'$, k.h.: $17^{\circ} - 18^{\circ}$). A 2001-2020-as referencia időszakban a *HuClim* referencia adatbázis is szerepel a diagramokon (fekete színnel). Mindegyik modellszimuláció esetén a vastag folytonos vonal az RCP 8.5-ös scenárió szerinti becslést jelöli, a vastag szaggatott vonal pedig a hozzá tartozó lineáris trend. Hasonlóan, a vékony színes vonal az RCP 4.5-ös scenárió szerinti előrejelzés, a vékony szaggatott vonal pedig ennek lineáris trendje.

Az RCP 4.5-ös forgatókönyv szerint a modellszimulációk legnagyobb része nem vár jelentős változást a század végére az extrém szeles-csapadékos napok éves számában. A CNRM-CM5-RCA4 és EC-EARTH-RCA4 szimulációk összességében egyáltalán nem számítanak változásra, a CNRM-CM5-RACMO22E szimuláció nagyon kis (kb. fél nap) csökkenésre számít, a többi három szimuláció pedig szintén kis, kb. fél napos növekedést vár. Az RCP 8.5-ös scenárió általában nagyobb növekedéssel számol (legalább fél nap, de nem több mint 2 nap), bár néhány szimuláció ebben az esetben is eltérő előrejelzést ad: a CNRM-CM5-RACMO22E és az EC-EARTH-RACMO22E szimuláció nem vár jelentősebb változást a pesszimistább forgatókönyv esetén sem. Az utóbbi szimuláció – a többivel ellentétben – az optimistább scenárióhoz képest kisebb változásra számít az RCP 8.5-ös forgatókönyv érvényesülése esetén. A legnagyobb változást az IPSL-CM5A-MR-RCA4 és a NorESM1-M-RCA4 szimuláció becsüli, melyek szerint az elmúlt időszakban jellemző átlagos évi 1 nap a század végére körülbelül 2,5 napra növekedhet meg.

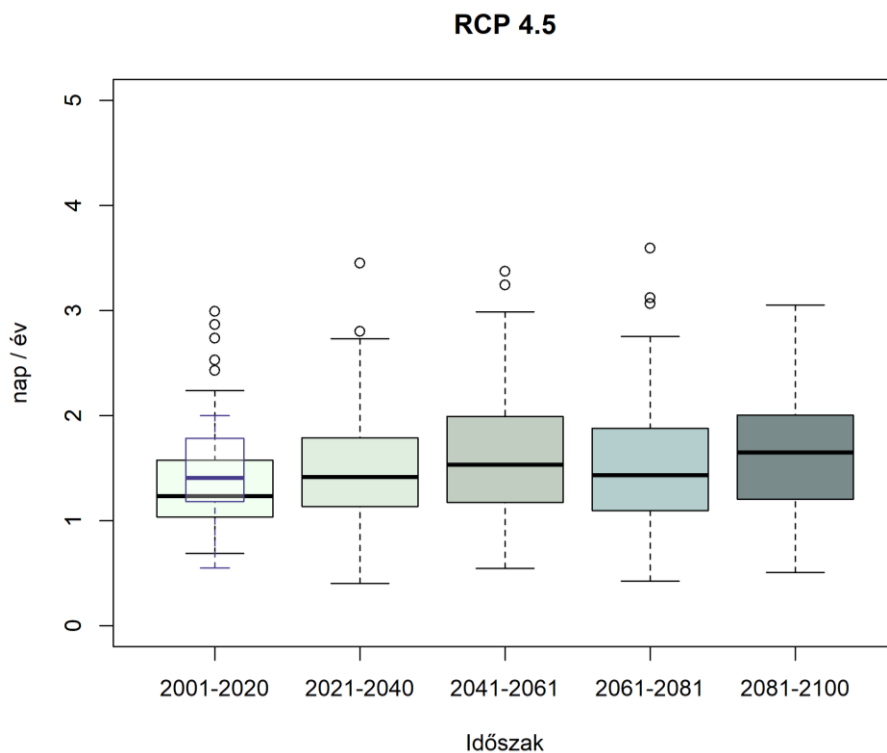
Bár összességében a trend nem mutat nagy változást az évszázad végére, ha az éves előfordulási számokat tekintjük (amelyek igen nagy változékonyságot rajzolnak ki az egyes

évek között) a legtöbb szimuláció esetén a referencia időszak *HuClim* szerinti éves előfordulásokhoz képest jelentősebb eltérések is megmutatkoznak. Az IPSL-CM5A-MR-RCA4 szimuláció esetében például a század utolsó 20 éves időszakában az RCP 8.5-ös forgatókönyv alapján előfordulhat olyan év, amikor a szeles-csapadékos extrém helyzetes napok száma eléri az 5-öt, ami a század eleji 2 napos maximumhoz képest jelentős különbség.



21. ábra: Az összetett extrém szeles-csapadékos napok számának korigált szimulált idősorai és az erre illeszthető jövőben várható trendek a Bakony térségében a 6 modellszimuláció szerint. Folytonos vonal: éves előfordulás, szaggatott vonal: trend. Vastag vonal: RCP 8.5-ös forgatókönyv, vékony vonal: RCP 4.5-ös forgatókönyv. Fekete vonal: *HuClim*.

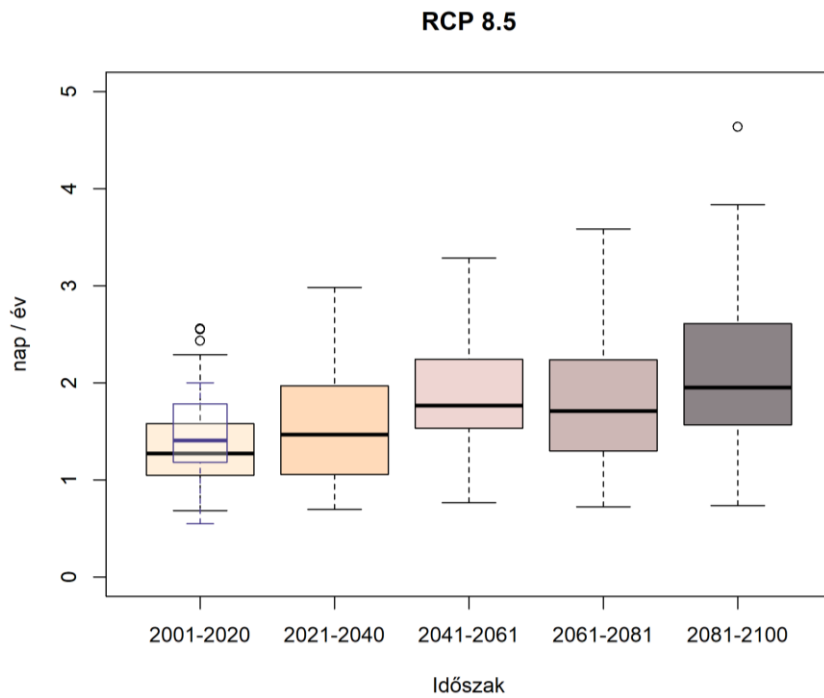
Mivel a szimulált idősorok egyes éveit valójában nem köthetjük konkrét évszámokhoz, ezért a teljes évszázadot öt 20 éves időszakra bontva és a kapott idősorokat statisztikai sokaságként értelmezve folytattam az elemzést. A 22. és 23. ábra a hat modellszimuláció együttesét jeleníti meg, az említett 20 éves időszakokra vonatkozóan rendre az RCP 4.5 és RCP 8.5 forgatókönyv alapján. A *Box-Whisker* diagramok jelzik a kijelölt időszak minden évére vonatkozó összetett extrém szeles-csapadékos események éven belüli előfordulási számát az összes modellszimuláció felhasználásával. Az átlátszó, lila körvonalú doboz a *HuClim* referencia adatbázis adatait reprezentálja a 2001–2020-as referencia időszakra. A dobozdiagram alapján leolvasható az adatok mediánja (vízszintes vonal a dobozokon belül), az alsó és felső kvartilis (a dobozok alsó és felső határa), a minimum- és maximumértékek (a dobozokon kívüli vonalvégek) és a kiugró, extrém értékek (kis karikák). Az alsó és felső kvartilis között kirajzolódó doboz jelzi azt az intervallumot, amelybe az adatok középső fele tartozik.



22. ábra: Az összetett extrém szeles-csapadékos napok éves előfordulási gyakoriságának dobozdiagramja, 20 éves időszakokra vonatkozóan a 6 vizsgált modellszimuláció becslése (színes dobozok) és a *HuClim* referencia adatbázis (átlátszó doboz) alapján, az RCP 4.5 forgatókönyv esetén a Bakony térségében.

Az RCP 4.5 scenárióval számolva (22. ábra) az évszázad végére a medián nem sokat változik, azonban a maximális értékek majdnem egy teljes nappal megnövekedhetnek a század végére. Ezek az értékek területi átlagra vonatkoznak a Bakony térségében, melyeknek mediánja a század elején 1 nap körüli, maximuma pedig 2 nap körüli; az éves előfordulási gyakoriság majdnem egy napos növekedése arányaiban tekintve kb. 30%-ot jelent. A növekedés azonban nem folyamatos a teljes évszázad során, hanem ingadozik – a 2061–2080 időszakban a megjelenített statisztikai mutatók valamelyest kisebbek, mint a 2041–2060 időszakban, majd az utolsó időszakban értékük ismét megnövekszik. A kiugró extrémumok száma és értéke is változó a század során.

Az RCP 8.5-ös forgatókönyvvel futtatva a modellszimulációk már szembetűnőbb változást jeleznek előre (23. ábra). Bár a medián növekedése ebben az esetben sem éri el az évszázad utolsó 20 éves időszakára az 1 teljes napot, a maximális értékekben folyamatos növekedés várható, a század végére majdnem két napot változik, ami a kezdeti évi 2 naphoz képest körülbelül 90%-os növekedést jelent. Az RCP 4.5-ös forgatókönyvnél megjelenő kiugró értékek a pesszimistább forgatókönyv esetén nem jelennek meg, a maximumok értéke azonban az optimistább scenárió kiugró értékeit is magába foglalja. Ez arra utal, hogy a pesszimistább forgatókönyv szerint gyakrabban lesznek olyan évek, amikor több heves összetett szeles-csapadékos nap fordul elő, mint átlagosan. A minimumok esetén a változás természetesen nagyon kicsi az évszázad során, ami azt jelzi, hogy eszerint a scenárió szerint nem számíthatunk az extrém szeles-csapadékos napok számának a csökkenésére.



23. ábra: Az összetett extrém szeles-csapadékos napok éves előfordulási gyakoriságának dobozdiagramja, 20 éves időszakokra vonatkozóan a 6 vizsgált modellszimuláció becslése (színes dobozok) és a *HuClim* referencia adatbázis (átlátszó doboz) alapján, az **RCP 8.5 forgatókönyv esetén a **Bakony térségében**.**

5. Összefoglalás

Diplomamunkám olyan összetett extrém események bemutatására fókuszál, melyek egyik résztvevője az extrém szél, a társuló tényező pedig az extrém csapadék (mivel mint ahogyan az a szakirodalomból is kiderült, Európa nagy részén – beleértve Magyarországot is – ez kíséri a széles eseményeket a leggyakrabban). Amellett, hogy tartalmazza az ilyen jellegű extrém időjárási események múltbeli előfordulásainak elemzését, kitekintést nyújt a jövőben várható változásokra is.

A dolgozat egy rövid bevezető után a *2. fejezetben* röviden összefoglalja a témához kapcsolódó szakirodalmat, melyből kiderül, hogy az extrém szél és extrém csapadék között erős kapcsolat áll fenn, különösen a téli félévben, a mérsékelt övben. A két extrémum társulása gyakran ciklonokhoz kötődik: az alacsonyabb szélességeken trópusi ciklonok, a magasabb szélességeken pedig mérsékelt övi ciklonok okozzák az igen nagy károkkal járó összetett eseményeket. A különböző formában megjelenő széles-csapadékos eseményeknek különböző hatásai vannak. Az extrém szél a Földön bárhol pusztíthat tornádó formájában, a hegyvidékeken megjelenhet lejtőviharként, a száraz, sivatagos vidékeken pedig például habubként, míg az extrém csapadék általában áradások kialakulásáért felel, melyek létrejöhetnek egészen rövid idő alatt is (ún. villámárvizek formájában). A két esemény társulásának fokozott hatása főként a partmenti térségekben érzékelhető, ahol az erős hullámozás és a nagy csapadék még intenzívebb áradást okoz. Az infrastruktúrára azonban a kontinensek belsejében is nagy veszélyt jelentenek. Az összetett extrém események jövőbeli alakulását tárgyaló szakirodalomból kiderült, hogy a klímaváltozás hatására nemcsak olyan extrém események változására kell felkészülni, amelyek jelenleg ismertek, hanem figyelembe kell venni, hogy olyan összetett extrém események is kialakulhatnak, amelyekre eddig még nem volt példa.

A *3. fejezetben* bemutattam a Magyarországon előforduló összetett extrém széles-csapadékos események vizsgálatához felhasznált adatbázisokat (*HuClim* mérési adatokból előállított rácsponti adatbázis és hat *Euro-CORDEX* klímamodell szimuláció), majd az alkalmazott módszereket, munkafolyamatot. A vizsgálat az adatok előfeldolgozásával kezdődött, melyeket a következő lépésben az extrém szél, az extrém csapadék és a két tényező együttes előfordulásával jellemezhető extrém események múltbeli statisztikai

elemzésére használtam (pl. az éves átlagos előfordulási szám számításával, a lineáris trend illesztésével). Ezt követte a modellszimulációk validációja és hibakorrektiója külön az extrém szélre és külön az összetett extrém szeles-csapadékos helyzetekre vonatkozóan, majd a hibakorrigált modellszimulációk jövőre vonatkozó előrejelzéseinek áttekintése.

A vizsgálat eredményeit az utolsó fejezet ismerteti, melynek első alfejezetéből kiderül, hogy a legtöbb szélviharos nap jellemzően a Balaton és Bakony térségében fordult elő a vizsgált 2001–2020-as időszakban, ami évente átlagosan elérte a 60 napot. A húsz év alatt a trend az ország legnagyobb részén jellemzően inkább csökkenő volt, ám ezt csak kevés rácspontra lehetett szignifikánsnak tekinteni. A második alfejezet az extrém szél előfordulási gyakoriságának jövőbeli várható alakulását (2021–2100) mutatja be a különböző klímamodellek szimulációk két üvegházhatású gáz kibocsátási szcenárió (RCP 4.5 és RCP 8.5) szerinti előrejelzésének felhasználásával. Míg az optimistább forgatókönyv szerint a modellek kevésbé értenek egyet abban, hogy milyen irányú és mértékű változásra kell felkészülni, a pesszimistább forgatókönyvben sokkal egyértelműbben kirajzolódik, hogy a század végére főként a Dunántúl északi részében az ilyen események gyakoribb előfordulására kell felkészülni. Az említett térségben az évenként előforduló szeles csapadékos napok száma akár 6 nappal is megnövekedhet, míg az ország keleti részében a változás ennél sokkal kisebb mértékű (0-2 nap) lesz.

A következő alfejezet röviden összefoglalja az extrém csapadékos napok előfordulásának gyakoriságát az elmúlt 20 évre vonatkozóan, melyek maximális értéke (évente átlagosan 30 nap körül) a Dunántúl déli részén volt jellemző. Ezt követően rátérek az összetett szeles-csapadékos extrém helyzetek elemzésére, melyet szintén a múltbeli előfordulási jellemzők ismertetésével kezdek a *4.4 alfejezetben*. A két extrémum társulása a Bakony térségében volt a legjellemzőbb, ahol a 21. század első két évtizede alatt összesen több mint 50 összetett esemény fordult elő. Az ország keleti felében azonban az ilyen napok száma sokkal kisebb volt, jellemzően egy nagyságrenddel. A trend ebben az esetben is csak kis területen volt szignifikáns, ám a szélhez képest itt nagyobb volt a növekvő trend aránya az országon belül.

Az utolsó alfejezet az összetett extrém szeles-csapadékos események jövőbeli várható alakulására vonatkozó elemzésre fókuszál, melynek egyik fő üzenete, hogy a szélhez hasonlóan az összetett események számának növekedése is az RCP 8.5-ös forgatókönyv

érvényesülése esetén lesz jelentősebb. Mindkét scenárió az ország szinte teljes területére növekedést vár, a legnagyobb értékeket pedig a Bakony környékére jelzi előre. Az évszázad utolsó 20 évében összesen előforduló összetett extrém eseményes napok számában az optimistább forgatókönyv összesen kb. 10 napos növekedést becsül az említett térségben, a pesszimistább forgatókönyv szerint viszont akár több mint 20 nappal is megnövekedhet az ilyen események száma. Mivel a várható változás mértéke ebben a térségben a legnagyobb, a *4.5.1. alfejezetben* külön bemutatom az évszázadra vonatkozó előrejelzéseket, várható trendeket.

Bár összességében az összetett szeles-csapadékos események éves átlagos számában a változás nem mutatkozik olyan jelentős mértékűnek, mint egy kevésbé változékony időjárási tényező (pl. átlaghőmérséklet) esetén, fontos figyelembe venni, hogy mivel az extrém esetű napok éves száma az egymást követő években nagyon különböző lehet, kis mértékű növekedés az átlagban utalhat arra, hogy bizonyos években az esetszámok jelentősen megnövekedhetnek. Mindkét forgatókönyv jellemzően növekedést vár, azonban a két kibocsátási scenárió összevetéséből kiderül, hogy az emberi tevékenység a szélviharokra és az összetett extrém szeles-csapadékos helyzetekre is hatással van: ugyanis a pesszimistább scenárió szerinti növekedés nagyobb mértékű és nagyobb területet is érint az optimistább forgatókönyvhöz képest.

Köszönetnyilvánítás

Hatalmas köszönettel tartozom elsősorban témavezetőmnek, dr. Pongrácz Ritának a rengeteg segítségért, biztatásért, amit a dolgozat elkészítése során nyújtott. Hálás vagyok a szakmai tudásért és lehetőségekért, amelyekkel támogatta szakmai fejlődésemet, ötleteivel még inkább felkeltette érdeklődésemet a téma iránt. Köszönettel tartozom továbbá Szabó Péternek, aki az adatok letöltésében és előfeldolgozásában nyújtott rengeteg segítséget.

Hálás vagyok szüleimnek, nagyszüleimnek és barátomnak a folyamatos bátorításért, amelyet a dolgozat készítése során nyújtottak.

A diplomamunka keretében végzett kutatásokat az alábbi szervezetek, projektek támogatták: European Climate Foundation (G-2108-62486 és G-2208-64555), Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap (K-129162 és K-120605), valamint az Éghajlatváltozás Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium (RRF-2.3.1-21-2022-00014).

Irodalomjegyzék

- Antonescu, B., Schultz, D.M., Holzer, A., Groenemeijer, P., 2017: Tornadoes in Europe: An Underestimated Threat. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 713–728. doi:10.1175/BAMS-D-16-0171.1
- Bluestein, H.B., 2013: *Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics*. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-05381-8
- Bordi, S., 2021: Széllel kapcsolatos összetett extrém események elemzése. Szakdolgozat. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Pongrácz Rita), 49 p.
- Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M.J., Wu, L., England, M.H., Wang, G., Guilyardi, E., Jin, F.-F., 2014: Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 4, 111–116. doi:10.1038/nclimate2100
- Catto, J.L., Dowdy, A., 2021: Understanding compound hazards from a weather system perspective. *Weather and Climate Extremes*, 32, 100313. doi:10.1016/j.wace.2021.100313
- Diakakis, M., Deligiannakis, G., Antoniadis, Z., Melaki, M., Katsetsiadou, N.K., Andreadakis, E., Spyrou, N.I., Gogou, M., 2020: Proposal of a flash flood impact severity scale for the classification and mapping of flash flood impacts. *Journal of Hydrology*, 590, 125452. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125452
- Fink, A.H., Brücher, T., Ermert, V., Krüger, A., Pinto, J.G., 2009: The European storm Kyrill in January 2007: synoptic evolution, meteorological impacts and some considerations with respect to climate change. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 405–423. doi:10.5194/nhess-9-405-2009
- Grisogono, B., Belušić, D., 2009: A review of recent advances in understanding the mesoand microscale properties of the severe Bora wind. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 61, 1–16. doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00369.x
- Groenemeijer, P., Kühne, T., 2014: A Climatology of Tornadoes in Europe: Results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*, 142, 4775–4790. doi:10.1175/MWR-D-14-00107.1
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803

- IPCC, 2021: 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.
- Izsák, B., Szentimrey, T., Lakatos, M., Pongrácz, R., Szentes, O., 2022: Creation of a representative climatological database for Hungary from 1870 to 2020. *Időjárás*, 126, 1–26.
- Komjáti, K., Varga, A., Méri, L., Breuer, H., Kun, S., 2022: Investigation of a supercell merger leading to the EF4 tornado in the Czech Republic on June 24, 2021 using radar data and numerical model outputs. *Időjárás*, 126, 457–480. doi:10.28974/idojaras.2022.4.2
- Kurcsics, M., Horváth, Á., 2022: Az adriai bórától a bakonyi lejtőviharig. *Légkör*, 67, 77–89. doi:10.56474/legkor.2022.2.2
- Lee, J.-Y., Wang, B., 2014: Future change of global monsoon in the CMIP5. *Climate Dynamics*, 42, 101–119. doi:10.1007/s00382-012-1564-0
- Markowski, P., Richardson, Y., 2011: *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. John Wiley & Sons, 658 p.
- Martius, O., Pfahl, S., Chevalier, C., 2016: A global quantification of compound precipitation and wind extremes. *Geophysical Research Letters*, 43, 7709–7717. doi:10.1002/2016GL070017
- Messmer, M., Simmonds, I., 2021: Global analysis of cyclone-induced compound precipitation and wind extreme events. *Weather and Climate Extremes*, 32, 100324. doi:10.1016/j.wace.2021.100324
- Owen, L.E., Catto, J.L., Stephenson, D.B., Dunstone, N.J., 2021: Compound precipitation and wind extremes over Europe and their relationship to extratropical cyclones. *Weather and Climate Extremes*, 33, 100342. doi:10.1016/j.wace.2021.100342
- Raymond, C., Horton, R.M., Zscheischler, J., Martius, O., AghaKouchak, A., Balch, J., Bowen, S.G., Camargo, S.J., Hess, J., Kornhuber, K., Oppenheimer, M., Ruane, A.C., Wahl, T., White, K., 2020: Understanding and managing connected extreme events. *Nature Climate Change*, 10, 611–621. doi:10.1038/s41558-020-0790-4
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., Rafaj, P., 2011: RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109, 33. doi:10.1007/s10584-011-0149-y
- Schulzweida, U., 2020: *CDO User Guide (1.9.9)*. 229 p.

- Simon, A., Horváth, Á., Vivoda, J., 2006: Case study and numerical simulations of the November 19, 2004 severe windstorm in Central Europe. *Időjárás*, 110, 91–123.
- Stott, P.A., Christidis, N., Otto, F.E.L., Sun, Y., Vanderlinden, J.-P., van Oldenborgh, G.J., Vautard, R., von Storch, H., Walton, P., Yiou, P., Zwiers, F.W., 2016: Attribution of extreme weather and climate-related events. *WIREs Climate Change*, 7, 23–41. doi:10.1002/wcc.380
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007: Mathematical background of spatial interpolation, meteorological interpolation based on surface homogenized data bases (MISH), In: Proceedings of the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology. Budapest, 2004, 17-27.
- Szentimrey, T., 2008: Development of MASH homogenization procedure for daily data, In: Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases. Budapest, 2006, 123-130.
- Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J., Kyle, G.P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M.A., Clarke, L.E., and Edmonds, J.A., 2011: RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109, 77. doi:10.1007/s10584-011-0151-4
- van den Hurk, B.J.J.M., van Meijgaard, E., de Valk, P., van Heeringen, K.-J., Gooijer, J., 2015: Analysis of a compounding surge and precipitation event in the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 10, 9. doi:10.1088/1748-9326/10/3/035001
- 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. doi:10.1007/s10584-011-0148-z
- Yang, S., Li, Z., Yu, J.-Y., Hu, X., Dong, W., He, S., 2018: El Niño–Southern Oscillation and its impact in the changing climate. *National Science Review*, 5, 840–857. doi:10.1093/nsr/nwy046
- Zscheischler, J., Seneviratne, S.I., 2017: Dependence of drivers affects risks associated with compound events. *Science Advances*, 3, e1700263. doi:10.1126/sciadv.1700263
- Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R.M., van den Hurk, B., AghaKouchak, A., Jézéquel, A., Mahecha, M.D., Maraun, D., Ramos, A.M., Ridder, N.N., Thiery, W., Vignotto, E., 2020: A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 333–347. doi:10.1038/s43017-020-0060-z
- Zscheischler, J., Lehner, F., 2022: Attributing Compound Events to Anthropogenic Climate Change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103, E936–E953. doi:10.1175/BAMS-D-21-0116.1

Internetes források:

[1 – szte]

<https://u-szeged.hu/sztehirek/2023-marcius/m1-porvihar-klimavaltozas-foldmuveles-szte-ffi?objectParentFolderId=1416>

[2 – met.hu]

https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3062

[3 – floodlist.com]

<https://floodlist.com/america/brazil-floods-sao-paulo-february-2023>

[4 – odp.met.hu]

<https://odp.met.hu/>

[5 – HuClim]

https://odp.met.hu/climate/homogenized_data/gridded_data_series/Leiras_napi_eghajlati_racsponi_adatok.pdf

[6 – EuroCordex]

<https://www.euro-cordex.net/>

[7 – ipcc]

[*Topic 2: Future changes, risks and impacts — IPCC*](#)

[8 – met.hu]

<https://www.met.hu/ismertetok/Beaufort-skala.pdf>

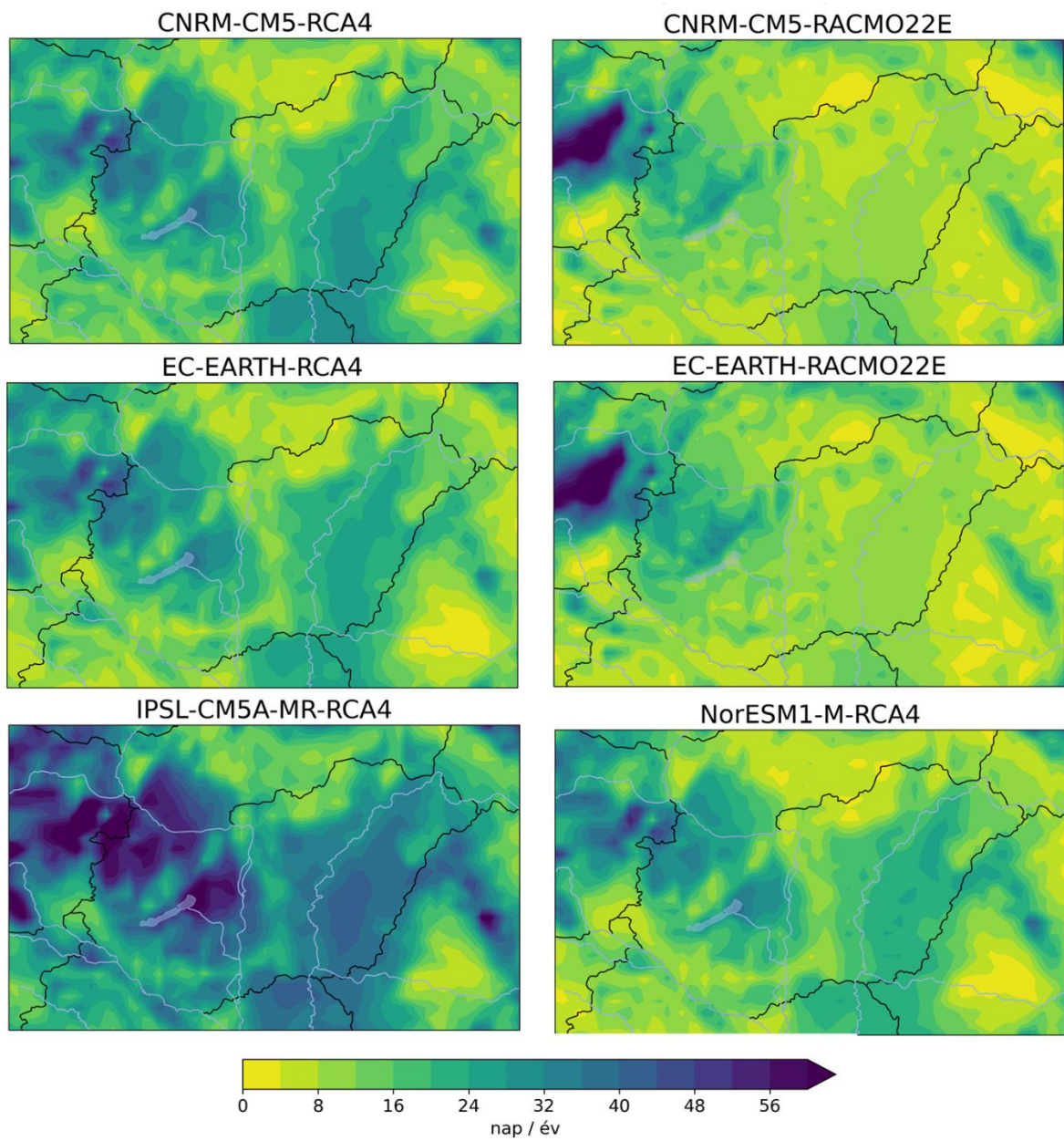
[9 – ferret]

<https://ferret.pmel.noaa.gov/Ferret/>

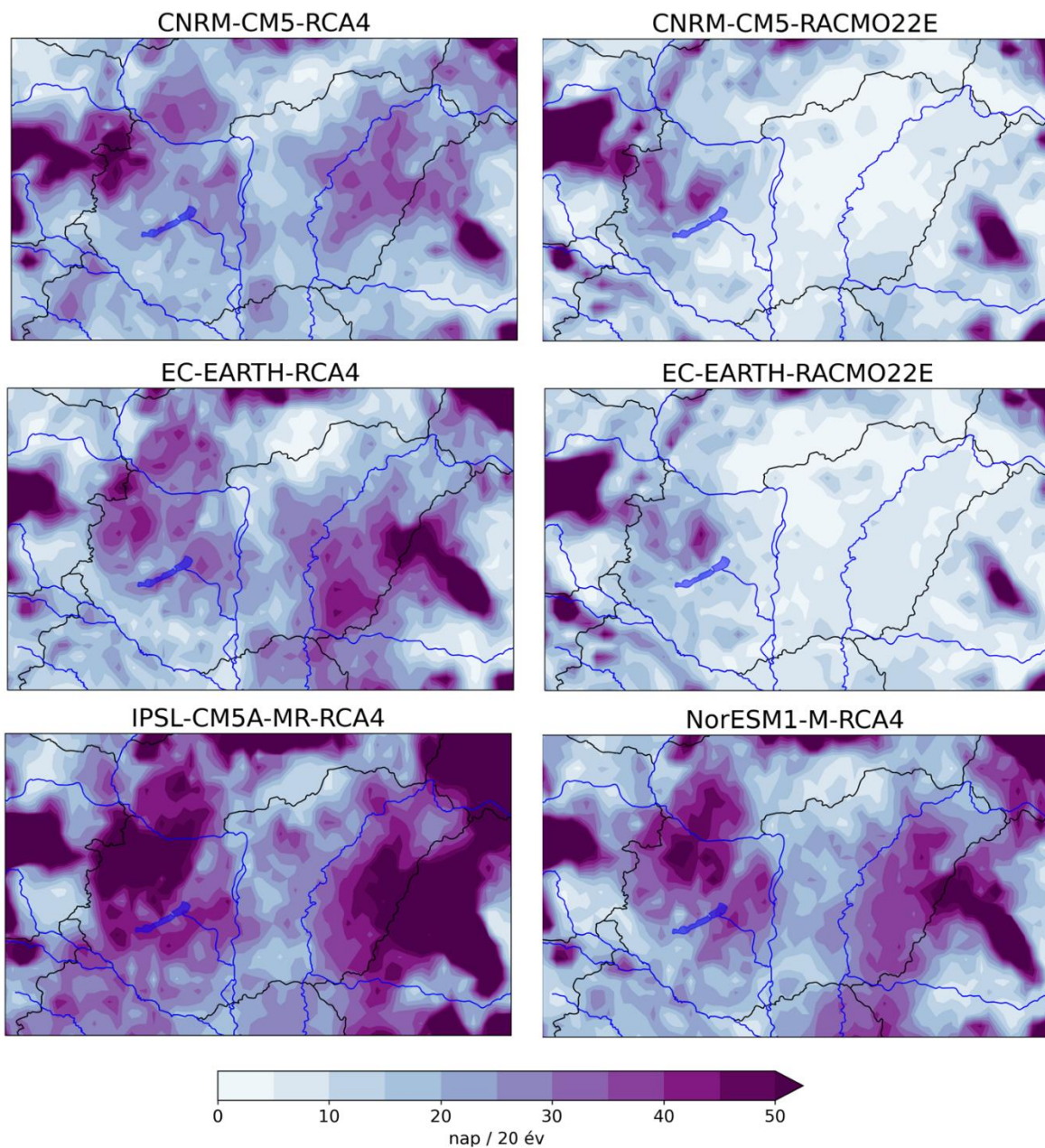
[10 – Google Earth]

<https://earth.google.com/web/>

Függelék



F1. ábra: Szélviharos napok éves átlagos száma a Euro-CORDEX modellek alapján, a 2001-2020-as időszakra vonatkozóan.



F2. ábra: Összetett extrém szeles-csapadékos napok éves átlagos száma a Euro-CORDEX modellek alapján, a 2001-2020-as időszakra vonatkozóan.