

NYILATKOZAT

Név: Mráz Anna

ELTE Természettudományi Kar, szak: Meteorológus MSc

NEPTUN azonosító: X6FP17

Diplomamunka címe:

Anticiklonális helyzetekhez kapcsolódó hőmérsékleti extrémumok
szinoptikus-klimatológiai elemzése a Kárpát-medencére

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, 2023.05.29.

Mráz Anna

a hallgató aláírása

Anticiklonális helyzetekhez kapcsolódó hőmérsékleti extrémumok szinoptikus-klimatológiai elemzése a Kárpát-medencére

DIPLOMAMUNKA
METEOROLÓGUS MESTERSZAK
IDŐJÁRÁS-ELŐREJELZŐ SPECIALIZÁCIÓ



Készítette:

Mráz Anna

Témavezetők:

Dr. Pongrácz Rita

egyetemi adjunktus, ELTE TTK FFI, Meteorológiai Tanszék

Soósné Dr. Dezső Zsuzsanna

egyetemi adjunktus, ELTE TTK FFI, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2023

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	4
2. Irodalmi áttekintés.....	6
2.1. Az anticiklon általános jellemzői.....	6
2.2. Anticiklonok okozta extrém meleg időszakok.....	8
2.3. Anticiklonok okozta extrém hideg időszakok	13
3. Adatok és módszerek	18
3.1. Felhasznált adatok.....	18
3.2. Módszertan.....	21
3.2.1. Éghajlati elemzés.....	21
3.2.2. Szinoptikai elemzés	23
4. Eredmények.....	25
4.1. Éghajlati elemzés eredményei	25
4.1.1. A nyári félév éghajlati indexeinek vizsgálata.....	25
4.1.2. A téli félév éghajlati indexeinek vizsgálata.....	30
4.1.3. Összegzés	34
4.2. Szinoptikai elemzés eredményei.....	35
4.2.1. Hóhullámos esetek.....	35
4.2.2. Zord időszakok	43
5. Összefoglalás.....	51
6. Köszönetnyilvánítás	53
7. Irodalomjegyzék.....	54
8. Függelék.....	60

1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben egyre többször találkozhatunk szélsőséges időjárási jelenségekkel. Ezek legtöbbje a Föld hőmérsékletének emelkedését tükrözi, ilyen például az egyre sűrűsödő hőhullámok, erdőtüzek, aszályok, vagy akár a heves zivatarok, árvizek gyakoriságának növekedése (*Spinoni et al., 2015*). Emellett a hideghullámok – mint extrém események – számának csökkenése is észlelhető, ami ugyancsak a globális felmelegedésre utal. Fontos, hogy ezen események vizsgálatával minél többet foglalkozzunk, hiszen számos módon befolyásolják az emberek életét.

Weilhammer et al. (2021) tanulmánya szerint a szélsőséges meleg, illetve hideg időszakok és a szív- és érrendszeri, valamint a légzőszervi megbetegedések okozta halálozások között pozitív összefüggés mutatható ki. Hazánkban szintén végeztek erről kardiometeorológiai kutatásokat (*Boussoussou et al., 2019; Boussoussou, 2019*). Ugyanakkor az aszályok, illetve az erdőtüzek okozta károsanyag-kibocsátás is hozzájárulhat például a légzőszervi megbetegedésben szenvedők egészségügyi állapotának romlásához. Kimutatható, hogy a szélsőséges időjárási események Európában összességében negatív hatással vannak az emberek fizikai és mentális egészségére egyaránt (*Weilhammer et al., 2021*).

Nemcsak a populáció egészségügyi állapotában jelenik meg az extrém események hatása, hanem a mezőgazdaságban is (*Cogato et al., 2019*). Gondolhatunk akár az egyre többször előforduló meleg, hosszú aszályos időszakokra (*Beillouin et al., 2020*), amit például hazánkban 2022-ben (*Szentes, 2022*) is tapasztaltunk. Ugyanakkor ennek ellenkezője, a hirtelen lehulló, heves esőzések sem biztosítanak kedvező feltételeket az egyes növények, például a búza számára sem (*van der Velde et al., 2012*).

Mindezekén túl az iparra és az energiagazdálkodásra is hatással vannak ezen súlyos károkat okozó időjárási jelenségek. Emellett megemlíthető például a biztosítási ágazat, mely évről-évre növekedést állapít meg az időjárási katasztrófák számában, illetve az általuk okozott anyagi károk tekintetében egyaránt (*Kron et al., 2019*).

A köztudatban (*Roxburgh et al., 2019*) és a tudományos életben (*IPCC, 2021*) is igyekeznek megfejteni az extrémumok kialakulásának okát, illetve megoldást találni az általuk okozott károk, kellemetlen hatások csökkentésére. Az egyre növekvő figyelem miatt született kutatások, tanulmányok révén több ember ismeri fel, hogy ezen események gyakoriságának és intenzitásának növekedése sok esetben kapcsolatba hozható az éghajlatváltozással. A klímaváltozás várható hatásait, a globális felmelegedés mértékét az ENSZ Éghajlatváltozási

Kormányközi Testülete (IPCC) az új, 6. jelentésében publikálta (IPCC, 2021), ami szerint az elmúlt pár évben történt rengeteg szélsőséges időjárási jelenség, mint például a pusztító hurrikánok, erdőtüzek, aszályok mind-mind csak ízelítőt adtak a jövőbeli éghajlatból, időjárásból. Fontos megjegyezni, hogy egy-egy tartósabb extrém esemény kialakulásának háttérében gyakran globális folyamatok állnak, mint a légköri cirkulációnak vagy a légkör nedvességtartalmának anomáliái (Horváth és Breuer, 2022). Továbbá lokális hatások is szerepet játszanak: például a talaj- és vízfelszín állapota. Legtöbb figyelmet például a hurrikánokhoz (Smiley et al., 2022), a tájfunokhoz (Holden és Marshall, 2018), vagy a viharciklonokhoz (Horváth és Simon, 2020) kapcsolódó veszélyes időjárási jelenségek kapnak. Ugyanakkor az anticiklonok esetén is kialakulhatnak szélsőséges események, melyek főként a hőmérséklettel vagy a csapadékmentes időjárással állnak összefüggésben.

Diplomamunkám témája a hazánkat érintő, anticiklonok idején kialakuló extrém hőmérsékletű események szinoptikus-klimatológiai vizsgálata. A világ számos részén nyomon követik ezen szélsőséges időszakok számát, alakulását, azonban én Magyarországra fordítom a figyelmet. Egyúttal korábbi szakdolgozatom (Mráz, 2021) kiterjesztett folytatásának szánom jelenlegi munkámat, hiszen előbbiben már az anticiklonális helyzetekről és az azok által kialakított időjárási viszonyokról részletesen írtam.

Diplomamunkámban az 1971–2020-as időszakból származó magyarországi megfigyelési adatokkal (pontosabban a HuClim adatbázissal) dolgoztam, melyet az Országos Meteorológiai Szolgálat biztosított [1 – OMSZ¹ Adattár]. A kutatásomban a magasnyomású képződmények idején fellépő extrém hideg esetek azonosításához többek között a zord és téli napok éves számát, egyidejű térbeli kiterjedését; az extrém meleg időszakokra pedig a másodfokú hóhullámos napok és hőségnapok éven belüli alakulását, térbeli lefedettségét elemeztem. Ezek után a nagyterségi, szinoptikus helyzetek bemutatása, összehasonlítása következett szintén a megfigyelési, valamint az ERA5² reanalízis adatok (Hersbach et al., 2023a,b) segítségével az előbb említett legerőteljesebb és leghosszabb szélsőséges időszakokban. Céлом volt feltárni, hogy hazánkban milyen típusú anticiklonális helyzetek, illetve cirkulációs mintázatok tartós fennállása esetén kell számolni extrém hideg vagy meleg időszakok kialakulásával. A kiválasztott eseteket szinoptikai szempontból azért is fontos elemezni, mert a magasnyomású helyzetek között van különbség, amit hazánk medence jellege még inkább kiélez.

¹ Országos Meteorológiai Szolgálat

² ECMWF Reanalysis v5

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Az anticiklon általános jellemzői

Az anticiklonok olyan szinoptikus skálájú (pár száz kilométertől néhány ezer kilométerig kiterjedő horizontális méretű) képződmények, melyek területén 1013,25 hPa-nál, a tengerszintre átszámított normál légköri nyomásnál magasabb értékeket mérhetünk a felszín közelében. A magasnyomású rendszerek a geopotenciál mezőben gerincként ismerhetők fel (Colucci, 2015). Bennük leszálló légmozgás uralkodik, hiszen a légkör magasabb rétegeiben konvergencia figyelhető meg, ami aztán leáramlást generál. Ugyanakkor a felszín közelében – a tömegmegmaradás törvénye értelmében – divergencia, szétáramlás tapasztalható. A leszálló légmozgás felhőoszlató hatással bír, aminek következtében az anticiklonok területén általában derült, szárazabb, legtöbbször csapadékmentes időjárással kell számolni. A nagytérségű leáramlás magasabb szinteken úgynevezett zsugorodási inverziót hoz létre, mely a derült éjszakák során létrejövő talajmenti inverzióval sokszor összekapcsolódik. Ez leginkább az őszi, téli évszakban jellemző, és előfordul, hogy létrejön egy tartós inverziós réteg, mely hideg légréteg kialakulásához is vezethet. Ez a jelenség hazánk medence jellege miatt tud létrejönni, hiszen az Alpok és a Kárpátok vonulatai horizontálisan, míg az említett inverziós réteg vertikálisan nem engedik távozni a Kárpát-medencébe – az anticiklon előtt legtöbbször hidegfronttal – érkező hideg légtömeget (Szabóné André et al., 2017).

Az anticiklonok több típusát is megkülönböztethetjük. Elsősorban a kialakulási mechanizmus alapján beszélhetünk a szubtrópusi anticiklonokról, melyek a Hadley-cella leszálló ágához köthető képződmények (Garmsiri Mahvar és Azizi, 2020). A második típust alkotják a kontinentális magasnyomású rendszerek, melyek termikusan homogén területek felett télen alakulnak ki; végül harmadikként a mérsékelt övi anticiklonokat lehet elkülöníteni. Emellett más tipizálás is lehetséges, hiszen megkülönböztethetünk meleg, illetve hideg magvú magasnyomású képződményeket (Colucci, 2015): az elnevezés arra utal, hogy horizontálisan a centrum felé haladva csökken vagy nő a hőmérséklet. A hideg magvúak központjában sűrűek az izobárok, felfelé haladva azonban gyorsan csökken a légnyomás, ezért ezek általában sekély anticiklonok. Ezzel szemben a meleg magvú képződmények esetén a meleg centrum felett a legritkábbak az izobárok, tehát ezek nagyobb vertikális kiterjedésűek, mint a hideg magvú társaik. Ezekről részletes elemzés található szakdolgozatomban (Mráz, 2021).

A fentiekén kívül még további kategorizálások is lehetségesek, melyek azt fejezik ki, hogy hol helyezkedik el a magasnyomású rendszer, milyen az áramlási mintázat. Több szubjektív, illetve objektív tipizálás létezik, azonban Magyarországon leginkább a Hess-Brezowsky (*Hess és Brezowsky, 1952*), illetve a Péczely-féle makroszinoptikus osztályozás (*Péczely, 1957*) terjedt el. Utóbbi kifejezetten a ciklonok és az anticiklonok középpontjának a Kárpát-medencéhez viszonyított elhelyezkedését vizsgálja, és ez alapján összesen 13 típust különít el. Ebből 7 kategória magasnyomású rendszerekhez kapcsolódik, mely szerint az anticiklon központja lehet hazánktól északra, délre, keletre, nyugatra, vagy a Brit-szigetek, illetve Fennoskandinávia térsége felett is. Továbbá centrumhelyzet is kialakulhat, ekkor a rendszer legmagasabb légnyomású területe a Kárpát-medence felett található.

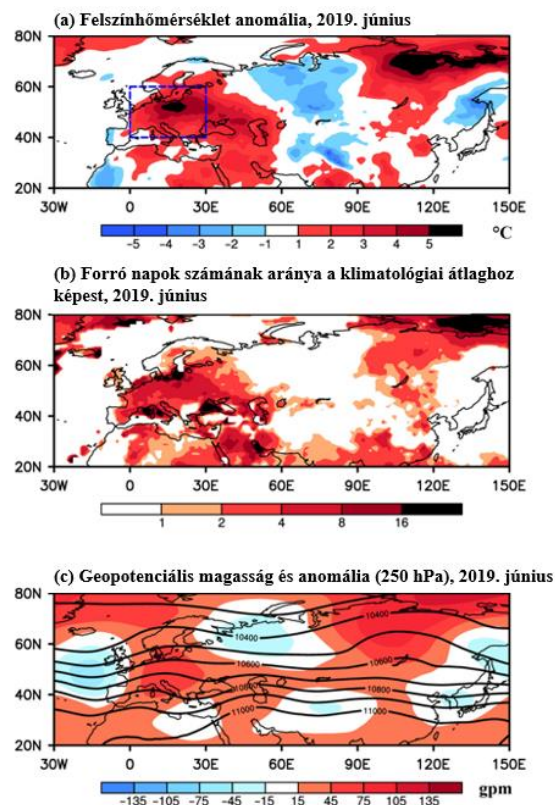
Fontos megjegyezni, hogy az anticiklonok fennállása tartósabb lehet, mint a ciklonoké, hiszen azok frontjaikkal általában gyorsabban áthaladnak egy adott térség felett, ezzel szemben az anticiklonok akár hetekig is képesek tartani magukat, s kialakulhatnak úgynevezett blocking helyzetek (*Kautz et al., 2022*). Ezek a képződmények gyakran válnak kvázi-stacionáriussá, mivel a szokásos nyugat-keleti irányú áthelyeződésük megtorpan. A blockingok – amiket magasnyomású rendszerek, illetve ciklonok építenek fel (*Iván et al., 2018*) – megzavarják a zonális áramlást, az meridionálissá válik, illetve a blokkolt régió egy részében keleti szelek is észlelhetők. Azáltal, hogy a szokásos nyugati áramlás hosszabb időre megszakad, ezek az események gyakran járnak regionálisan szélsőséges időjárással, például az eddig is említett nyári hőhullámokkal vagy a téli kemény fagyokkal (*Woollings et al., 2018*).

Pfahl (2014) tanulmányában olvasható, hogy Európában a szélsőséges időjárási események szorosan kapcsolódnak adott légköri cirkulációhoz. Ezért is fontos külön részletezni, hogy hazánk térségében milyen esetekben számíthatunk (mind negatív, mind pozitív) extrém hőmérsékletű időszakokra. A következőkben ezt fogom kifejteni.

2.2. Anticiklonok okozta extrém meleg időszakok

Nyáron a magasnyomású területeken a derült, felhőmentes időjárás miatt nagy a beérkező sugárzás mennyisége, mely a nappali felmelegedést elősegíti. A csapadék hiánya miatt annak hűtő hatása sem tud érvényesülni, illetve a légmozgás sem jelentős ekkor – kivéve a magasnyomású rendszer peremén –, így a tartós anticiklonok idején magas maximum-hőmérsékletet mérhetünk. Ezzel szemben éjszaka a felhőzet hiányában a Föld hosszuhullámú kisugárzásának nagy része távozik a világűr felé, ezért az éjszakai lehűlés jelentős tud lenni. Mindezekből következik, hogy az anticiklonális helyzetekben nagy napi hőingás tapasztalható (Colucci, 2015).

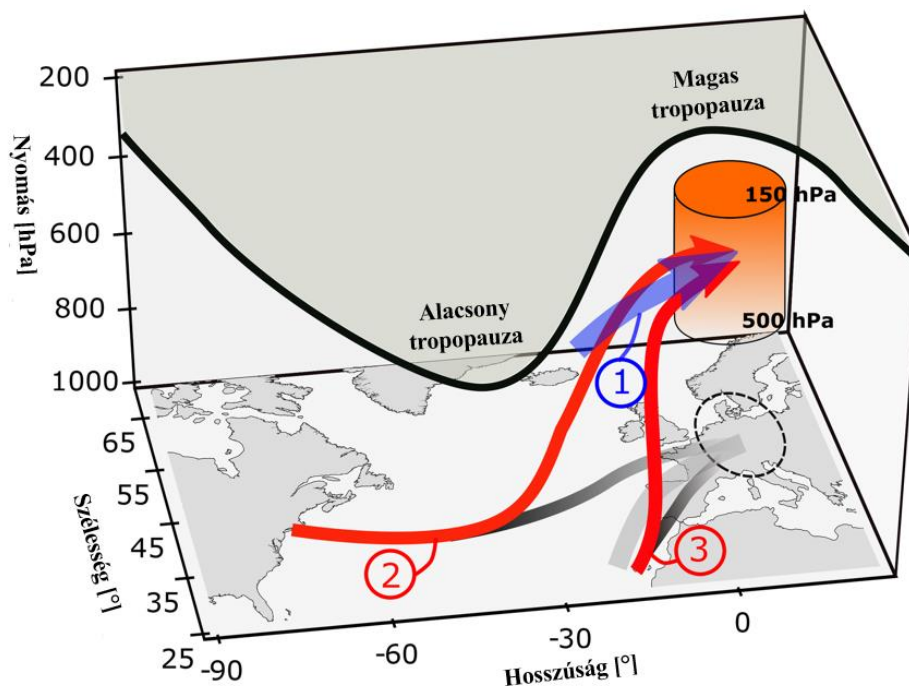
Pfahl (2014) vizsgálatában kimutatta, hogy Észak- és Közép-Európában a szélsőségesen magas hőmérsékleti értékek jellemzően egy blokkoló anticiklon közelében fordulnak elő, ahol a süllyedő légmozgás miatt a sugárzási kényszer jelentősen megnő. Például 2019 nyarán Közép-Európa addigi legmelegebb júniusát élhették át az emberek, mely idő alatt a havi forró napok ($T_{\max} \geq 35 \text{ °C}$) [2 – Éghajlati szélsőségek vizsgálata, met.hu] száma is rekordot döntött (Xu et al., 2020).



1. ábra: Esettanulmány Euráziára – 2019 júniusa: (a) Felszíni léghőmérséklet anomáliái °C-ban megadva. (b) Forró napok száma osztva annak klimatológiai átlagával. (c) A 250 hPa-os nyomási szint geopotenciális magassága (izovonal) és annak anomáliája (színezés) gpm-ben (geopotenciális méterben) megadva.

Forrás: Xu et al. (2020)

Ekkor szinte egész Európa felett egy tartós anticiklonális helyzet alakult ki, az erre az időszakra vonatkozó anomáliákat mutatja be az 1. ábra. Az 1.c térképen látható, hogy a geopotenciál mezőben egy gerinc, azaz anticiklon rajzolódik ki a közép-európai térség felett. Az 1.a, illetve az 1.b ábrán pedig rendre a felszínközeli léghőmérsékleti anomáliát, valamint a forró napok annak klimatológiai átlagához képesti arányát láthatjuk. Ebből kiderül, hogy Közép-Európában még az 5 °C-ot is meghaladta a hőmérsékleti anomália, illetve a forró napok aránya is magas volt a klimatológiai átlaghoz képest. Mindezek egy erős hőhullámos időszakot tükröznek (Xu et al., 2020).

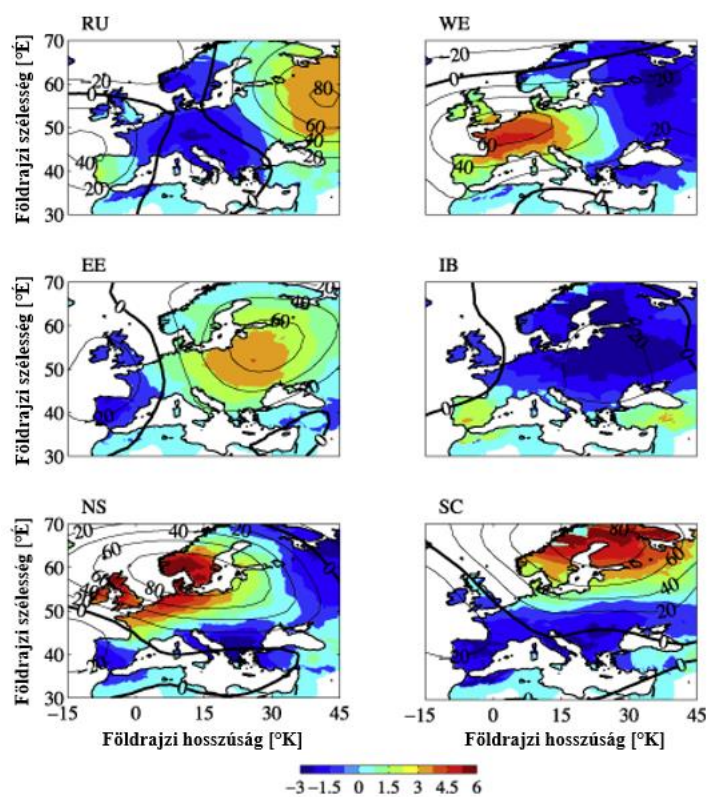


2. ábra: Közép-Európát sújtó hőhullám idején a felső-troposzférikus anticiklont kialakító légtömegek (részletes leírást ld. a szövegben). Forrás: Zschenderlein et al. (2020)

Azt is megvizsgálták (Zschenderlein et al., 2020), hogy a Közép-Európa felett létrejövő hőhullámok idején fennálló felső-troposzférikus anticiklont milyen légtömegek alakítják ki. A hőhullámot megelőző három napot összességében bemutató 2. ábráról kiderül, hogy az anticiklonba három irányból is érkezik légtömeg. Az 1-es ág az északi területekről advektálódó hűvösebb levegőt jeleníti meg, s a nyíl áttetszősége jelzi, hogy térben ez szakadozottabb, mint a másik két légtömeg pályája. A 2-es és 3-as számú légáramlatok az anticiklonhoz képest délnyugat felől érkeznek, és meleg levegőt szállítanak Közép-Európa térségébe. Az előbbi a távoli ág, mely az Atlanti-óceán nyugati részéről ered, s az innen érkező ciklonok meleg-nedves szállítószalagjával is kapcsolatban áll. Az utóbbi az úgynevezett közeli ág, mely Északnyugat-Afrika és Európa délnyugati területe felől hoz melegebb légtömeget. A távoli ág túlnyomórészt a felső-troposzférikus anticiklont, és így a

hőhullám kialakulását befolyásolja, míg a közeli ág annak fenntartása során fontosabb. A hosszantartó hőhullámok esetén a távoli ág újból megerősödhet, és ez táplálja a magasnyomású rendszert.

Stefanon et al. (2020) tanulmányukban az 1950-től 2009-ig tartó időszakban Európa területén kialakult hőhullámok meghatározását és osztályozását végezték el. Hőhullámként definiálták azt az időszakot, amelyben a napok hőmérsékleti értékei az adott napot megelőző és követő 10 nap 60 éves átlagához képest a 95. percentilist meghaladták. A hőmérsékleti küszöbérték mellett térbeli, valamint időbeli (4 nap) kiterjedést is vizsgáltak. Ezután klaszterezési eljárással hat különböző csoportba sorolták az Európában jellegzetes hőhullám mintázatokat: oroszországi (RU), nyugat-európai (WE), kelet-európai (EE), ibériai (IB), északi-tengeri (NS) mintázat, valamint a Skandinávia (SC) fölé összpontosuló klaszter (3. ábra). Hazánk leginkább az EE csoportba sorolható, melynek központja körülbelül Lengyelország fölé tehető. E klaszter kevésbé intenzív maximum-hőmérsékleti anomáliát (4 °C) okoz, mint például a WE vagy az NS csoport. A vizsgálatok során az EE osztályba 23 esemény került a kritériumok alapján, mely összesen 182 hőhullámos napot jelentett. Az összes csoport közül ez rendelkezik a legnagyobb esetszámmal és időbeli kiterjedéssel.



3. ábra: Európában jellegzetes hőhullám típusok. A színezés a napi maximum-hőmérséklet anomáliáit adja meg kelvinben, míg a térképen lévő izovonalak az 500 hPa-os szint geopotenciális magasság anomáliáját jelzik. Forrás: *Stefanon et al.* (2012)

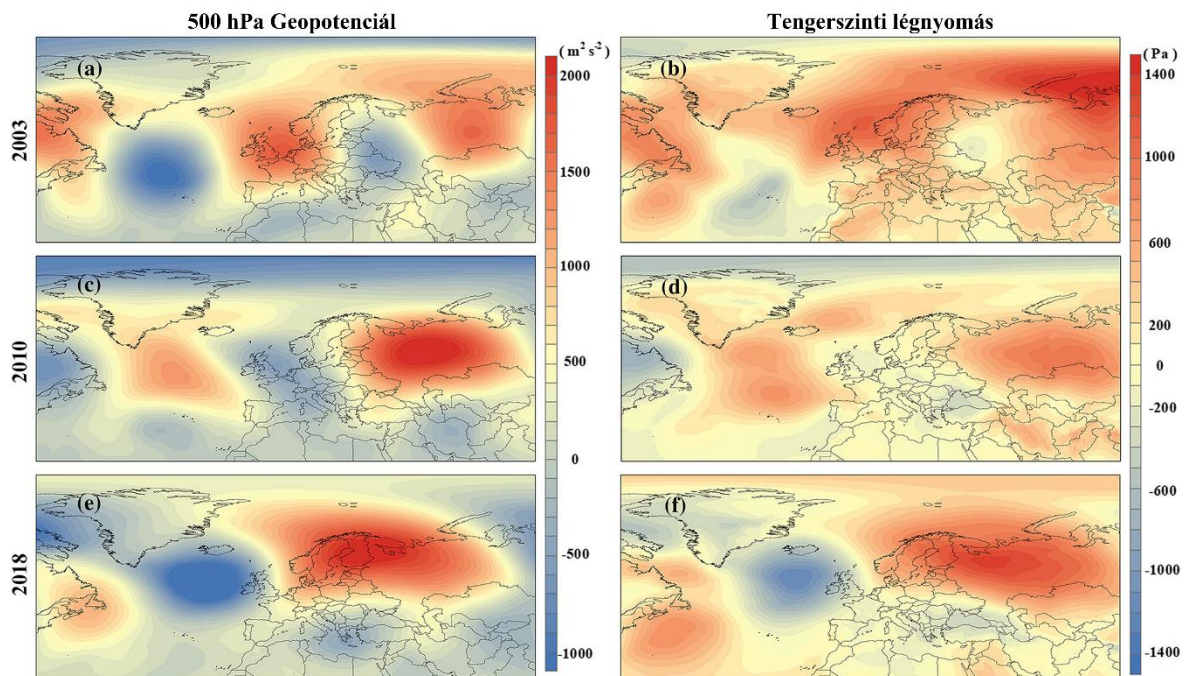
Megállapították, hogy e hosszú meleg időszakok leginkább akkor és ott alakulnak ki, ahol tartósan anticiklon tartózkodik, blocking helyzet jön létre. Európa esetében ekkor tartós déli áramlással Afrikából meleg légtömeg áramlik kontinensünkre. A blocking helyzet miatt a zonális, nyugati áramlással a nedvesebb légtömegek haladása is megszűnik egy időre, ami hozzájárul a csapadékhiányos időjáráshoz (*Liu et al., 2020*). Azt is vizsgálták (*Stefanon et al., 2012*), hogy egyes távkapcsolati rendszerek mennyire befolyásolják a hőhullámok kialakulását, például a Madden-Julian Oszcillációval találtak kapcsolatot, mely a trópusi légkörben tapasztalható 30-90 napos periódussal rendelkező ciklikus változás. Fő központjai az Indiai- és Csendes-óceán nyugati medencéjének trópusi területei fölött találhatók, ahol meleg a tengerfelszín (*Zhang C., 2005*). Ez a távkapcsolati rendszer számos éghajlati jelenségre hatással van, többek között a NAO³-val is kapcsolatban áll (*Zhang, 2013*): azt is kimutatták, hogy az Atlanti-óceán északi medencéjének légköri mintázatát szintén befolyásolja (*Stefanon et al., 2012*).

Emellett számos tanulmány szól arról, hogy a hőhullámok intenzitását az aszály nagy mértékben tudja erősíteni, mint például 2003 nyarán is (*Fischer et al., 2007*). Hiszen száraz talaj esetén a párolgásra fordított látens hő aránya jócskán csökken, míg a levegő melegítését végző szenzibilis hőáram növekszik. Tehát pozitív visszacsatolás történik a talaj és a légkör között, hiszen minél szárazabb a talaj, annál erőteljesebb a felszínközeli légréteg felmelegedése. Ez *Liu et al. (2020)* tanulmányából is kiderül, amelyben a 2003-as, 2010-es és 2018-as hőhullámos időszakokat hasonlították össze. Amint említettem, a 2003-as esetben a szárazság nagyban hozzájárult a hőhullám intenzitásához, hasonlóan 2010-ben is, viszont 2018-ban elsősorban a megnövekedett nettó besugárzásnak volt köszönhető az erőteljes nappali felmelegedés. *Vautard et al. (2007)* kimutatták, hogy a Földközi-tenger vagy Közép-Európa térségében a meleg, hőhullámos nyarakat sok esetben száraz tél, illetve tavasz előzte meg. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a talajnedvesség hőmérsékletre gyakorolt hatása nagy mértékben függ a felszínborítottságtól is. A szárazföldek, legelők hamarabb kiszáradnak, míg az erdős tájak jobb vízmegtartó képességgel rendelkeznek.

Összességében *Stefanon et al. (2012)* megállapították, hogy a vizsgálataik alapján azonosított hőhullámos időszakokat nagy mértékben a szinoptikus léptékű folyamatok határozták meg. Az anticiklonális helyzetekhez kapcsolódó csapadékmentes, derült időjárás miatt megnövekedett sugárzási kényszer a hőmérséklet emelkedésével járt együtt. Továbbá fontos a hőhullámot megelőző csapadékhiányos időszak is, leginkább a közép- és dél-

³ North Atlantic Oscillation – Észak-Atlanti Oszcilláció

európai területek esetén. Az ibériai mintázatoknál az aszály mellett a délről, Afrika felől érkező meleg légtömeg hatása a legerőteljesebb alakító tényező, ami 2007 nyarán is tapasztalható volt (Demirtaş, 2018). Hasonló következtetésre jutott Liu et al. (2020): megállapították, hogy a 2003-as, 2010-es és 2018-as hőhullám kialakulásában is blocking helyzetek okozták a csapadékmentes, derült időjárást, mely akadályozta a nedves léghullámok advektálódását. A 4. ábrán az 500 hPa-os geopotenciál és a tengerszinti légnyomás pozitív anomáliáiban a magasnyomású rendszer, illetve az omega-blocking is kirajzolódik. Az anticiklonális területek összhangban vannak a hőhullám sújtotta régiókkal. A 2003-as hőhullám esetében Észak-Európa felett jött létre a magasnyomású rendszer, mely dél felé haladva Franciaország és Németország felett egy blocking helyzetet hozott létre. A 2010-es hőhullámot megelőző időszakban Kelet-Európa felett alakult ki anticiklon, mely végül Nyugat-Oroszország felett állt be és erősödött meg. A 2018-as hőhullámot megelőzően pedig az Atlanti-óceán északi része felett létrejövő alacsony légnyomású rendszer fokozatosan dél felé mozdult, ami Észak-Európa fölé terelte a blokkoló rendszer központját, majd dél felé haladva Közép-Európa térségét is érintette. Tehát ebből is megállapítható, hogy elsősorban a hosszantartó anticiklonális hatásokra vezethetők vissza e hőhullámos időszakok.



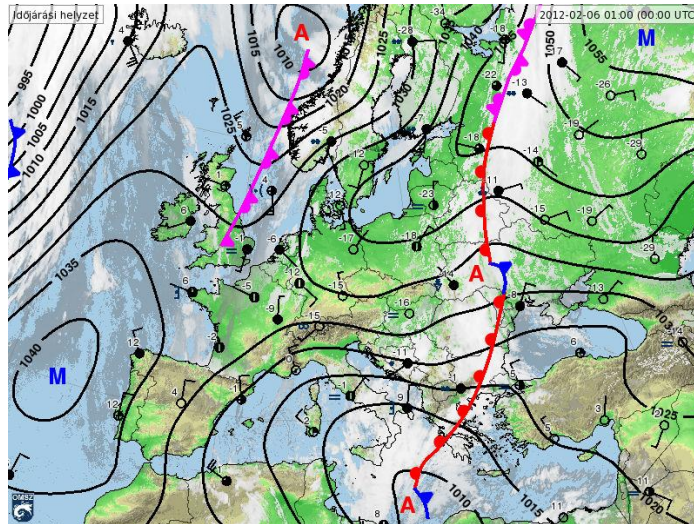
4. ábra: Az 500 hPa-os geopotenciál és tengerszinti légnyomási anomáliák 10 napra átlagolva a megjelölt hőhullámos időszakokban, az 1979–2002 klimatológiai átlaghoz viszonyítva. a) és b) 2003-as hőhullám: augusztus 4–13., c) és d) 2010-es hőhullám: augusztus 1–10., e) és f) 2018-as hőhullám: július 12–augusztus 2. Forrás: Liu et al. (2020)

2.3. Anticiklonok okozta extrém hideg időszakok

Egy magasnyomású rendszer tartós fennállása esetén télen is kialakulhatnak extrém hőmérsékletű időszakok. Ekkor a nyári hőhullámmal ellentétben hosszú ideig fagyos, zord az idő, tehát az átlagosnál jobban lehül a felszínközeli légréteg. A téli hideg szélsőségek kialakulásában leginkább a blokkoló rendszer peremén (Sousa *et al.*, 2018), vagy az anticiklon előtt hidegfronttal (Szabóné André *et al.*, 2017) térségünkbe érkező hideg, sarkvidéki légtömeg nyugalomba jutása, és a medencében való megrekedése játszik szerepet.

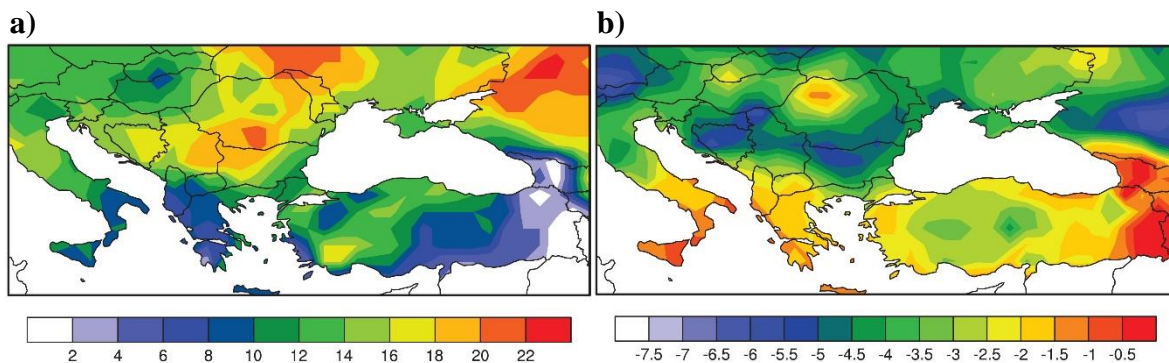
Ha hazánk térségét nézzük, akkor megállapítható, hogy a hideg szélsőségekért egy, az Atlanti-óceán északi része és/vagy Észak-Európa, illetve a Kelet-európai-síkság felett található nagyterjedésű anticiklon lehet leginkább felelős. Ennek hatását még inkább erősítheti, ha a hideg területektől, az anticiklonoktól délkeletre ciklon van jelen, hiszen a két képződmény közös áramlási rendszerében erőteljes lehet a Kárpát-medencébe történő hidegadvekción (Pfahl, 2014). Továbbá, amint említettem (2.1. alfejezet), hazánk medence jellege miatt az ide kerülő hideg légtömeg könnyebben megreked, hiszen a minket körülölelő magashegységek horizontálisan, míg az anticiklonok okozta inverziós rétegződés pedig vertikálisan zárják el az áramlás útját (Szabóné André *et al.*, 2017).

Példaként említhető a 2012. január végétől február közepéig Európa nagy részén kialakult szélsőséges hideg időjárás. A Hess-Brezowsky makroszinoptikus osztályozás (Hess és Brezowsky, 1952) szerint három különböző anticiklonális helyzet egymás utáni beállta okozta ezt a hosszantartó fagyos időszakot (Planchon *et al.*, 2015). Január 29. és február 4. között egy Közép-Európa felé terjeszkedő anticiklon volt jelen, melynek középpontja Fennoskandinávia felett tartózkodott (HFa). Ezután, a február 5–7. közötti időszakban alakult ki a BM helyzet, azaz egy zonális magasnyomású híd Közép-Európa felett (5. ábra). Látható az 5. ábrán, hogy az Azori-anticiklon, illetve az Észak-Oroszország felől terjeszkedő magasnyomású rendszer rendkívül megerősödött. Télen a szárazföldek felett kontinentális anticiklonok jönnek létre, melyek hidegmagvú és sekély képződmények. Ezekben a hideg, hóval borított felszín felett a légnyomás nagyon meg tud emelkedni, mint ahogy 2012. február elején is, hiszen a képződmény centrumában 1055 hPa fölötti érték is uralkodott. Végül a február 8. és 11. közti napokban egy anticiklonális északkeleti helyzet jött létre (NEa). Mind a három típus elősegítette a hideg, sarkvidéki légtömeg advektálódását a közép-európai térségbe.



5. ábra: Európai fronttérkép 2012. február 6-án 00 UTC-kor.
 Forrás: [3 – Napijelentés kiadványok, met.hu]

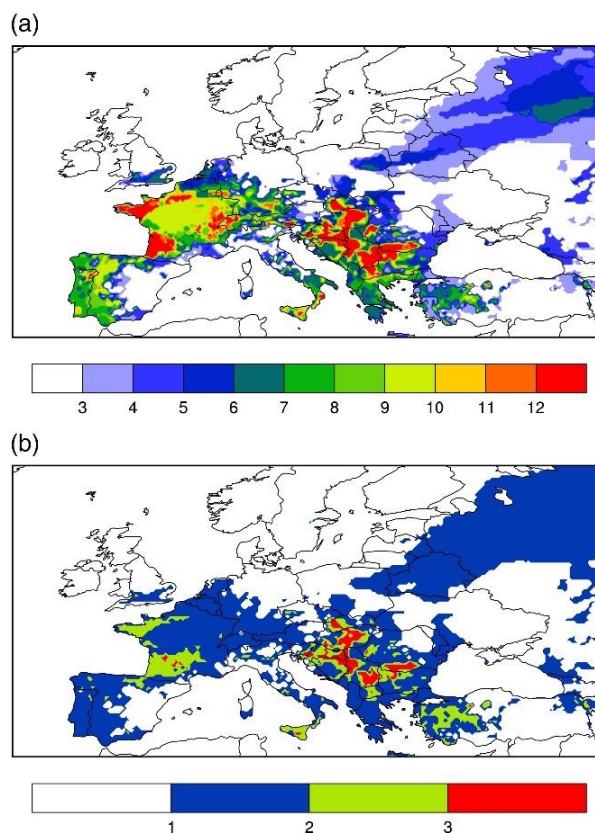
Demirtaş (2017) megállapította, hogy ezen időszak hideghullámnak tekinthető. A tanulmány egy sajátos módszert alkalmazott: egy adott napot extrém hidegnek nevezett, ha az azt megelőző és azt követő 3-3 nap hőmérsékleti adataiból számolt átlagos érték az ezen 7 nap klimatológiai átlagához (a cikkben az 1979–2009 közötti átlaghoz) képest a 10. percentilis alá esik. A hideghullám intenzitását a hőmérsékleti értékek és a 10. percentilis közti abszolút eltérések összegének, valamint az esemény időtartamának hányadosaként adta meg. Kiderült, hogy 2012. január 16. és február 19. közötti időszak területileg, és időtartamát tekintve is kiemelkedő hideghullám volt (6. ábra), s így lehetőséget adott a tartósan hideg és havas időjárás kialakulására Kelet-Európában. Például a moldáviai Cotnari szőlőültetvényen a napi minimum-hőmérséklet a -29 °C -ot is elérte (Planchon et al., 2015), ezzel súlyos károkat okozva a szőlőtőkékben.



6. ábra: a) Hideghullámos napok száma, b) a hideghullám intenzitása °C -ban megadva 2012. január 16. és február 19. között. Forrás: Demirtaş (2017)

2017 januárja szintén rendkívül hideg és zord volt, mely Délkelet-Európában, Törökországban szokatlan hideggel (-40 °C) és hóiharokkal járt együtt. E hideghullám

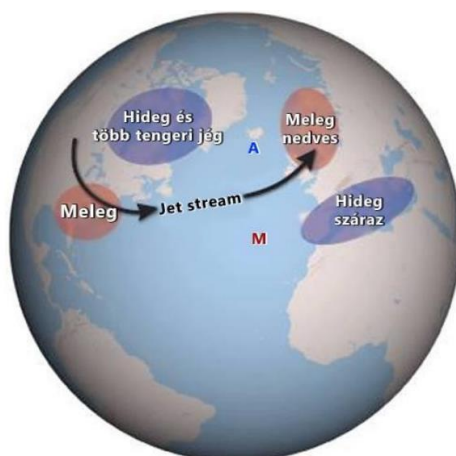
ugyancsak érintette hazánk térségét is. Demirtaş (2022) újabb tanulmánya ezen időszakot kialakító tényezők vizsgálatával foglalkozik. Ebből kiderül, hogy a hideghullám az Atlanti-óceán északkeleti része felett létrejövő, majd a kontinens középső területei fölé terjeszkedő magasnyomású rendszernek volt köszönhető. Ugyanis ennek hátoldalán dél, délnyugat felől meleg, enyhe légtömeg érkezett Észak-, Északnyugat-Európába, míg a keleti oldalán hideg sarkvidéki levegőt szállított a kontinens déli, délkeleti területeire. Ez a hideghullámos napok számában is meglátszik, amit a 7. ábrán láthatunk. Hazánkban 2017 januárjában 12 ilyen nap volt, illetve az időszak során előforduló hideghullámok számának tekintetében is kiemelkedő Magyarország térsége.



7. ábra: 2017. január 1–31. közötti (a) hideghullámos napok, (b) hideghullámok száma.

Forrás: Demirtaş (2022)

Amint említettem, a szélsőséges időjárási események háttérében legtöbbször nagyskálájú folyamatok kölcsönhatása áll. Európában az extrém hideg időszakok sokszor a NAO negatív fázisához is köthetők. Az Észak-Atlanti Oszcilláció (*Torma és Soósné Dezső, 2019*) egy észak-déli tengelyű távkapcsolati rendszer. Két akciócentruma van [4 – Climate Prediction Center, NWS, NOAA]: Izland és/vagy Grönland, illetve az Atlanti-óceán középső részének é.sz. 30–45°-ig terjedő térsége, mely nagyjából az Azori-szigetek területével egyezik meg. Az izlandi minimum és az azori maximum közötti nyomáskülönbség értéke adja meg, hogy pozitív vagy negatív NAO fázisról beszélünk.



8. ábra: Pozitív NAO fázis. Forrás: *Gáspár és Wantuch (2016)*

A pozitív fázis esetén Izland térségében az átlagosnál alacsonyabb, az Azori-szigeteknél pedig magasabb légnyomás uralkodik, így a nagy észak-déli nyomásgradiens miatt megerősödik a zonális áramlás, a nyugatias szél (8. ábra). Ekkor az enyhe óceáni légtömegek szabad utat nyernek a kontinens belsejébe, ennek következtében itt enyhébb és csapadékosabb a tél, míg Dél-Európában az átlagosnál szárazabb és hidegebb. E fázis esetén a ciklonok pályája északabbra tolódik, illetve az Atlanti-óceán felett gyakrabban jönnek létre erős viharciklonok (*Gáspár és Wantuch, 2016*).



9. ábra: Negatív NAO fázis. Forrás: *Gáspár és Wantuch (2016)*

A negatív fázis esetén éppen ellentétes körülményeket tapasztalhatunk. Negatív NAO idején az izlandi alacsony nyomás legyengül, az Azori-anticiklonban pedig az átlagosnál alacsonyabb nyomási értékek uralkodnak. Ennek következtében a meridionális áramlások lesznek meghatározók (9. ábra). Az Atlanti-óceán fölött blocking helyzet jöhet létre, mely megakadályozza a ciklonok haladását, így Európában leginkább anticiklonális hatások érvényesülnek (*Gáspár és Wantuch, 2016*). Ekkor az óceáni eredetű, enyhébb és nedvesebb légtömegek Dél-Európába szállítódnak, ezért gyakrabban alakulnak ki mediterrán ciklonok.

Ezzel szemben kontinensünk északi és középső részeire sarkvidéki légtömeg érkezik, így ezeken a területeken a negatív fázis esetén a megszokottnál hidegebbek és szárazabbak a telek. Ez a helyzet hazánkban is kedvez a hidegbetöréseknek, emiatt is fontos a NAO nyomon követése. Például Európában a 2009/2010-es (*Cattiaux et al.*, 2010) vagy 2012/2013-as (*Zsilinszki et al.*, 2014) téli hideg időjárás kialakulásában is közrejátszott az említett negatív NAO fázis.

A nagyértékű folyamatok mellett a szélsőségesen hideg időjárás kialakításában a helyi hatások is szerepet játszanak, hiszen a nyugodt, anticiklonális helyzetek kedvező feltételeket biztosítanak számos lokális folyamat, jelenség kialakulásához. Például a hótakaró kiterjedése, vastagsága is nagy mértékben befolyásolja a felszínközeli légréteg hőmérsékletét. A hó alacsony hővezető képessége miatt nagyon jó szigetelőként működik, magas az albedója, ezáltal a sugárzás nagy részét visszaveri (*Zhang T.*, 2005). A hófelszín és a felette lévő légréteg hőmérsékleti kapcsolatát *Mote* (2008) is vizsgálta. E tanulmány Észak-Amerikára fókuszált, ahol a kutatás során eredményként azt kapta, hogy a 10 cm-nél vastagabb hótakaróval borított helyeken a minimum-, illetve a maximum-hőmérséklet átlagosan rendre 2,6 °C-kal és 4,5 °C-kal alacsonyabban alakult. A hótakaró hőmérséklet-csökkentő hatása nemcsak annak vastagságától függ, hanem a helytől és az időtől is. *Mote* (2008) tanulmánya szerint a kevesebb növényzettel borított terület felett és tavasszal (a sugárzási viszonyok miatt) nagyobb volt a csökkentő hatás (5–7 °C is), mint más esetekben. Tehát a hóval borított felszínek felett erőteljesebb az éjszakai lehűlés, és kevésbé erős a nappali felmelegedés, így a zord, hideghullámos időszakok vizsgálatánál fontos e tényezőt is figyelemmel kísérni.

3. Adatok és módszerek

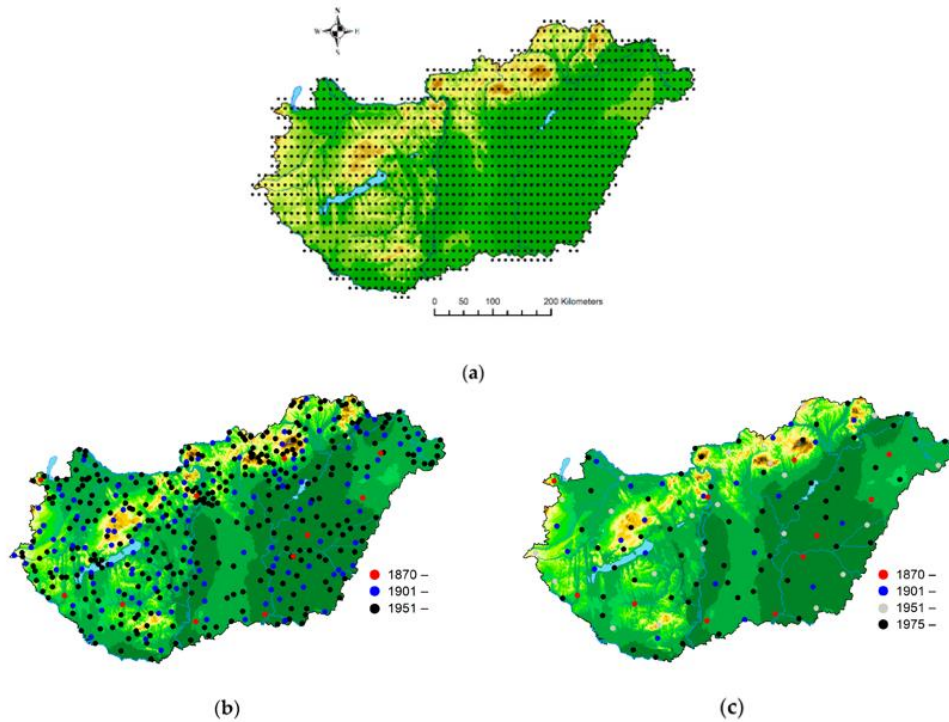
3.1. Felhasznált adatok

Mivel egy kis területre, hazánk térségére vonatkozóan végeztem vizsgálataimat, ezért a szakirodalmi példákkal ellentétben nem globális modellből származó adatokat, hanem a Magyarországon végzett mérések alapján készült jó minőségű, reprezentatív HuClim adatbázist használtam fel [1 – OMSZ Adattár]. Ezt az éghajlati adatbázist az Országos Meteorológiai Szolgálat készíti a saját fejlesztésű MASH⁴ szoftverrel és MISH⁵ rendszerrel (Szentimrey *et al.*, 2010), valamint évente frissíti. Az adatokban felléphetnek inhomogenitások, amit okozhat például a műszer más mikroklímájú helyre költöztetése, vagy környezetének megváltoztatása, beépítése, de akár a műszercsere is. Ezen kívül adathiányok is adódhatnak. Mindezeket a problémákat, tehát az adatok pótlását, homogenizálását, továbbá minőségük ellenőrzését a MASH szoftverrel végzik (Szentimrey, 2011). Emellett azonban nagy hátrány, hogy a mérések helyszíne térben nem egyenletesen oszlik el, ugyanis a Magyarországon lévő meteorológiai állomások egymástól nem azonos távolságra és nem egyenletes sűrűséggel helyezkednek el. Ezért hozták létre a MISH-t (Szentimrey és Bihari, 2007), ami $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ -os térbeli felbontású, Magyarországot lefedő rácshálózatra interpolálja az állomásokról származó meteorológiai adatokat. Ezzel az eljárással egy tetszőleges pontra állítják elő az adott meteorológiai állapotváltozó értékét a szomszédos helyeken végzett mérések alapján (Szentimrey és Bihari, 2014). Tehát az inhomogenitásoktól mentes, ellenőrzött adatsorokat a MISH segítségével interpolálják, így térben és időben is reprezentatív, és egyenletes térbeli lefedettségű (10. ábra) mérési adatsort hoznak létre (Izsák *et al.*, 2022).

Diplomamunkámban az anticiklonális helyzetekhez kapcsolódó hőmérsékleti extrémumokkal foglalkozom, ezért a HuClim adatbázisból a napi rácsponti átlag-, minimum- és maximum-hőmérséklet adatokat használtam fel. Mindegyikkel 1971-től 2020-ig tartó időszakra végeztem vizsgálatokat. Ahogy a 10. ábrán látható, a hőmérsékletet mérő állomások száma folyamatosan bővült. A HuClim adatbázisban 1971–1974 között még csak 55 állomás adatait használták fel, azonban 1975-től már 112 állomás mérései kerültek homogenizálásra, majd interpolálásra.

⁴ Multiple Analysis of Series for Homogenization – Homogenizálás az adatsorok többszörös összehasonlításával

⁵ Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis – Homogenizált felszíni adatokon alapuló meteorológiai interpoláció



10. ábra: (a) A rácspontok térbeli eloszlása a HuClim adatbázisban. (b) Csapadékmérő állomáshálózat. (c) Hőmérsékletet mérő állomások. Forrás: *Izsák et al. (2022)*

Mindhárom általam használt adatsorban napi adatok állnak rendelkezésre, és °C-ban vannak megadva [5 – Napi éghajlati rácsponti adatok leírása]. Az adatokat txt formátumban lehet letölteni, amiket az ELTE Meteorológiai Tanszékén végzett korábbi kutatásokhoz már NetCDF-be alakítottak át, diplomamunkámban az utóbbival dolgoztam.

Miután az említett HuClim regionális, éghajlati adatbázissal végzett kutatással sikerült többszemponútú rendszer alapján kiszűrni a szélsőséges időszakokat, azok szinoptikai vizsgálatának egy részét még továbbra is a megfigyelési adatokkal, illetve a napijelentésekből származó információkkal [3 – Napijelentés kiadványok, met.hu], másik részét már az ERA5 reanalízis adatbázis (*Hersbach et al., 2023a,b*) felhasználásával végeztem. Utóbbit az ECMWF C3S⁶, azon belül is az ECMWF IFS⁷ készíti [6 – ECMWF, ERA5 reanalízis]. Ez a folyamatosan frissülő adatbázis 31 km-es felbontású rácshálóval fedi le a teljes Földet, és összesen 137 modellszintet tartalmaz, azaz a földfelszíntől egészen a 80 km-es magasságig rendelkezik adatokkal a légkörről 1940-től napjainkig. Az előrejelzések adatasszimilációval készülnek, tehát a fizika és dinamika törvényszerűségeit figyelembevéve a Föld számos pontjáról származó méréssel, megfigyeléssel, műholdas

⁶ Copernicus Climate Change Service – Copernicus Éghajlatváltozási Szolgálat

⁷ Integrated Forecast System – Integrált Előrejelző Rendszer

adatokkal pontosítják az óráról-órára előálló prognózisokat (*Bell et al., 2021*). Az IFS légköri modellje egy földfelszíni modellel és egy óceáni hullámmal is össze van kapcsolva, így például a 2 m-en mért hőmérsékletet, a talajhőmérsékletet, illetve a hullámmagasságot is ki tudják számolni. Az adatokat az ECMWF adatarchívumában tárolják, amiket szabályos 0,25°×0,25°-os felbontású szélességi és hosszúsági körökkel rendelkező rácshálózatra interpolálnak (*Hersbach et al., 2020*). Mindezeket a CDS⁸ letöltési oldaláról érhetik el a felhasználók GRIB vagy NetCDF formátumban, a diplomamunkámban az utóbbit használtam. Az ERA5, amint említettem, óceáni és földfelszíni modellt is tartalmaz a légköri modell mellett. Ennek köszönhetően számos szárazföldi, légköri és óceáni éghajlati változó elérhető. Az anticiklonális helyzetek azonosításához, illetve az adott szinoptikus helyzet hőmérsékleti és nedvességi jellemzőinek vizsgálatához az atmoszférára és a felszínre vonatkozó adatokkal dolgoztam. Az általam használt ERA5 változók és azok jellemzői az 1. táblázatban olvashatók.

1. táblázat: Felhasznált ERA5 reanalízis adatok *Hersbach et al. (2023a, 2023b)* nyomán.

Elnevezés	Mértékegység	Vizsgált szintek
Légnyomás	Pa	tengerszint
Geopotenciál	m ² /s ²	850 hPa és 500 hPa
Relatív nedvesség	%	700 hPa
Hőmérséklet	K	2 m, 850 hPa

⁸ Climate Data Store – Éghajlati Adattár

3.2. Módszertan

3.2.1. Éghajlati elemzés

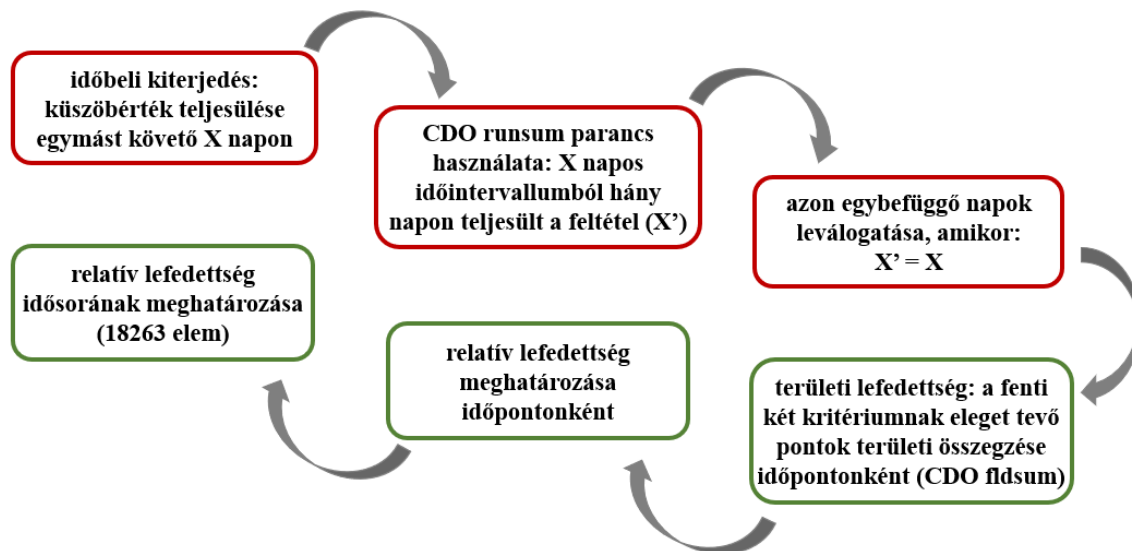
Mivel diplomamunkámban a hőmérsékleti extrémumokkal foglalkozom, ezért elsőként az ezekhez kapcsolódó indexek kiválasztásával kezdtem a vizsgálatot. Igyekeztem olyanokat választani, melyek kellőképpen tükrözik Magyarország időjárását, s az éghajlat változását, alakulását. Természetesen a meleg és a hideg időszakokat külön kell vizsgálni, melyekhez a következő indexeket használtam fel. A hideg események detektálásához a zord, illetve a téli napokat választottam. Definíció szerint zord napnak nevezzük azt, amikor a napi minimum-hőmérséklet -10 °C , vagy az alá csökken. Ennél enyhébb kitélt enged meg a fagyos nap: $T_{\min} \leq 0\text{ °C}$ (Klein Tank et al., 2009), azonban ez nem bizonyult a legmegfelelőbb indikátornak a nagy esetszáma miatt. Így a másik vizsgált index a téli nap [7 – Hidegindexek, met.hu] lett, ami esetén a napi maximum-hőmérséklet nem emelkedhet 0 °C fölé.

A meleg időszakok elemzéséhez a másodfokú hóhullámos napokat vizsgáltam. Akkor lehet erről beszélni, ha legalább három napon keresztül a napi középhőmérséklet eléri, illetve meghaladja a 25 °C -ot [2 – Éghajlati szélsőségek vizsgálata, met.hu]. Kutatásom során a harmadfokú hóhullámos napokat (legalább 3 napon keresztül $T_{\text{közép}} \geq 27\text{ °C}$) is megvizsgáltam, azonban itt a kevés esetszám miatt választottam az enyhébb kritériumot. Másik indikátorként a hőségnapokat tekintettem, amikor a napi csúcérték eléri vagy meghaladja a 30 °C -ot. Itt is tanulmányoztam egy erősebb feltételt alkalmazó indexet, a forró napok számát ($T_{\max} \geq 35\text{ °C}$), mely szintén kevés alkalommal fordult elő. Az általam vizsgált éghajlati indexeket a 2. táblázat összegzi.

2. táblázat: Hőmérséklettel kapcsolatos vizsgált éghajlati indexek [2 – Éghajlati szélsőségek vizsgálata, met.hu] és [7 – Hidegindexek, met.hu] nyomán.

Index	Definíció	Mértékegység
Tél		
Fagyos nap	napi minimum-hőmérséklet $\leq 0\text{ °C}$	nap
Zord nap	napi minimum-hőmérséklet $\leq -10\text{ °C}$	nap
Téli nap	napi maximum-hőmérséklet $\leq 0\text{ °C}$	nap
Nyár		
Harmadfokú hóhullámos nap	napi átlaghőmérséklet $\geq 27\text{ °C}$, legalább 3 napig	nap
Másodfokú hóhullámos nap	napi átlaghőmérséklet $\geq 25\text{ °C}$, legalább 3 napig	nap
Hőségnap	napi maximum-hőmérséklet $\geq 30\text{ °C}$	nap
Forró nap	napi maximum-hőmérséklet $\geq 35\text{ °C}$	nap

Diplomamunkámban a legintenzívebb és leghosszabb meleg, illetve hideg, zord időszakokat kerestem, ezért a küszöbérték alapú leválogatás mellett időbeli fennállást és területi kiterjedést is vizsgáltam, melynek folyamata a 11. ábrán látható. Mindezt a CDO⁹ szoftver segítségével oldottam meg, amit kifejezetten éghajlati elemzésekhez, modelladatok, illetve GRIB és NetCDF fájlok feldolgozására hoztak létre [8 – CDO, Max Planck Intézet].



11. ábra: A küszöbérték alapú leválogatás mellett az időbeli (fent) és területi (lent) kiterjedés programozásának folyamata, ahol $X=3$ vagy $X=5$ (ld. a szövegben).

A hideghullámok elemzéséhez a zord napnál a hőmérsékleti kikötés mellett feltételként szabtam meg, hogy az legalább egymást követő 3 napon teljesüljön az adott rácspontban. A CDO-ban használt függvény csak megadott X napos intervallumokat néz, így az extrém hideg (vagy meleg) időszakok közepét adja vissza, az első és utolsó néhány napot elveszítjük. Ennek korrigálására az OMSZ napijelentés kiadványait [3 – Napijelentés kiadványok, met.hu], és a később olvasható számolást használtam fel. A téli, illetve a fagyos napok esetén 5 napos időbeli kritériumot adtam meg. A hóhullámok felkutatására a hősnapoknál a legalább 5 napos kikötés bizonyult megfelelőnek, a forró napok esetén pedig 3 napos időintervallumot választottam. Végül a másodfokú és harmadfokú hóhullámos napnál a definíció szerint legalább 3 napos időtartamot tételeztem fel. Miután a CDO segítségével megkaptam a naponkénti területi lefedettség százalékos értékét, egy R programnyelven írt saját kód segítségével meghatároztam, hogy hány napon volt az ország területének legalább 25%-án, 50%-án vagy 75%-án ezen feltételeknek eleget tevő nap (az időszakok eleje és vége ezekből hiányzik). Ugyanezt a módszert alkalmaztam minden index vizsgálatára során.

⁹ Climate Data Operators

3.2.2. Szinoptikai elemzés

Az éghajlati leválogatást követően azokat az időszakokat kaptam meg, amikor hazánkat hideg- vagy hóhullám sújtotta. Célom a szinoptikai helyzetet tekintve valamilyen összefüggést feltárni ezen események között. Elsőként kutatómunkát végeztem, amely során az OMSZ által közzétett napijelentés kiadványokat [3 – Napijelentés kiadványok, met.hu] elemeztem, és adatokat gyűjtöttem az adott eseménykor zajló szinoptikai folyamatokról, illetve a hőmérsékletről és csapadéktevékenységről. A nagytérségű szinoptikus helyzet azonosítására a Péczely-féle makrocirkulációs osztályozást alkalmaztam (Péczely, 1957), amit a 3. táblázat foglal össze.

3. táblázat: Péczely-féle makrocirkulációs típusok csoportosítása, elnevezése és kódjai *Mika et al.* (2021) nyomán.

Áramlási típusok	Elnevezés	Betűkód
Meridionális északias áramlású helyzetek	Ciklon hátoldali áramlási rendszere	mCc
	Anticiklon a Brit-szigetek felett	AB
	Mediterrán ciklon hátoldali áramlási rendszere	CMc
Meridionális délies áramlású helyzetek	Ciklon előoldali áramlási rendszere	mCw
	Anticiklon Magyarországtól keletre	Ae
	Mediterrán ciklon előoldali áramlási rendszere	CMw
Zonális nyugatias áramlású helyzetek	Zonális ciklonális áramlás	Zc
	Anticiklon Magyarországtól nyugatra, nyugatról benyúló anticiklon	Aw
	Anticiklon Magyarországtól délre	As
Azonális keleti áramlású helyzetek	Anticiklon Magyarországtól északra	An
	Anticiklon Fennoskandinávia felett	AF
Centrumhelyzetek	Anticiklon a Kárpát-medence felett	A
	Cikloncentrum a Kárpát-medence felett	C

A 3. táblázatban szereplő típusokat az adott szinoptikai helyzetben hazánk térségében jellemző áramlási típusok alapján lehet tovább csoportosítani. Ez volt az egyik alappillére a hóhullámok és zord időszakok összehasonlításának, hiszen rendkívül fontos, hogy a vizsgált esetben milyen irányból, milyen hőmérsékletű és nedvességtartalmú levegő advektálódott a Kárpát-medencébe. A napijelentés kiadványokban szereplő fronttérképeken, méréseken túl az ERA5 reanalízis adatbázisában szereplő adatok megjelenítésével, elemzésével tovább pontosítottam az adott esemény szinoptikai jellemzését, hiszen ezzel nemcsak a talajon, hanem a légkör magasabb szintjein zajló folyamatokat is nyomon tudtam követni.

Emellett a hideg-, illetve hóhullámok összehasonlítására, valamint súlyosságuk becslésére kumulatív indexet számoltam. Mivel a legintenzívebb eseményeket kerestem, ezért a nyári eseteknél a maximum-, míg a télieknél a minimum-hőmérsékletekhez viszonyított eltéréseket vettem alapul. Szintén a CDO-t használtam a kezdeti adatbázis elkészítéséhez, majd egy R nyelven írt saját programmal számoltam tovább. Az OMSZ által mért HuClim adatbázisban [1 – OMSZ Adattár] szereplő 1971–2020 közötti napi minimum-hőmérsékleteket és hőmérsékleti csúcserkéket területileg átlagoltam. Ezzel az ország területére vonatkozó napi átlagos minimum, illetve maximum értékeket kaptam meg. A kumulatív indexek meghatározásához a következő képleteket alkalmaztam:

$$Hóhullám_{kum} = \sum_{i=1}^n (\bar{T}_{max,i} - T_{k,m}) \quad (1)$$

$$Hideghullám_{kum} = \sum_{i=1}^n |\bar{T}_{min,i} - T_{k,h}| \quad (2)$$

ahol $\bar{T}_{min,i}$ és $\bar{T}_{max,i}$ rendre a minimum-, illetve a maximum-hőmérsékletek országos átlaga az i -edik napon; $T_{k,m}$ az extrém meleg, míg $T_{k,h}$ a szélsőséges hideg időszakokra vonatkozó küszöbértéket jelöli, mely rendre 32 °C-nak, illetve -10 °C-nak lett kijelölve. Továbbá az n azon egymást követő napok számát adja meg, amikor a $\bar{T}_{min,i}$, illetve a $\bar{T}_{max,i}$ eléri, vagy meghaladja az adott küszöbértéket. Tehát a kumulatív index a napi átlagos értékek előre meghatározott küszöbértéktől vett eltéréseinek összegeként kapható meg. A fent említett két küszöbindexet úgy választottam meg, hogy az éghajlati leválogatás és a napijelentések segítségével kijelölt hideg- és hóhullámokat döntően visszaadják. Tehát az ezen értékek alatti/feletti átlagos napi minimum-/maximum-hőmérséklettel jellemzett napok egybeesnek az általam keresett legintenzívebb időszakokkal. Ezáltal minden hideg-, illetve hóhullámhoz hozzárendelhető egy olyan számérték, amely megadja az adott időszak hőveszteségét vagy éppen a hőtöbbletét. Továbbá plusz információként rendelkezésre áll az éghajlati elemzésből az adott esemény időtartama, valamint azon napok száma, amikor a legnagyobb területi kiterjedésű volt. E paraméterek alapján lehetőség nyílik a Magyarországon regisztrált szélsőséges hőmérsékletű időszakok összehasonlítására, hiszen egy hosszantartó, de gyengébb, illetve egy rövid, de nagyon meleg/hideg esemény hasonlóan megterhelő lehet (Founda et al., 2022).

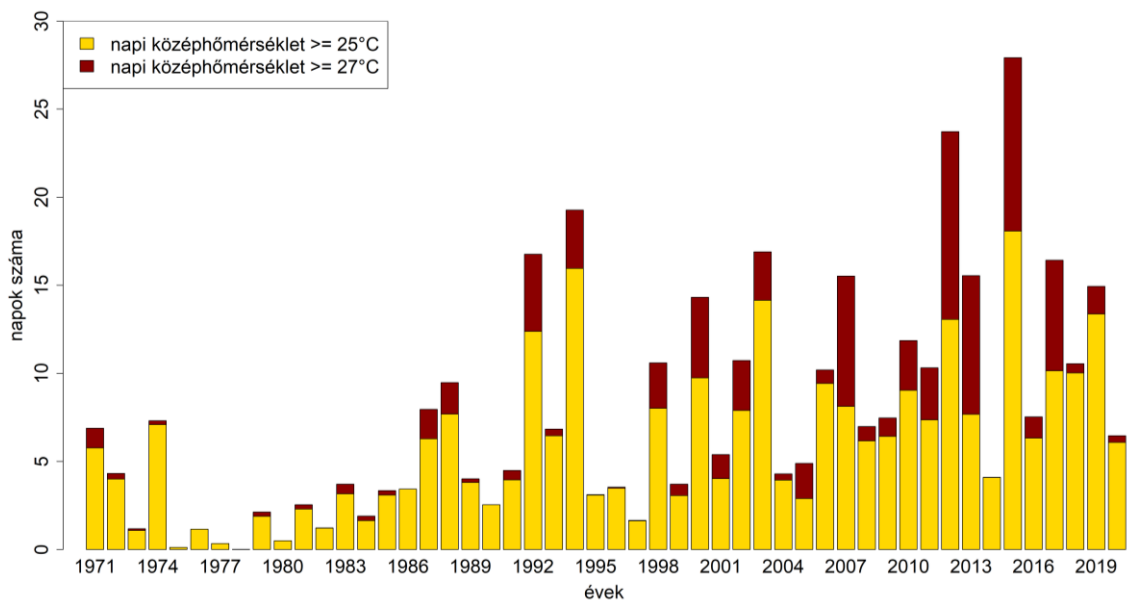
4. Eredmények

Elsőként az éghajlati vizsgálatból származó értékeket ismertetem. Többek között azt, hogy hazánk térségében milyen trend mutatkozik meg a kiválasztott éghajlati indexekben, és ezeknek milyen az évtizedes, havi eloszlása. Ezt követően a kutatás során felállított kritériumok alapján azonosított leghosszabb és/vagy legintenzívebb hideg- és hóhullámokat szinoptikus szempontból tanulmányozom. Végül az éghajlati és szinoptikus elemzések segítségével következtetéseket vonok le a Kárpát-medence térségére vonatkozóan azzal kapcsolatban, hogy ezen időszakok milyen makrocirkulációs helyzetekben alakulnak ki, és mikor a legintenzívebbek.

4.1. Éghajlati elemzés eredményei

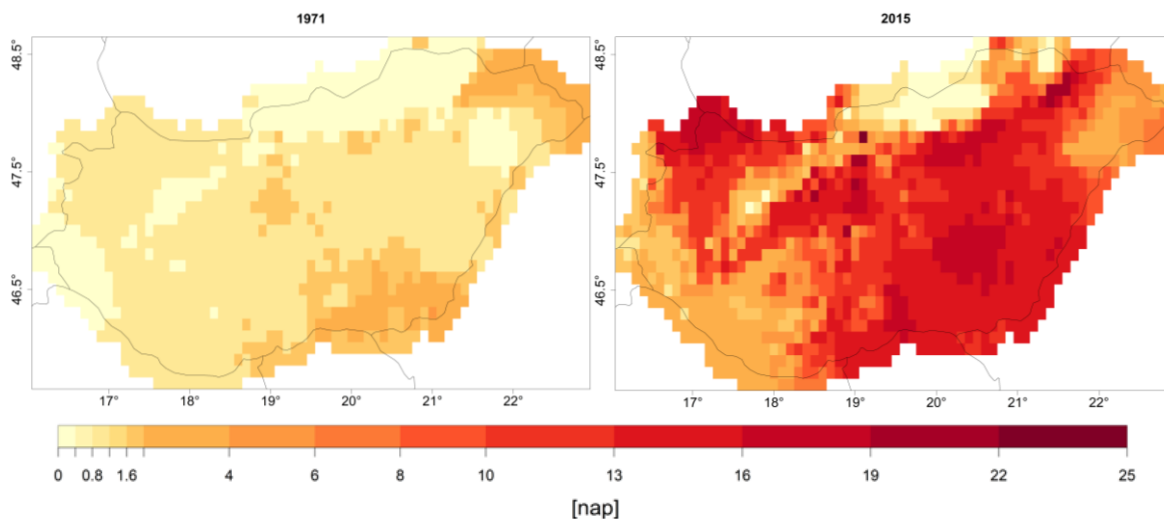
4.1.1. A nyári félév éghajlati indexeinek vizsgálata

Elsőként a Magyarországon detektálható trendeket tekintem át külön a nyári és külön a téli félévben jellemző éghajlati indexek segítségével. A nyári hónapokra vonatkozóan kezdetnek az első-, és a másodfokú hóhullámos napok átlagos éves számát vizsgáltam meg hazánk térségére vonatkozóan, mely a *12. ábrán* látható. A definícióknak [2 – Éghajlati szélsőségek vizsgálata, met.hu] megfelelően azokat a napokat számoltam össze, amikor a napi átlaghőmérséklet legalább a 25 °C-ot, illetve a 27 °C-ot elérte, vagy azokat meghaladta, majd ezen napok éves összegét területileg átlagoltam. A *12. ábrán* az elsőfokú hóhullámos napok száma nem tartalmazza az eggyel erősebb kritériumú napokat, így a kettő összege adja meg az első-, és másodfokú hóhullámos napok átlagos éves előfordulását. Az oszlopdiaagramon kirajzolódik egy meredeken növekvő tendencia, ugyanakkor megfigyelhető az évek közötti jelentős változékonyság. Az 1970-es, illetve az 1980-as években átlagosan 10 napnál kevesebb elsőfokú hóhullámos nap fordult elő, másodfokú pedig maximum 2 nap évente. Az 1990-es évektől kezdve határozottan növekedett ezen értékek száma országos átlagban, mely az elmúlt két évtizedre csak még inkább fokozódott, és összességében átlagosan már 10–20 hóhullámos napot kellett átélnie az embereknek Magyarországon. A vizsgált 50 év során az ország területén átlagosan a legtöbb (elsőfokú) hóhullámos nap 2015-ben fordult elő.



12. ábra: Magyarország éves elsőfokú ($T_{\text{közép}} \geq 25 \text{ °C}$) és másodfokú ($T_{\text{közép}} \geq 27 \text{ °C}$) hőhullámos napjainak országos átlaga 1971 és 2020 között.

A 12. ábrán látható, hogy több kiugróan meleg év is volt, mint például 1994, 2003 vagy 2012. Érdekes megvizsgálni azt is, hogy az 1971–2020-as időszak elején és végén mi számított az átlagtól eltérően meleg évnek. Ennek összehasonlítását a 13. ábra mutatja meg, ahol az első és az utolsó évtized legtöbb másodfokú hőhullámos nappal sújtott éveit láthatjuk. A térképeken ezen éghajlati index ($T_{\text{közép}} \geq 27 \text{ °C}$ fennállása 1 napig) éves száma jelenik meg Magyarországra vonatkozóan a HuClim adatbázisban használt rácspontokban. A két térkép alapján rögtön észrevehető a napok számában lévő jelentős különbség. Míg 1971-ben maximum 6–8 napon érte el vagy haladta meg a napi középhőmérséklet a 27 °C -ot, addig 2015-ben helyenként már 22–25 napon is. A vizsgált index értéke országosan körülbelül háromszorosára nőtt, de a területi eloszlás nem sokban változott. A középhegységeink, illetve a délnyugati határ menti területek szépen kirajzolódnak az alacsony éves összegekkel, míg a legmelegebbek az alföldi és kislalföldi tájaink. Hasonló területi eloszlással bír a globálsugárzás, illetve a napsütéses órák száma Magyarországon, ami nem meglepő, hiszen a legtöbb sugárzást, és napsütéses órát szintén a déli, délkeleti országrészben mérik, mely összekapcsolható a hőmérséklet alakulásával [9 – Globálsugárzás, napfénytartam, met.hu].



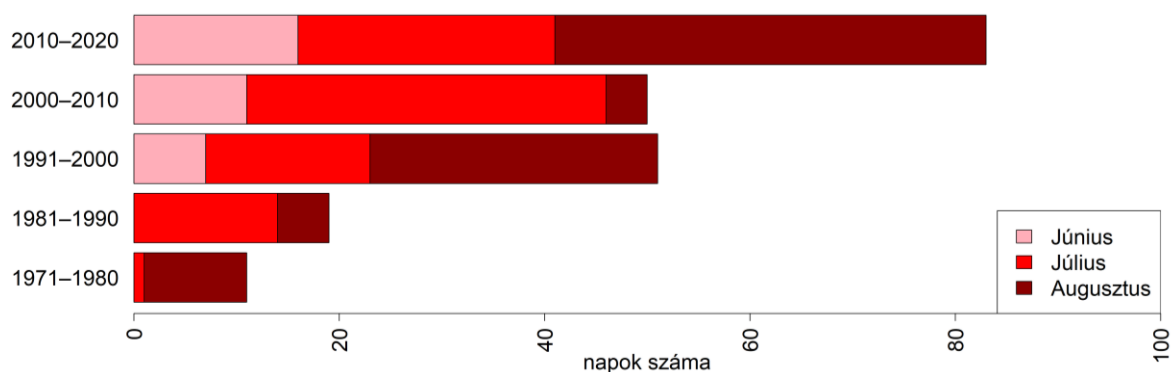
13. ábra: 1971-ben és 2015-ben a másodfokú hőhullámos napok ($T_{\text{közép}} \geq 27^\circ\text{C}$ fennállása 1 napig) éves számának területi eloszlása.

Amint az 1. fejezetben is említettem, ezek a mutatószámok a globális felmelegedés indikátorai is egyben. Már ezen éghajlati indexek számából is kiderül, hogy nemcsak a Föld átlaghőmérséklete növekszik, hanem ezzel együtt a meleg szélsőséges időszakok előfordulása is (Dian et al., 2021). A hőhullámos események kiválogatását a 3.2. alfejezetben bemutatott számolás alapján végeztem el. Vizsgálataim során a harmadfokú, másodfokú hőhullámos, illetve a hőség- és forró napok száma alapján is kerestem a szélsőségesen meleg időszakokat. A legmegfelelőbb indexnek a másodfokú hőhullámos nap bizonyult, mivel ennek esetszáma a téli, hideg időszakokkal azonos nagyságrendű lett. A 14. ábrán különböző színes körökkel azokat az eseteket láthatjuk, amikor teljesültek a következő feltételek: legalább 3 napon keresztül elérte vagy meghaladta a 25°C -ot a napi átlaghőmérséklet, és ez a kitétel az országot lefedő 1376 rácspont legalább 25%-ára igaz volt.



14. ábra: Magyarország területének nem kevesebb mint 25%-án egyidejűleg előforduló másodfokú hőhullámos napok száma 1971 és 2020 között.

A pontok sokaságából tehát kirajzolódnak az elmúlt 50 évben hazánkat érintő hőhullámos időszakok és azok területi lefedettségei. Fontos megjegyezni, hogy ezeknek az első és utolsó napjai hiányoznak a vizsgálat során felhasznált leválogatási módszer miatt. Ez a diagram is alátámasztja a 12. ábrán látott trendet, miszerint az 1970-es és 1980-as évek alacsony esetszáma után jelentős növekedés következett, ezáltal pedig a hőhullámos időszakok száma is gyors ütemben gyarapodott. Plusz információt ad a körök színe, mely azt mutatja meg, hogy az adott esemény melyik hónapban fordult elő. Mindezt szemügyre véve megállapítható, hogy körülbelül 2010-ig júliusban, míg 2010-től már döntően augusztusban volt a legtöbb hőhullámos nap. Ezt a tényt a 15. ábra is alátámasztja, melyben a fenti másodfokú hőhullámos időszakok évtizedenkénti eloszlását láthatjuk. Összességében egy növekvő trend rajzolódik ki. Érdekes módon az 1970-es és 1980-as években júniusban egyáltalán nem fordult elő a kitételeknek megfelelő nap, de az ezt követő évtizedekben már fokozatosan növekedett a nyár eleji esetek száma. A júliusi napokat tekintve az 1980-as és a 2000-es évtizedet kell kiemelni, míg az augusztusi esetszám már az 1990-es években is magasabb volt a többi hónapénál, ám a legtöbb a 2010-es években fordult elő.



15. ábra: Az ország területének legalább 25%-át érintő másodfokú hőhullámos napok számának évtizedenkénti eloszlása havi bontásban.

Nemcsak az előbb bemutatott éghajlati indexekkel lehet detektálni a hőhullámos időszakokat, hanem a maximum-hőmérséklethez kapcsolódó forró- vagy hőségnapok segítségével is. A következőkben az utóbbit ismertetem, amikor is a $T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$ [2 – Éghajlati szélsőségek vizsgálata, met.hu]. Ez a kritérium elég sok esetben teljesül, ezért a legintenzívebb és leghosszabb időszakok azonosítására azt is kikötöttem, hogy a fenti kitétel legalább 5 egymást követő napon át fennálljon. Ezen túl a másodfokú hőhullámos napnál végzett elemzéshez hasonló módon itt is megnéztem az országon belüli területi kiterjedést, így a 16. ábrán azokat az eseteket láthatjuk, amikor Magyarország legalább 25%-án teljesültek az említett követelmények.

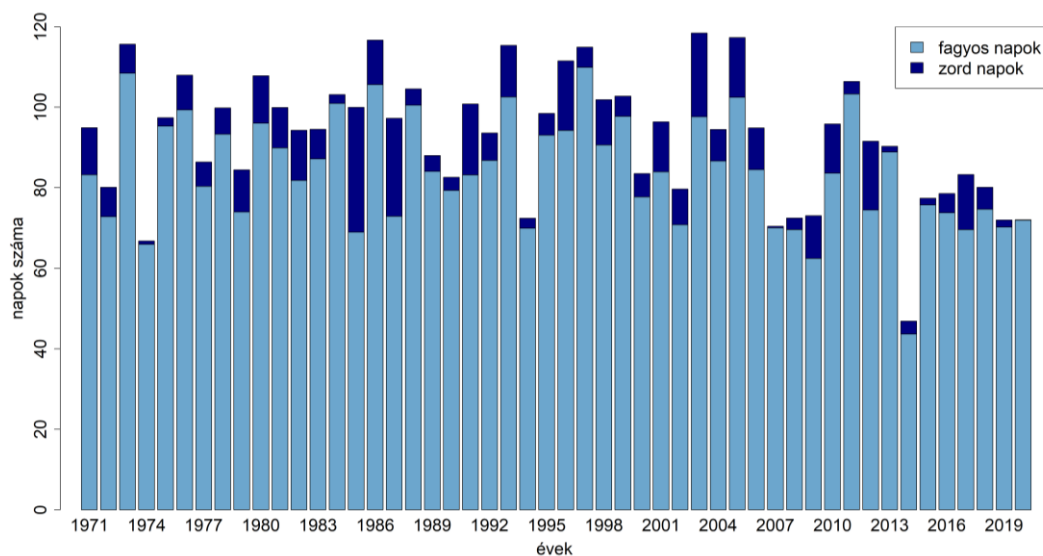


16. ábra: Magyarország legalább 25%-án, minimum 5 napon keresztül tartó hőségnapok előfordulása 1971 és 2020 között.

Az évtizedenkénti eloszlás ebben az esetben is hasonlóan alakult, mint a korábban bemutatott indexeknél, azonban az esetszám már jóval nagyobb lett. A 14. ábrán 214 nap látható, míg itt összesen 347 napon teljesültek a kitételek. További fontos különbség a 14. ábrához képest, hogy míg a legalább 3 napon keresztül tartó másodfokú hóhullámos napok csak a nyári hónapokban fordultak elő, addig a minimum 5 hőségnapos időszakok már májusban és szeptemberben is, ami a függelékben található hőségnapok évtizedes eloszlását bemutató F1. ábráról szintén kiderül. Ez is a globális felmelegedésre, és egyúttal hazánk átlagos hőmérséklet-emelkedésére utal. Hiszen már nemcsak a nyári hónapokban mérhetünk magas maximumokat, hanem tavasz végén és ősz elején is, tehát ezen hóhullámos időszakok első előfordulása egyre korábban, míg az utolsó egyre később következik be, azaz meghosszabbodott a nyári hőség időszaka. Ugyanezeket a vizsgálatokat a harmadfokú hóhullámos- (F2. és F3. ábra), valamint a forró napokkal (F4. és F5. ábra) is elvégeztem, az ezekről készült ábrák a függelékben találhatóak.

4.1.2. A téli félév éghajlati indexeinek vizsgálata

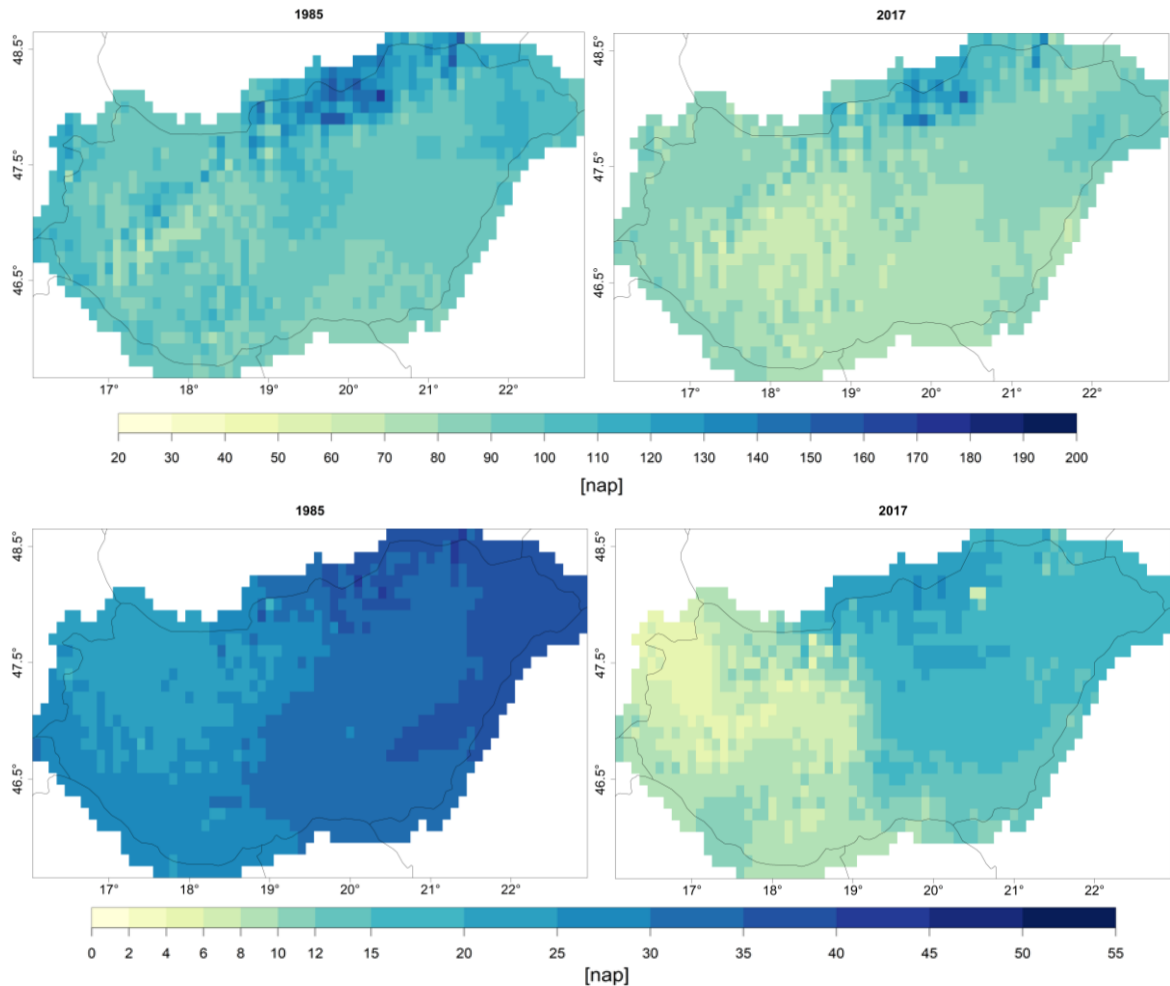
A téli félévre vonatkozóan – a korábbi sorrendet követve – elsőként a zord és fagyos napok országos trendjét mutatom be a vizsgált 50 évben. Hasonlóan a 12. ábrán látottakhoz, itt is az előbb említett indexek országos éves összegét területileg átlagoltam, így kaptam meg a bemutatandó diagramot. A 17. ábrán azon napok éves összegének magyarországi átlagértékeit láthatjuk, amikor a napi minimum-hőmérséklet legfeljebb a 0 °C-ot (fagyos nap), vagy a -10 °C-ot (zord nap) érte csak el. Alapvetően e két index esetében nem rajzolódik ki olyan látványos csökkenő tendencia, mint a hóhullámos napok számában a növekvő trend. Ha korábbi évektől indítjuk az elemzést, például már 1901-től, akkor a trend jobban megjelenik [7 – Hidegindexek, met.hu]. Megállapítható, hogy az 1970-es és 1980-as évek első fele – a hóhullámos napok értékeihez hasonlóan – a zord napok tekintetében is kimondottan kis esetszámú volt, majd ezt követően kissé nőtt az átlagérték. Ugyanakkor mindkét index esetén a csökkenő tendencia nagyjából a 2000-es évektől kezdődően fokozódott.



17. ábra: Fagyos és zord napok éves számának országos átlaga 1971–2020 között.
(A fagyos napok száma itt nem tartalmazza a zord napokét.)

E két index esetében nehezebb kiválasztani, egy-egy igazán kiugró évet, mivel jóval magasabbak az esetszámok, mint a nyáron vizsgáltaknál, illetve kirajzolódik, hogy a hideg, zord időszakok száma évről-évre is igencsak eltérő lehet. Az általam vizsgált 1971–2020-as időszakból kiválasztottam két igazán hidegnek mondható évet. A 18. ábrán az 1985. és 2017. év fagyos és zord napjainak összesített számát láthatjuk a magyarországi HuClim adatbázis alapján. A felső térképeken a fagyos (magában foglalva a zord) napok éves száma jelenik meg 1985-ben és 2017-ben. A két év közül a múlt századbelinél főként az Északi-középhegység térségében sok helyen fordult elő 120 nap fölötti érték is, de összességében a

teljes országot tekintve átlagosan 20–30-cal több fagyos nap volt, mint 2017-ben. Emellett a területi eloszlás a másodfokú hőhullámos napokhoz hasonlóan (13. ábra) itt sem tér el sokban. Hiszen a középhegységeinkben mindkét évben a legtöbb, míg az alföldi tájakon kevesebb, a Balaton környékén – a víz éjszakai fűtő hatása miatt – pedig a legkevesebb fagyos nap fordult elő.



18. ábra: A fagyos (fent) és zord (lent) napok éves száma 1985-ben (balra) és 2017-ben (jobbra).

A 18. ábra alsó térképei a zord napok éves számát mutatják 1985-ben és 2017-ben. Ezeken a napokon a minimum-hőmérséklet legfeljebb a -10 °C -ot érte csak el. A két év között szembeötlő a különbség a napok számában. 1985-ben kifejezetten sok zord nap fordult elő, még a kevésbé hideg észak-dunántúli tájakon is 20–25, míg a legzordabb északkeleti területeken 35–45 ilyen nap volt. Ezzel ellentétben 2017-ben – ami az utolsó évtizedben kifejezetten hideg évnek számított – jóval kevesebb zord napot regisztráltak. Az ország nagy részén 10–12 nap alatti volt ez az érték, csak az Északi-középhegységben fordult elő 20–30 zord nap. Ugyanakkor a területi eloszlás itt sem különbözik nagy mértékben, ugyanis mindkét esetben megfigyelhető egy nyugatról kelet felé történő növekedés. Ez nagyrészt a hazánkat érő hatásoknak tudható be. Ugyanis a Kárpát-medencébe gyakran nyugat,

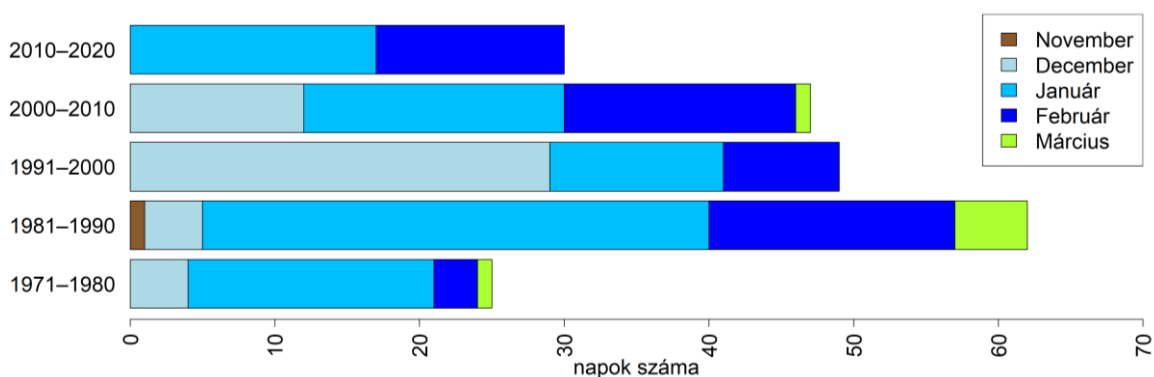
északnyugat felől enyhébb, nedvesebb óceáni légtömeg, míg az ország keleti felére száraz kontinentális levegő advektálódik. Utóbbi légtömeg az alacsony nedvességtartalma miatt jobban le tud húlni, így sokkal zordabb körülményeket tud kialakítani.

A legintenzívebb és leghosszabb zord időszakok felkutatására – hasonlóan a nyári indexekhez – itt is elvégeztem az időbeli és térbeli leválogatást. Ebben az esetben a kikötés az volt, hogy legalább 3 egymást követő napon keresztül teljesüljön a zord nap feltétele. Majd ezek után következett a területi lefedettség vizsgálata, miszerint a fenti kritériumok minimum az ország 25%-ára igaz kell legyenek. Ennek eredménye a 19. ábrán látható. Míg a másodfokú hőhullámos napokat reprezentáló ábra (14. ábra) esetében szépen kirajzolódott a növekvő tendencia, addig a hasonló esetszámú zord napok esetében elsősre nem vehető észre a csökkenő trend. Leginkább sávós szerkezet figyelhető meg, mely azt a megállapítást támasztja alá, hogy míg a meleg időszakok előfordulását nagyban befolyásolja a klímaváltozás, addig a hideghullámok esetében a globális felmelegedés ellenére is előfordulhatnak igen hideg évek. Ugyanis az éjszakai lehülésért nagyban felelősek az olyan lokális körülmények, mint például a derült égbolt, száraz levegő vagy a szélcsendes éjszaka. Összességében látható, hogy a vizsgált időszak első két évtizedében volt a legtöbb nagy területi kiterjedésű (75–80% fölötti) zord nap, míg ezeknek a száma az 1990-es évektől jócskán lecsökkent, de például a 2002/2003-as vagy 2011/2012-es tél igencsak hidegnek bizonyult. Ezeken túl a körök színezése itt is azon különböző hónapokat jelöli, amikor az adott esemény előfordult. Ezeket megfigyelve elég változatos kép rajzolódik ki. Összességében megállapítható, hogy a januári esetek száma csökkent, míg a februáriaké növekedett a vizsgált 50 évben, tehát a hideg periódusok eltolódása figyelhető meg az évszakon belül.



19. ábra: Magyarország területének nem kevesebb mint 25%-án, minimum 3 napig tartó zord napok előfordulása 1971 és 2020 között.

A fenti esetek évtizedenkénti eloszlását a 20. ábra még jobban reprezentálja, hiszen nemcsak a Magyarország területének legalább 25%-án és minimum 3 napon keresztül tartó zord időszakok csökkenését figyelhetjük meg rajta, hanem ezen esetek havi eloszlását is. Az 1980-as évek kiemelkedően hidegnek bizonyultak a több mint 60 napos értékkel. További érdekesség, hogy ebben az évtizedben márciusban és novemberben is előfordult a kritériumoknak megfelelő időszak, de a legtöbb esetszám még januárban volt. Majd az 1990-es években már decemberben regisztrálták a legtöbb ilyen napot. A 2010-es évektől kezdve viszont egy erőteljesebb csökkenés mutatható ki, ugyanakkor a februári esetek száma nőtt.



20. ábra: Magyarország területének minimum 25%-án és legalább 3 napon keresztül tartó zord napok évtizedes eloszlása 1971 és 2020 között.

Végül a téli napokra is elvégeztem ugyanezt a vizsgálatot azzal a különbséggel, hogy legalább 5 napos időtartamban kellett teljesülnie a $T_{\max} \leq 0$ °C feltételnek. Itt is megjelenik az 1980-as évek nagy esetszáma (21. ábra), de meglepő módon a 2000-es években is nagyon magas volt a kitételeknek megfelelő napok száma. Ezen index évtizedenkénti, havi eloszlásai a függelékben találhatóak (F6. ábra), de a 21. ábrán a körök színét tekintve a december és a január emelhető ki, melyek közül a decemberi esetszámok csökkentek le a 2010-es évekre.



21. ábra: Legalább 5 napon keresztül tartó téli napok előfordulása, mely az ország területének minimum 25%-án teljesült 1971 és 2020 között.

4.1.3. Összegzés

A vizsgált éghajlati indexek – melyek egy részét az előbbieken jellemeztem, a továbbiak pedig a függelékben (F1–F6. ábra) láthatók – azt mutatják meg, hogy a hóhullámok száma a 20. század utolsó és a 21. század első két évtizedében nagy mértékben megnövekedett. A zord időszakok előfordulása viszont nem csökkent olyan nagy ütemben, mint ahogy a hóhullámoké nőtt, hiszen mindkét index esetén az 1970-es években volt a legalacsonyabb esetszám, míg előbbinél az ezt követő évtizedben regisztrálták a legtöbbet a vizsgált 50 évben. *Spinoni et al.* (2015) tanulmánya szintén a Kárpát-medence térségére vizsgálta a hideg- és hóhullámos időszakokat 1961–2010-re vonatkozóan. A kutatás során saját elemzéseimhez képest eltérő definíciót alkalmaztak ezen időszakok azonosítására. A kikötéseik a következők voltak: hóhullám esetében a hőmérséklet legalább öt egymást követő napon keresztül a 90. percentilis felett van, és hideghullámoknál pedig legalább öt egymást követő napon keresztül a 10. percentilis alá esik. A percentilisek átlagos értékét az 1971–2000-es referenciaidőszak mérései alapján állapították meg. Továbbá külön éjszakára és nappalra, illetve kombinálva éjszakára/nappalra vonatkozóan is megállapították a hideg- és hóhullámokat, és ezekhez időtartamot és intenzitást is hozzárendeltek. Mindezekből azt kapták, hogy a hideghullámok az ősz kivételével minden évszakban csökkentek, a hóhullámos események száma, intenzitása pedig egész évre nézve növekedett, főként a dél-alföldi régióban. Az eltérő kritériumrendszer ellenére mindezek saját kutatásaim során is kirajzolódtak. Továbbá az évtizedes eloszlásokat tekintve is hasonló eredményre jutottam saját vizsgálataimban.

Sajnos a jövőben várhatóan még inkább növekedni fog a hóhullámos időszakok száma (*Pongrácz et al.*, 2013): a 21. század végére a harmadfokú (legalább 3 egymást követő napon keresztül $T_{\text{közép}} > 27 \text{ °C}$) hőségiastások hasonló esetszámúak lesznek, mint az 1961–1990 közötti időszakban előforduló elsőfokú hőségiastások napok ($T_{\text{közép}} > 25 \text{ °C}$) előfordulása. Ugyanakkor a fagyos napok száma várhatóan tovább fog csökkenni a következő évtizedekben (*Dian et al.*, 2021). Továbbá az is körvonalazódik, hogy a meleg, hőségiastások az évben hamarabb fognak előfordulni, és még ősszel is megjelenhetnek, ami lassan az átmeneti évszakok rövidüléséhez vezet.

4.2. Szinoptikai elemzés eredményei

4.2.1. Hóhullámos esetek

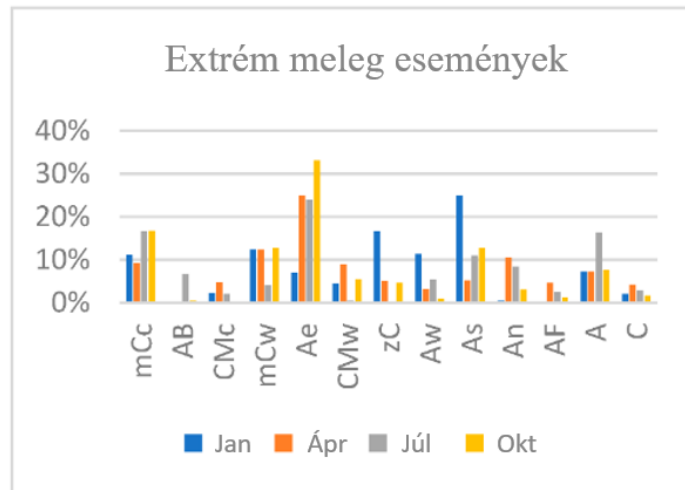
A klimatológiai elemzés során láthatóvá vált, hogy az elmúlt évtizedekben sűrűsödött a hóhullámok, meleg időszakok előfordulása. A 3.2. alfejezet alapján azonosítottam tíz olyan esetet, amikor időben és térben is nagyon intenzív meleg időszakokat élhettünk át Magyarországon. Ezeket a 4. táblázatban foglaltam össze.

4. táblázat: Tíz kiemelkedő hóhullámos időszak Magyarországon 1971–2020 között (ac: anticiklon).

Időtartam	Jellemző szinoptikai helyzet	Csapadék egzisztencia	Csúcsnap, maximum-hőmérsékletek
1992.08.25–30.	Aw → A → Ae	pár mm, egy-egy helyen 10 mm fölött esett zivatarokból	08.28.: 34–39 °C
1994.07.25–08.11.	AF → ac a kontinens nagy részére kiterjed → Ae	helyenként záporból, zivatarból 20–30 mm körül	08.01.: 33–39 °C
2000.08.15–22.	Aw → ac centruma Közép- és Dél-Eu. → majd Délkelet-Eu. felett	számottevő csapadék nem volt	08.20.: 34– 39 (napi rekord!) °C
2007.07.15–24.	Közép-Európa és a Földközi-tenger felett anticiklon → A	számottevő csapadék nem volt	07.20.: 37– 42 (abszolút rekord!) °C
2011.08.21–27.	A → (mCw) → Ae	utolsó nap NY-on záporból, zivatarból 1–21 mm	08.25.: 31– 39 (napi rekord!) °C
2012.06.28–07.09.	gyenge anticiklonális helyzet, inkább helyi hatások érvényesültek	helyenként záporokból, zivatarokból 10–20 mm körül	07.05.: 34–39 °C
2013.07.31–08.09.	Aw → A → É-D tengely mentén ac → Aw → A → An → Ae	számottevő csapadék nem volt	08.08.: 34– 41 (napi rekord!) °C
2015.07.15–25.	Aw → A → mCw → Aw → A	záporokból, zivatarokból helyenként 20–30 mm körül	07.23.: 32–39 °C
2015.08.02–16.	Ae, ac a Kelet-európai-síkság feletti, és AF helyzetek váltakozása	időszak elején és végén záporok, zivatarok (lokálisan 74 mm is)	08.12.: 34–40 °C
2017.07.31–08.06.	A → Ae → Aw	csak az időszak végén záporokból, zivatarokból 10 mm körül, néhol 40 mm	08.04.: 34– 41 (napi rekord!) °C

Az esetek leválogatása több lépcsőben történt. Mivel a legintenzívebb és/vagy leghosszabb hőhullámokat kerestem, ezért elsőként azokat az időszakokat gyűjtöttem ki, amikor legtöbb egymást követő napon regisztráltak az ország legalább 75%-án másodfokú hőhullámos napot. Ezt követően az adott időtartamot fokozatosan kiterjesztettem az alacsonyabb (minimum 50%-os, majd 25%-os) területi kiterjedésű napok számával. Majd az így megkapott hőhullámos eseteket az Országos Meteorológiai Szolgálat napijelentés kiadványai [3 – Napijelentés kiadványok, met.hu] és a később bemutatásra kerülő kumulatív index számítása alapján véglegesítettem.

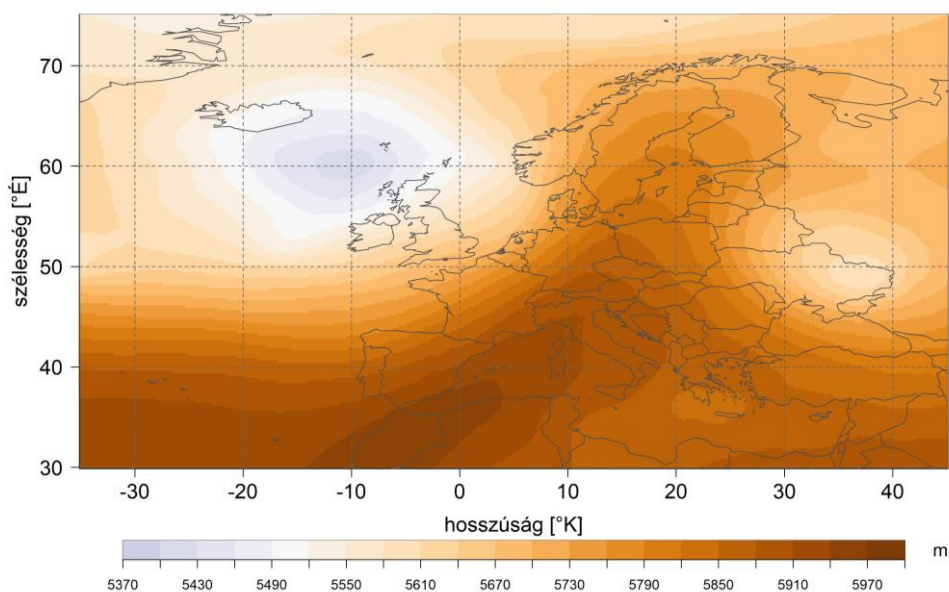
A 4. táblázat első oszlopában feltüntetett időpontok eloszlása rögtön alátámasztja az éghajlati elemzés során kapott eredményeket (14. ábra), miszerint az 1970-es és 1980-as években intenzív és hosszantartó meleg időszakok nem fordultak elő. A kiemelt tíz eset közül kettőt az 1990-es években, szintén kettőt a 2000-es, és hatot pedig már a 2010-es években regisztráltak. Tehát ezen időszakok előfordulásából is kirajzolódik az elmúlt évtizedekben történő, és rendkívül gyors ütemben zajló melegedés, ami jelenleg is folytatódik, hiszen a tavalyi, 2022 nyara volt országos átlagban a legmelegebb nyár 1901 óta Magyarországon [10 – A legmelegebb nyár 1901 óta, met.hu], azonban vizsgálataim csak 2020-ig tartanak, ezért ez az év már nem szerepel a kutatásban. A 4. táblázat második oszlopában az adott időszak alatt jellemző szinoptikai helyzet olvasható. Az itt használt rövidítések a Péczely-féle makrocirkulációs osztályozás kódjai, melyeket a 3.2.2. alfejezetben található 3. táblázatban tüntettem fel. Az esetek nagy részében megjelenik az Ae helyzet, ami hazánkban meridionális délies áramlást okoz. Ezzel általában meleg, száraz, trópusi eredetű légtömeg érkezik a Kárpát-medencébe, ami nagyban hozzájárul a hőhullámok kialakulásához és fokozódásához. A másik jellemző Péczely-féle típus, amikor Magyarországot kánikula sújtotta, a centrumhelyzet volt. Egy ilyen szinoptikai helyzetben dőlt meg az országos (és a budapesti) abszolút maximum-hőmérséklet rekordja Kiskunhalason 2007. július 20-án 41,9 °C-kal (Budapesten 40,7 °C-kal), továbbá az országban a legmagasabb napi középhőmérséklet is ekkor állt be a dunaújvárosi mérőállomáson [11 – Időjárási rekordok, met.hu]. Többször meghatározó volt az AF helyzet is, illetve amikor az anticiklon központja a Kelet-európai-síkság felett helyezkedett el. Ekkor kelet felől szárazabb, kontinentális légtömeg advektálódik a Kárpát-medencébe, ami szintén fokozza a hőhullámok intenzitását. A nyugatról benyúló anticiklon enyhébb, óceáni eredetű levegőt szállít, ami némileg labilizálja a légkört, ez segít a helyi záporok, zivatarok kialakulásában, és ezzel lokálisan, rövid időre csillapíthatja a hőséget.



22. ábra: Extrém meleg időszakok gyakorisági eloszlása a 13 Péczy-féle cirkulációs típus között minden évszak második hónapjában. Forrás: *Mika et al.* (2021)

Mika et al. (2021) szintén azt vizsgálták 1991–2020-ra, hogy milyen makroszinoptikus helyzetben alakulnak ki szélsőségesen meleg időszakok. A 22. ábra ennek eredményét összegzi minden évszak második hónapjára vonatkozóan összesen kilenc, alacsony tengerszint feletti magasságú rácspont adatait átlagolva (öt rácspont Magyarországon, kettő Romániában, egy-egy pedig Szerbiában és Horvátországban található). E kutatás szerint is az Ae helyzetben sújtotta legtöbbször hóhullám a Kárpát-medencét, továbbá júliusban a centrumhelyzetnek (A) is nagy volt még a gyakorisága. Ez az eredmény az általam leírtakkal jó egyezést mutat. Ugyanakkor megjegyzendő, hogy nemcsak nyáron, hanem tavasszal és ősszel is nagy számban a Magyarországtól keletre elhelyezkedő anticiklon (Ae) okozott szélsőségesen meleg időszakokat.

Összességében elmondható, hogy az általam vizsgált tíz eset mindegyikében 1015–1020 hPa körül ingadozott hazánk térségében a felszín közelében mért légnyomás. Ennek oka a levegő hőmérsékletében keresendő, ugyanis ezen képződmények többsége melegmagvú anticiklon volt, azaz a centrum felé haladva nőtt a hőmérséklet bennük. Ilyen magasnyomású rendszerek általában nagyobb vertikális kiterjedésűek, és alacsonyabb a felszín közeli légnyomás, mint a télen jellemző hidegmagvú anticiklonok idején. A 23. ábrán a 2013. augusztus 3-ai ERA5 adatbázisból származó 500 hPa-os szint geopotenciál mezője látható, amin jól kirajzolódik a 4. táblázatban olvasható észak-dél tengelyű gerinc. A kutatás során összehasonlítottam a 850 hPa-os, valamint a 2 m-es hőmérsékleti értékekkel, melyek alátámasztják, hogy valóban melegmagvú anticiklonról beszélhetünk. A geopotenciális magasság értékeiből látható, hogy a légoszlop a centrum felett a legnagyobb vertikális kiterjedésű, mely a gázokra vonatkozó fizikai törvényszerűségekből következik.

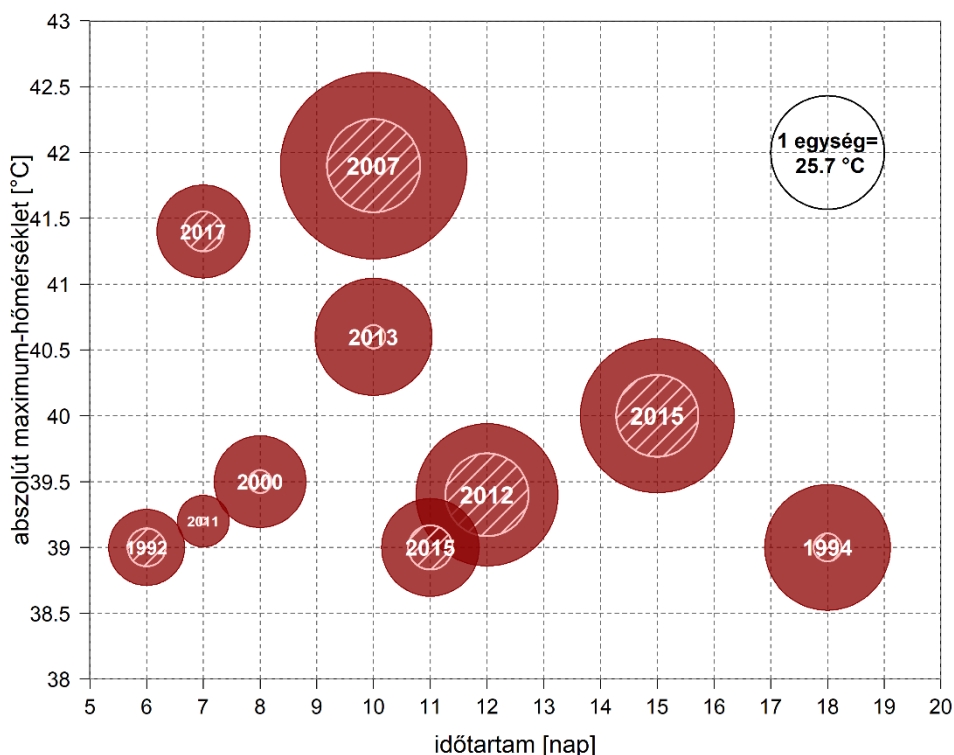


23. ábra: Az 500 hPa-os nyomási szint geopotenciális magassága méterben kifejezve 2013. augusztus 3-án, 12 UTC-kor.

A jellemző nagytérségi helyzeteknél már említettem, hogy milyen tulajdonságú és milyen irányból érkező légtömegek jellemzik az adott anticiklonális típust. Összességében elmondható, hogy mind a tíz esetben az uralkodó légtömeg dél, délnyugat felől érkező száraz, meleg, afrikai, illetve szubtrópusi eredetű levegő volt. Ilyen léghullámok advektálódása idején regisztráltak hőségidőszakokat, ugyanakkor a 2013-as és a 2015. júliusi esetben – Aw helyzetben, illetve a ciklon előoldal közelsége miatt – labilis levegő is szállítódott nyugat, északnyugat felől, ezzel helyi záporokat, zivatarokat okozva.

A 4. táblázat harmadik oszlopában a csapadéktevékenység, míg a negyedik oszlopában a legmelegebb, úgynevezett csúcnap, illetve azon a napon mért maximum-hőmérséklet tartománya [3 – Napijelentés kiadványok, met.hu] olvasható. Ezen adatok szoros összefüggésben állnak egymással, ugyanis a tíz eset közül azon öt hőhullám idején dőlt meg a napi (2007-ben az abszolút) melegrekord, amikor számottevő csapadék nem hullott (például 2013., 2017.). Tehát a szárazság hőmérséklet fokozó hatása más, korábban említett kutatásokhoz (Vautard *et al.*, 2007; Stefanon *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2020) hasonlóan hazánkban is kimutatható. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy országos esőzésről egyik esetben sem beszélhetünk, hanem csak gomolyfelhőkből hullott záporos jellegű csapadék, illetve lokálisan zivatarok okoztak helyenként jelentősebb mennyiségű esőt, akár jégesőt is. Mindezen túl további közös jellemző, hogy mind a tíz vizsgált esetnek egy, általában északnyugat, nyugat felől érkező hidegfront vetett végét.

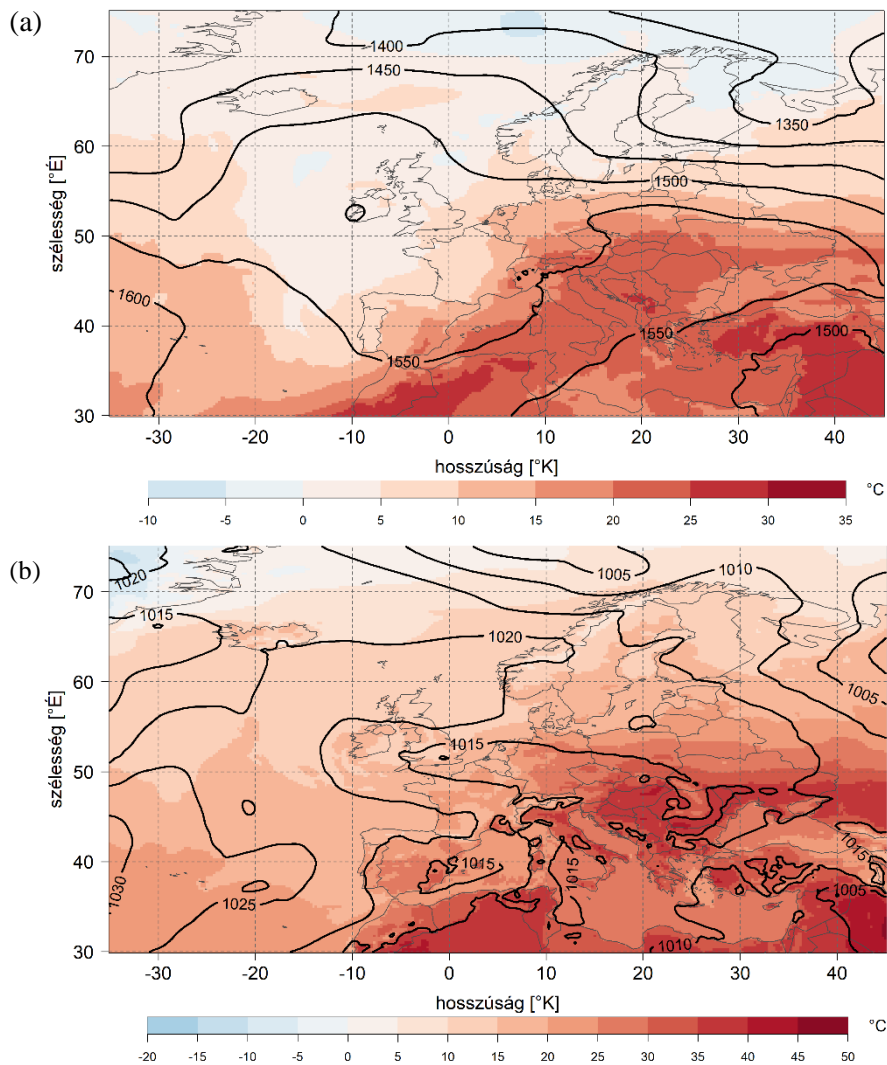
A hőhullámok súlyosságát, intenzitását az időszak alatt mért hőmérsékleti értékeken túl az adott esemény területi kiterjedése és időtartama is meghatározza. Ezen indikátorokat a 24. ábra összegzi a 4. táblázatban olvasható tíz hőhullámra vonatkozóan. A 24. ábra y-tengelyéről az adott hőhullám alatt mért legmagasabb nappali hőmérséklet értékét lehet leolvasni, melyek a napijelentésekből származnak, hiszen a HuClim adatbázis interpolációja miatt a szélsőségek kiátlagolódnak az adatsorból. A körök területe arányos a kumulatív index nagyságával, az (1) képlet alapján a napi átlagos maximum-hőmérséklet 32 °C-tól vett eltéréseinek összegével; tehát a hőhullám alatt tapasztalt hőtöbbletet jelzi. A körök sugarát az átlagos indexértékhez viszonyítottan adtam meg. Az összehasonlítás megkönnyítéséhez az ábra jobb felső sarkában látható az egységsugarú, átlagos kumulatív index értékű kör. Az x-tengelyen olvasható számok pedig az adott hőhullámos esemény teljes időtartamát adják meg, illetve a körökben lévő csíkozott kitöltés pedig azon napok számának arányát fejezi ki a teljes időszakhoz viszonyítva, amikor minimum az ország 75%-án egyidejűleg másodfokú hőhullámos (legalább 3 napon keresztül a $T_{\text{közép}} \geq 25 \text{ °C}$) napot regisztráltak.



24. ábra: Az 1971 és 2020 között Magyarországon detektált tíz kiemelkedő hőhullám teljes időtartama és az az alatt mért abszolút maximum-hőmérséklet, illetve kumulatív indexe (kör nagysága). Az egységsugarú kör a kumulatív index átlagos értékének (25,7 °C) felel meg. A csíkozott kitöltés a legalább 75%-os területi lefedettségű másodfokú hőhullámos napok arányát mutatja meg a teljes időszakhoz viszonyítva.

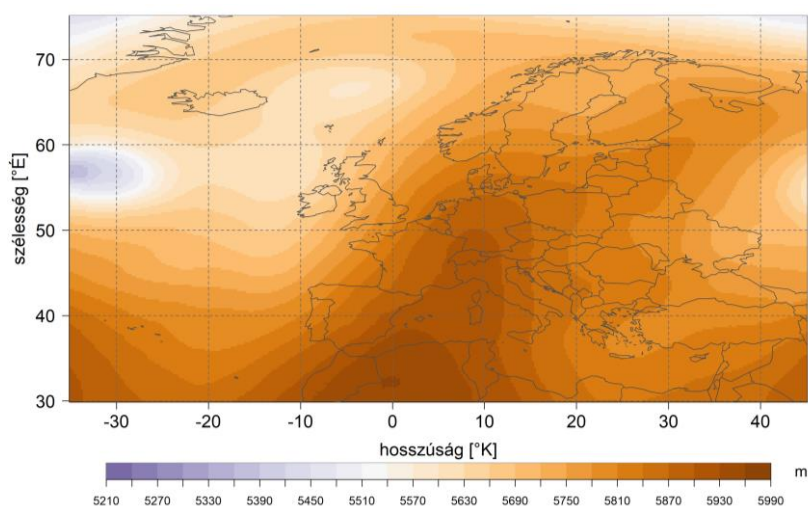
A 24. ábrát vizsgálva rögtön megállapítható, hogy a legintenzívebb, és egyben a legmelegebb a 2007-es hőhullám volt. Ezen szélsőségesen meleg időszak esetén számolt

kumulatív index értéke $42,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ lett, mely majdnem $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal több, mint a második legintenzívebb hőhullámé, a 2015. augusztusié volt. 2007-ben Dél- és Közép-Európa felett anticiklonális hatások uralkodtak. A 25. ábrán mutatom be ezen extrém meleg esemény csúcspanjára (2007. július 20.) vonatkozóan az ERA5 adatbázisból származó európai kivágat 2 m-es, illetve 850 hPa-os nyomási szint hőmérsékleti értékeit. A 25.a térképről látható, hogy már körülbelül 1500 m-es magasságban, a 850 hPa-os nyomási szinten is nagyon meleg, forró légtömeg advektálódott dél, délnyugat felől a Kárpát-medence térségébe. Továbbá összehasonlítva a 25.b ábrával észrevehető, hogy a legnagyobb hőség azon területeket sújtotta, ahol 850 hPa-on is nagyon meleg volt a levegő. Tehát a légtömeg magasabb rétegeiben jellemző tulajdonságai alapvetően meghatározzák a felszíni meteorológiai változók értékét (például a maximum-hőmérsékletet az „állapotgörbe kirugódása” által), jelen esetben a hőhullám kialakulását, majd fokozódását.



25. ábra: (a) A színezés a 850 hPa-os nyomási szint hőmérsékletét, az izovonalak a 850 hPa-os szint geopotenciális magasságát jelzik méterben kifejezve 2007. július 20-án, 12 UTC-kor. (b) A 2 m-es hőmérsékletet (színezés), és az átlagos tengerszintre átszámított légnyomást (izovonalak) mutatja meg 2007. július 20-án, 12 UTC-kor.

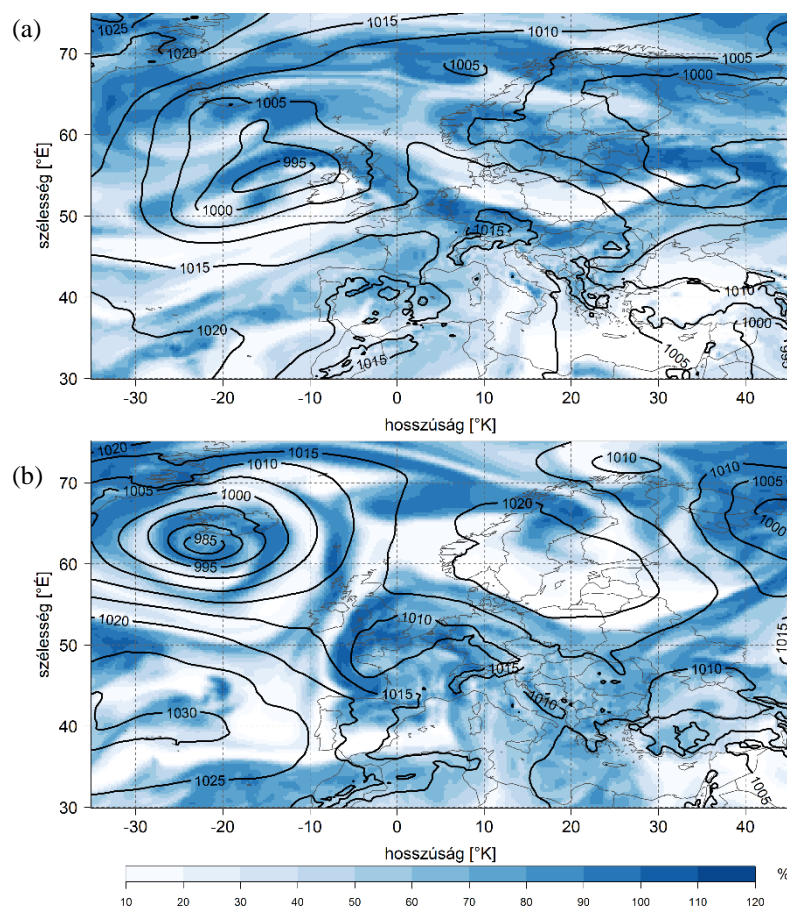
Ugyanakkor nemcsak az intenzív hőhullám lehet megterhelő az emberek, élőlények számára, hanem a hosszantartó meleg időszakok is. Az általam vizsgált 50 évben a leghosszabb hőhullámot 1994-ben regisztrálták. Ez az esemény sem a kumulatív index értékét, tehát a hőtöbbletet, sem az abszolút maximum-hőmérsékletet tekintve nem mondható kiemelkedőnek, viszont 18 napig tartott. Ez idő alatt Európa szinte egészét anticiklon uralta, amit a 26. ábra, az időszak egy adott napjára (1994. augusztus 4.) vonatkozó 500 hPa-os geopotenciális magasság térképe is alátámaszt. Több közép-európai országban (például Lengyelországban és Csehországban) is az 1971–1999-es időszak meghatározó hőhulláma volt, és nagyfokú többlethalálozással járt együtt (Lhotka et al., 2018). Ugyanakkor a hosszú időtartam ellenére kevés volt azon napok aránya, amikor legalább az ország 75%-án egyidejűleg másodfokú hőhullámos napot regisztráltak volna.



26. ábra: Az 1994-es hőhullám idején az 500 hPa nyomási szint geopotenciális magassága 1994. augusztus 4-én, 12 UTC-kor.

Utóbbi megállapítás ellenpéldája a 2012-es hőhullám, amely arányaiban a legtöbb napon keresztül terjedt ki az ország minimum háromnegyedére. Ennek oka abban is rejtőzhet, hogy e szélsőséges időszak alatt csak gyenge anticiklonális hatások érvényesültek, úgynevezett bárikus mocsárhelyzet jött létre. Ekkor a térségben nincsenek frontok, a légnyomás jellemzően nem haladja meg az 1020 hPa-ot, és uralkodó légmozgás sincs. Emiatt a helyi hatások alakítják az időjárást, elegendő nedvesség esetén gomolyfelhők alakulnak ki, melyek a délutánra akár Cumulonimbussá is fejlődhetnek. A 4. táblázat harmadik oszlopában is olvasható, hogy ekkor lokálisan záporokat, zivatarokat is észleltek, melyekből helyenként 10–20 mm csapadék hullott. Továbbá e bárikus mocsárhelyzetben a Kárpát-medencébe – ebben az esetben is délnyugat felől – érkező afrikai eredetű légtömeg transzformálódni tudott, emiatt az ország nagy részén hasonló maximum-hőmérséklet állt be több napon keresztül.

Ezekon kívül megemlítendőek még a 2015-ös esetek is, melynek nyári hónapjai kiérdemelték a hőhullámok nyara elnevezést. Összesen öt hőhullámot kellett átélnünk ekkor Magyarországon (Kovács és Lakatos, 2015), melyből kettő be is került az általam több szempont alapján kiválasztott tíz legintenzívebb extrém meleg időszak közé. Ebben az évben fordult elő országos átlagban a legtöbb (összesen 28) hőhullámos nap, illetve az 5. legmelegebb nyár volt hazánkban 1901 óta [10 – A legmelegebb nyár 1901 óta, met.hu]. A vizsgálataim során a 2015. júliusi és augusztusi hőhullámokat néztem meg. A két esemény eltérő szinoptikai helyzetben jött létre. Az első esetben leginkább Aw helyzet dominált, mellyel enyhébb, és több hullámban nedvesebb légtömeg érkezett a Kárpát-medencébe (27.a ábra). Ez kedvezett a záporok, zivatarok kialakulásának, továbbá enyhítette a hőséget, ami az augusztusi hőhullámhoz viszonyított alacsonyabb maximumokban is megmutatkozott. Ugyanakkor a 2015. augusztusi hőhullám a 850 hPa-os szinten főként advektálódó forróbb légtömeg hatására lehetett melegebb. Emellett ezen extrém meleg időszak idején is érkeztek nedvesebb léghullámok, de itt jellemzően már az anticiklon peremén (27.b ábra), míg a júliusi esetben – a gyengébb anticiklonok idején – inkább a megszűnő frontok nedvessége advektálódott térségünkbe.



27. ábra: (a) 2015. július 20-án, (b) 2015. augusztus 14-én a 700 hPa-os nyomási szint relatív nedvessége, izovonal: az átlagos tengerszint feletti légnyomás.

4.2.2. Zord időszakok

A nyáron tapasztalt hóhullámokhoz hasonlóan, az éghajlati elemzés során leválogatásra került tíz nagyon hideg és/vagy hosszantartó zord időszak, aminek összefoglalása az 5. táblázatban található.

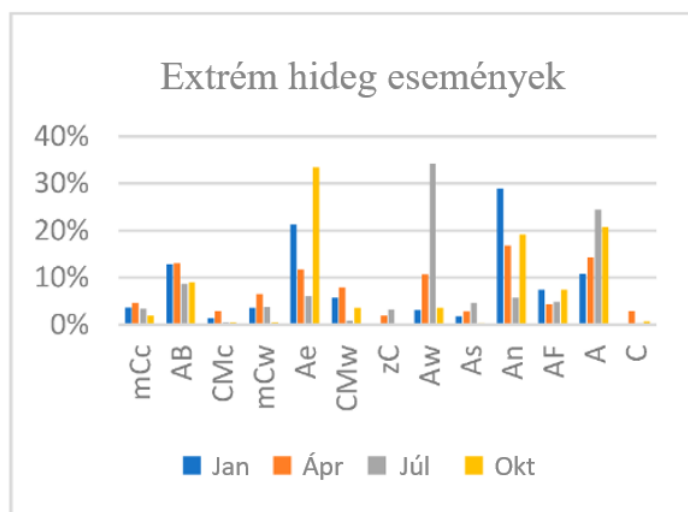
5. táblázat: Tíz kiemelkedő hideghullám Magyarországon 1971–2020 között (ac: anticiklon).

Időtartam	Jellemző szinoptikai helyzet	Hótakaró egzisztencia	Csúcsnap, minimum-hőmérséklet
1985.01.04–21.	sekély alacsony légnyomású zóna → köztes ac → AB/An → AF → An	országos hótakaró (átlagban 7–20 cm, mely csökkent)	01.08.: -17 és -27 °C között
1985.02.11–22.	ac a Kelet-európai-síkság felett → A → AB → AF → An → ac az Alpok felett	országos hótakaró (átlagosan 7–20 cm vastag)	02.14.: -13 és -23 °C között
1987.01.30–02.06.	AB/An → Ac ÉK-re → A → Ae → Atlanti-óceántól a Fekete-tengerig ac-híd	országos hótakaró (átlagosan 20–40 cm vastag)	01.31.: -15 és -28 (napi rekord!) °C között
1991.01.31–02.06.	mCc → ac a Kelet-európai-síkság felett → An (közben hidegcsepp)	foltokban	02.02.: -12 és -21 °C között
1996.12.25–1997.01.01.	mCc → An (Kelet-európai-síkságtól a Brit-szigetekig), tőlünk D-re ciklon → AB/An	országos hótakaró (ált.: 6–16 cm, max. vastagsága 12.29-én)	12.28.: -12 és -25 °C között
2005.02.05–11.	ac-híd a Kelet-európai-síkságtól az Ibériai-félszigetig → ac ÉK-re → Ae → Ae/A	többfelé hótakaró, fokozatosan vékonyodott	02.09.: -13 és -27 °C között
2006.01.23–28.	mCc → ac-híd a Kelet-európai-síkságtól az Ibériai-félszigetig → An → Ae	középhegységekben helyenként	01.25.: -12 és -24 °C között
2012.01.30–02.14.	szibériai ac+mediciklon → ac-híd a Kelet-európai-síkságtól az Ibériai-félszigetig+hidegcsepp	ciklon és hidegcsepp okozta havazás: többfelé ≥ 20 cm-es hótakaró	02.11.: -12 és -25 °C között
2017.01.06–12.	mCc → ac tőlünk ÉNY-ra → Nyugat-Európától az Urálig ac-híd → A → Ae	jellemzően csak folt, lepel	01.08.: -10 és -28 (napi rekord!) °C között
2017.01.19–31.	Brit-szigetektől a Fekete-tengerig ac → ac ÉNY-ra, majd ÉK-re → A → Ae	több helyen folt–10 cm, Északi-középhegységben 20–30 cm körül	01.20.: -10 és -25 (havas tájakon) °C között

A tíz hideg időszak kigyűjtése – a hőhullámoknál leírtakhoz hasonlóan – szintén több lépésben valósult meg. Ebben az esetben is azon legtöbb egymást követő nappól indultam ki, amikor az ország minimum 75%-ára egyidőben teljesült a feltétel, miszerint legalább 3 napon keresztül zord ($T_{\min} \leq -10 \text{ °C}$) napot regisztráltak. Majd az ez alapján leválogatott eseteket bővítettem a kisebb (50%-os, majd 25%-os) területi kiterjedésű napokkal, végül szintén a napijelentések és a kumulatív index számításával pontosítottam az 5. táblázatban olvasható hideghullámos időszakokat.

Az 5. táblázat első oszlopában lévő dátumok jól tükrözik a 20. ábra zord időszakjainak évtizedes eloszlását. Ugyanis az 1980-as, kiemelkedően hideg évekből regisztráltak az általam leválogatásra került tíz legintenzívebb hideghullám első három esetét. Az 1990-es és a 2000-es években kettő-kettő, míg az utolsó vizsgált évtizedben három jelentősebb zord időszak fordult elő. A 2010-es évek nagyobb esetszáma látszólag ellentmondásba kerülhet a 20. ábrán látottakkal, de a később bemutatásra kerülő kumulatív index értékeiből kiderül, hogy ezek közül a 2012-es hideghullám nagyon intenzív, míg a 2017-es esetek jóval gyengébbek voltak. A második oszlopban olvashatók a jellemző szinoptikai helyzetek, amelyek kevésbé mutatnak akkora összhangot, mint amit a hőhullámoknál tapasztaltam. A legtöbb zord időszakban a Kelet-európai-síkság fölött lévő anticiklon volt a meghatározó, ami hazánkba északkelet felől szállít sarkvidéki eredetű, általában szárazabb légtömeget. Továbbá az esetek nagy részében az An és AF helyzet is uralkodóvá vált, amelyek Magyarországon azonális, keleti áramlással járó képződmények. Tehát Észak- és Északkelet-Európa felett lévő magasnyomású rendszerek esetén kell legtöbbször számítani a legintenzívebb hideghullámokra a Kárpát-medencében, amely korábban Pfahl (2014) tanulmányából is kiderült. Ezeken túl viszonylag ritka meteorológiai jelenség is ki tud alakulni télen az úgynevezett Vojejkov-tengely (*Voelikov*, 1884). Ekkor a szibériai és az azori maximum olyannyira megerősödik, hogy egy, Európa felett délnyugat-északkelet tengelyű magasnyomású hidat hoznak létre. Ez a képződmény blokkolja a nyugat felől érkező ciklonokat, és a keleti oldalán a kontinens nagy részére hideg, sarkvidéki eredetű légtömeget szállít. Ilyen helyzet jött létre például 2005-ben vagy 2006-ban, illetve 2012 februárjában is (*Matishov et al.*, 2014). Ugyanakkor előfordulhat északnyugat-délkelet tengelyű anticiklonhíd is – mint 2017. január második felében –, ami esetén észak felől zajlik a hidegadvekción. Továbbá jellemző makrocirkulációs típus még a Brit-szigetek felett létrejövő anticiklonális (AB) helyzet, ami Magyarországon szintén meridionális északias áramlással jár. Ugyanakkor a centrumhelyzet (A) is sok esetben meghatározó volt, viszont ekkor döntően

nyugodt, szélcsendes az időjárás. Mindemellett több zord időszak esetén a magasnyomás központja Magyarországtól keletre helyezkedett el (Ae), ekkor dél, délkelet felől általában száraz, kontinentális légtömeg advektálódik hazánkba. De ezen makrocirkulációs típus (illetve az An helyzet) esetén a Kárpátok vonulatai az érkező hideg levegő útját állják a felszínközeli légrétegben, egyfajta akadályt képeznek, s az áramlást eltérítve három különböző irányból történik a hidegbetörés: északnyugatról a Dévényi-kapun át, északkelet felől a Vereckei-hágón keresztül, és délnyugatról az Al-Duna völgyén át. Ekkor úgynevezett „lábas hideg” helyzet alakul ki (Vaszkó, 2016), mivel az alsó légrétegben zajlik a hidegbetörés, és a sarkvidéki levegő fokozatosan tölti ki a Kárpát-medencét.



28. ábra: Extrém hideg időszakokat kialakító Péczeley-féle makrocirkulációs típusok gyakorisági eloszlása. Forrás: Mika et al. (2021)

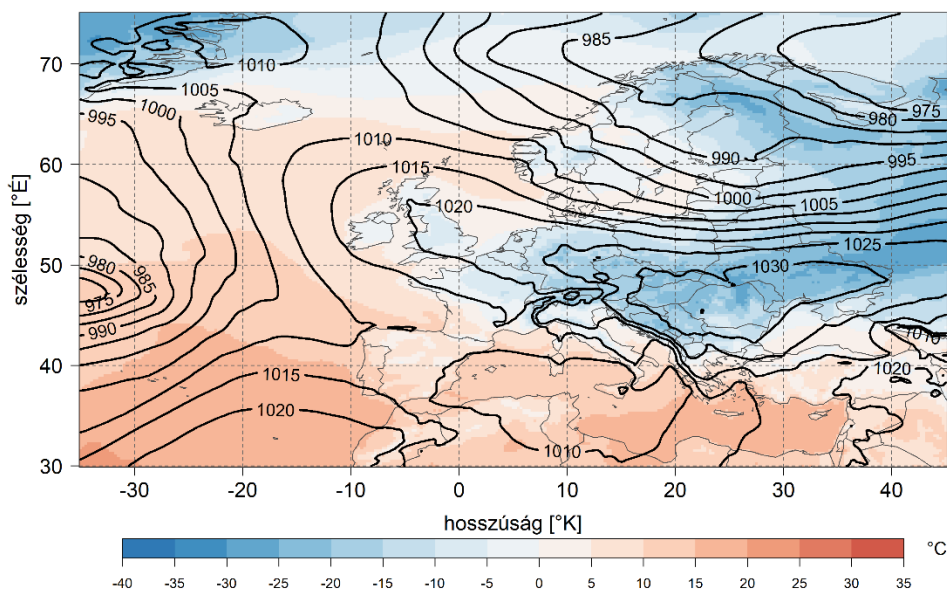
A 28. ábrán Mika et al. (2021) Kárpát-medencére végzett kutatásának eredményei láthatók, amelyeket a hőhullámoknál bemutatottakhoz hasonlóan kilenc, alacsony tengerszint feletti magasságú rácspont adatainak átlagolásával kaptak meg. E tanulmány is alátámasztja a vizsgálataimat, ugyanis ez alapján januárban az An, AF keleties, AB meridionális északias, valamint az Ae déli, délkeleti áramlású helyzetek voltak meghatározók. Ugyanakkor az extrém hideg időszakok körülbelül 10%-ában a centrumhelyzet is uralkodóvá vált, amely a hideg levegő nyugalomba jutását segíti elő.

Összességében elmondható, hogy az extrém zord időszakok a Kárpát-medencében akkor alakulnak ki, ha északias áramlással hideg, általában száraz légtömeg advektálódik térségünkbe, ez sok esetben (például 1991-ben, 1996-ban vagy 2006-ban is) egy átvonuló hidegfronttal érkezik. Ugyanakkor a hidegadvekción a blokkoló anticiklon peremén is megtörténhet (Sousa et al., 2018). Fontos megjegyezni, hogy amíg a hőhullámok esetén főként a nagytérségi folyamatok voltak a meghatározók, addig a zord időszakok intenzitását,

a minimum-hőmérsékletek alakulását a mezoskálájú jelenségek és hazánk medence jellege is nagyban befolyásolja. Ugyanis miután a magasnyomású képződmény peremén jellemző erősebb szél legyengül, úgy a sarkvidéki, hideg légtömeg az Alpok és Kárpátok vonulatai között megreked és nyugalomba jut, ezáltal fokozatosan transzformálódik a felszínközeli légréteg, és hosszantartó hideghullámok tudnak kialakulni. Ezzel szemben a zord időszakokat a legtöbb esetben egy melegfront vagy hullámzó frontálzóna érkezése szakítja meg, amely során délnyugat, nyugat felől enyhébb, sokszor óceáni eredetű légtömeg advektálódik a Kárpát-medencébe.

Mindezekén túl az 5. táblázatban olvasható tíz hideghullámban további közös tulajdonság, hogy a felszín közelében mért légnyomásértékek általában 1020–1040 hPa között ingadoztak. Amint említettem (4.2.1. alfejezet), az extrém meleg időszakok esetén alacsonyabb tengerszinti légnyomásértékek uralkodtak, amely a melegmagvú magasnyomású képződmények sajátossága. Ezzel szemben télen, a hóval borított felszínnek felett nagyon le tud hűlni a levegő, így a légoszlop zsugorodik, tehát sekélyebb, de jóval magasabb légnyomású, úgynevezett hidegmagvú, kontinentális anticiklonok alakulnak ki. Ekkor a centrum felé haladva csökken a hőmérséklet (Colucci, 2015).

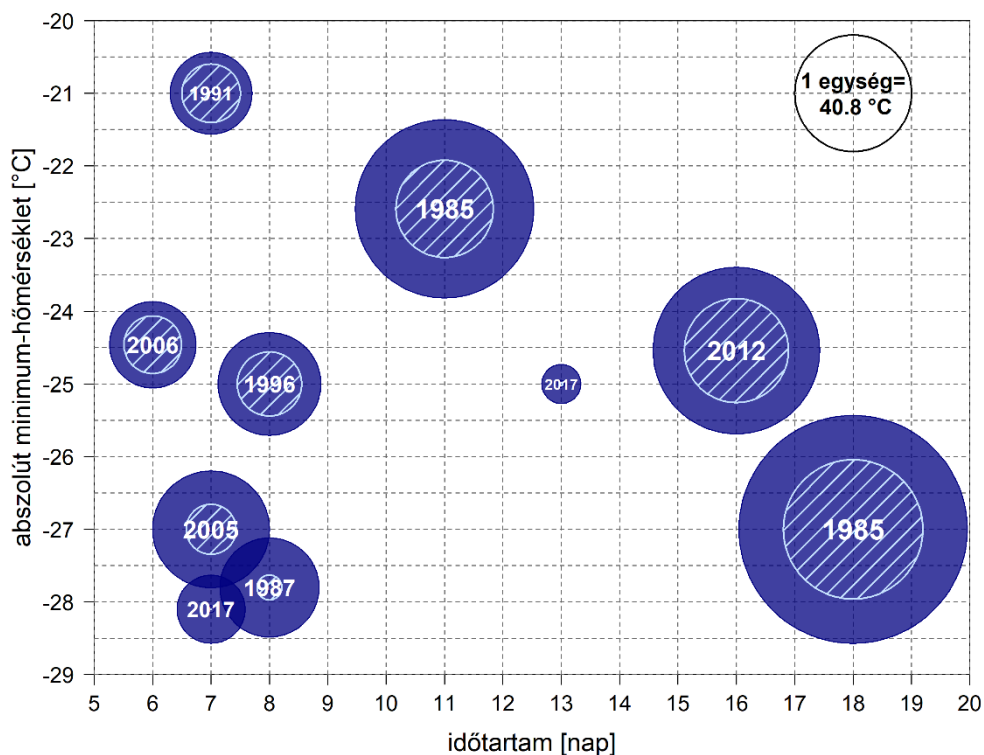
Végül az 5. táblázat negyedik oszlopában a leghidegebb napok, és az ezek során mért minimum-hőmérséklet tartománya olvasható. Ahogyan azt a szakirodalmi áttekintésben (2.3. alfejezet) is hangsúlyoztam, a téli, zord időszakok esetén a mezo- és mikroskálájú folyamatok, valamint a kiterjedt hófelszín – a fizikai tulajdonságai miatt – nagy mértékben hozzájárul a felszínközeli légréteg hűléséhez. Például 1987-ben átlagosan 20–40 cm-es hótakaró borította az országot, ennek hűtő hatása érvényesült, hiszen a napi hidegrekord is megdőlt január 31-én Szeged (külterületén), illetve Füged mérőállomásokon [11 – Időjárás rekordok, met.hu]. Ekkor a hótakaró hűtő hatásán kívül, a felettünk lévő nagyon hideg (850 hPa-os nyomási szint hőmérséklete -25 °C fok alatt) és száraz légtömeg is hozzájárult az extrém alacsony minimumok beálltához. Ugyanis a száraz légtömeg még jobban le tud hűlni a vízcseppek hiánya miatt, amik viszont erős üvegházhatású gázok, azaz a felszín felől érkező sugárzás nagyobb részét elnyelik, illetve visszasugározzák, ezáltal melegítik a felszínközeli légréteget. Azonban ebben az esetben a hó jó szigetelő tulajdonságának és a levegő szárazságának hűtő hatása összeadódott, így alakult ki a 29. ábrán látható minimum-hőmérséklet területi eloszlása a Kárpát-medencében 1987. január 31-én.



29. ábra: A színezés a 2 m-es hőmérsékleti értékeket, az izovonalak pedig az átlagos tengerszint feletti légnyomást fejezik ki 1987. január 31-ére, 00 UTC-re vonatkozóan az ERA5 reanalízis adatok alapján.

Emellett megemlíthető a 2017. január második felében lezajlott hideghullám is, ami esetén szintén jól kirajzolódik a hófelszín hatása. Ekkor szélsőségesen alakult a legalacsonyabb éjszakai hőmérséklet tartománya, az ország nagy részén -15 °C -nál enyhébb volt az éjjel, míg a hóborította területeken -20 °C körüli értéket is mértek. Ugyanakkor a vizsgált hideghullámok közül olyan esetben is dőlt meg országos napi hidegrekord, amikor csak foltokban észleltek hótakarót. Például 2017. január 8-án a derült, szélcsendes éjszaka, és a nagyon száraz légtömeg okozta Tésán az új napi minimum-hőmérséklet rekord [11 – Időjárási rekordok, met.hu] beálltát.

A hideghullámok összehasonlításakor további fontos szempont lehet az időtartam, az intenzitás – amit a kumulatív index ad meg –, illetve a területi kiterjedés. Ezen adatokat a 30. ábrán mutatom be. Az x-tengelyen a hideghullámok hosszát ábrázoltam napokban megadva. Az y-tengelyről a szintén az Országos Meteorológiai Szolgálat napijelentéseiből származó, egyes zord időszakok alatt mért legalacsonyabb éjszakai hőmérsékletet lehet leolvasni. Végül a körök nagysága pedig a 3. fejezetben található (2) egyenlet alapján számolt kumulatív index értékét tükrözi az átlagos indexértékhez képest (30. ábra jobb felső sarka), amely az egységnyi kör sugarát adja meg. Ennek köszönhetően vizuálisan is összehasonlítható az 5. táblázatba foglalt tíz hideghullám egymáshoz viszonyított intenzitása. Továbbá a körökben lévő csíkozott kitöltés azon napok arányát adja meg az adott, extrém hideg időszak teljes hosszához képest, amikor minimum az ország 75%-án egyidejűleg legalább már 3 napja zord napot ($T_{\min} \leq -10\text{ °C}$) regisztráltak.

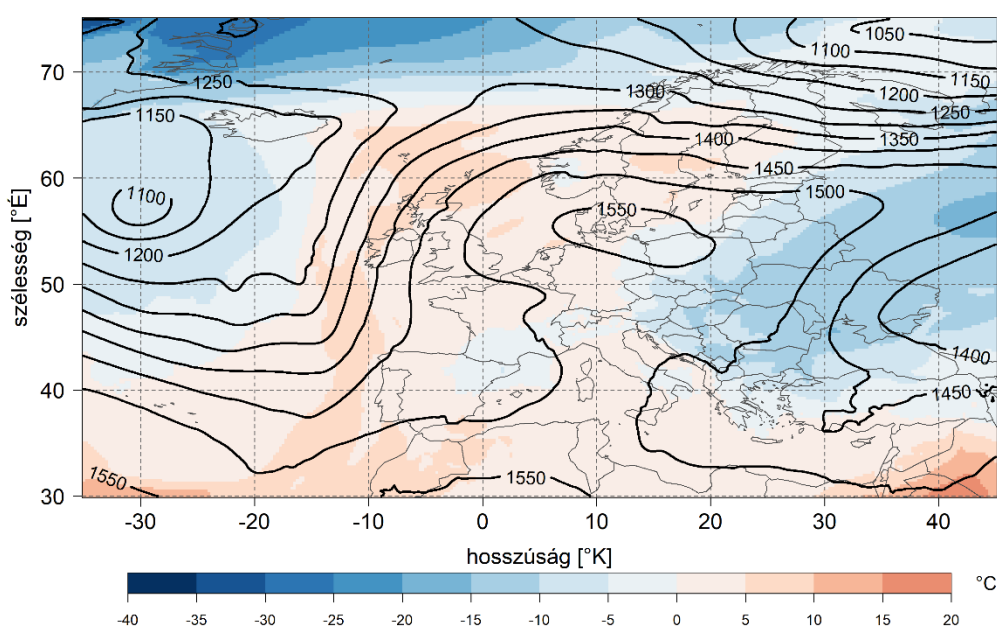


30. ábra: Az 1971 és 2020 között Magyarországon regisztrált tíz jelentős hideghullám teljes időtartama és az az alatt mért abszolút minimum-hőmérséklet, illetve kumulatív indexe (kör nagysága). Az egység sugarú kör a kumulatív index átlagos értékének (40,8 °C) felel meg. A csíkozott kitöltés a minimum 75%-os területi lefedettségű legalább 3 napon tartó zord napok arányát mutatja meg a teljes időszakhoz viszonyítva.

A 30. ábrát megvizsgálva rögtön szembevető az 1985-ös tél. Ekkor két nagyon zord időszak is előfordult. Az első, januári eset volt a legintenzívebb és a leghosszabb ideig (18 napig) tartó hideghullám az általam vizsgált 50 évben. A második, februári zord időszak már kevésbé volt olyan fagyos, mint az első hideghullám, viszont, ha a kumulatív index értékeit tekintjük, úgy a második legintenzívebbnek mondható. Azon kívül, hogy ezen események alatt országos hótakaró volt, a légköri mintázat kialakításában a NAO negatív fázisa is közreműködhetett. A 2.3. alfejezetben kifejtettem, hogy a NAO adott fázisa esetén milyen jellemző szinoptikai helyzet, áramlási mintázat alakul ki Európában. Az 1984/1985 telén kívül még az 1987-es hideghullám, valamint az 1996/1997-es tél idején is a NAO elég erős, míg a 2006-os zord időszakban valamivel gyengébb negatív fázisát regisztrálták [12 – Climate Prediction Center, NOAA].

Az 1985 telén kívül 2017-ben is két zord esemény fordult elő. Ekkor mindkét hideghullám januárban alakult ki. E két időszakot csak egy hullámzó frontrendszer szakította meg, ami az ország nagyobb területén havazást is okozott (Hoffmann et al., 2017). Ez év januárja kiemelkedően hideg volt, amit az 1901 óta vezetett januári középhőmérsékletek sorrendjében elfoglalt 10. helye is alátámaszt. A sorrendben, a 9. helyen 1985 januárja áll.

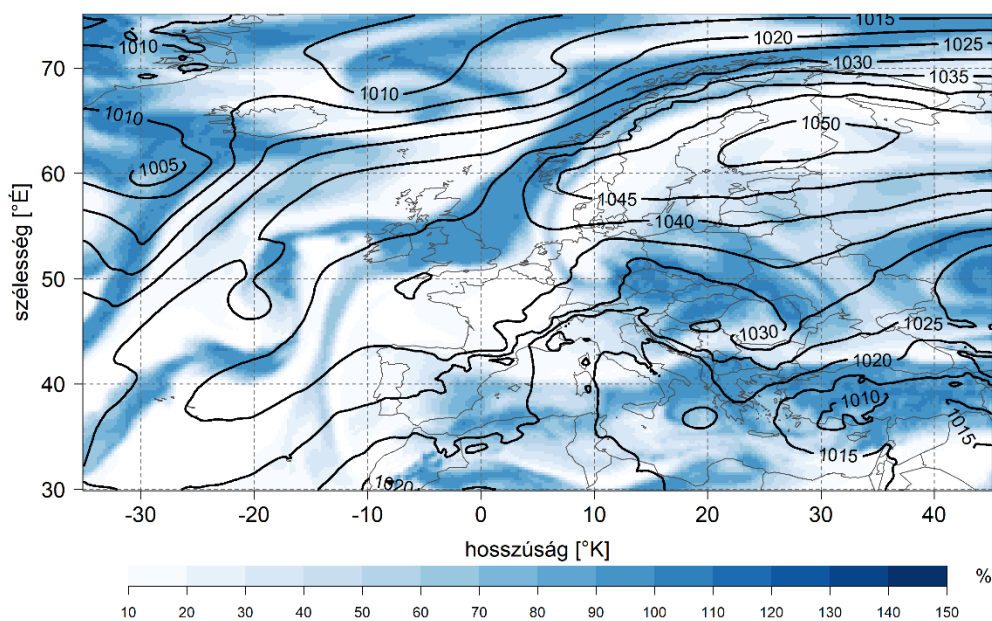
Tehát ki lehet jelenteni, hogy a 21. században az eddigi leghidegebb januárt élhettük át 2017-ben (Hoffmann *et al.*, 2017). Ugyanakkor a sor élén a múlt század első felében regisztráltak állnak. A 2.3. alfejezetben már leírtam, hogy ezen két hideghullámos időszak szintén blokkoló anticiklon hatására alakult ki (Demirtaş, 2022). A második 2017-es zord időszak esetén egy viszonylag ritka, de jól ismert szinoptikai jelenség is létrejött, az úgynevezett omega-blocking. A szerkezete, struktúrája jól kirajzolódik a légkör magasabb szintjein (31. és F7. ábra). A 31. ábrán látható, hogy Európa felett egy magasnyomás, míg az Atlanti-óceán, illetve a Fekete-tenger térségében ciklonok alakították az időjárást. E képződmény keleti oldalán kelet, északkelet felől hideg, sarkvidéki eredetű légtömeg advektálódott a Kárpát-medencébe.



31. ábra: A 850 hPa-os nyomási szint hőmérséklete (színezés) és geopotenciális magassága (izovonalak) 2017. január 26-án, 00 UTC-kor.

Érdeemes megvizsgálni a legnagyobb területi kiterjedésű napok arányát is. Összehasonlítva a hóhullámokat bemutató 24. ábrával észrevehető, hogy több zord időszak esetén terjedt ki hosszabb ideig az erős fagy az ország nagy területére, mint a hóhullámoknál az extrém meleg. Ennek magyarázata lehet akár a levegő tulajdonsága, illetve hazánk medence jellege is. Ugyanis az igen fagyos levegő, mivel hidegebb, ezáltal sűrűbb és nehezebb, ezért a légkör alacsonyabb rétegeire korlátozódik. Emellett Magyarország magashegységekkel van körbevéve, és nagy részét az Alföld teszi ki, ahol könnyen meg tud rekedni a sarkvidéki hideg légtömeg. Továbbá, ha az országos átlagos havi középhőmérsékletek menetét tekintjük, akkor abból kirajzolódik, hogy tavasszal lassabb ütemben történik a felmelegedés, mint őszele a lehűlés [13 – Magyarország hőmérsékleti viszonyai, met.hu], s a légkör ezen

tulajdonságát kisebb skálára is le lehet vetíteni. Tehát ha nagytérségi jelenség okozta lehűlésről van szó, az gyorsabban tud nagy területre kiterjedni, mint nyáron a hőség, viszont jóval hosszabb ideig tartó folyamatra van szükség a nehezebb, hideg légtömeg „kisöpréséhez” a Kárpát-medencéből, mint nyáron a hőség megszüntetéséhez (egy gyorsan érkező hidegfront által). A téli esetek közül az 1985 januári, az 1991-es és 1996/1997-es, illetve a 2006-os és 2012-es hideghullámok esetében volt arányaiban nagy a területi kiterjedés. Az első és utolsó eseten kívül a többi három zord időszak közös tulajdonsága, hogy mindegyik egy ciklon hátoldali áramlási rendszerében a Kárpát-medencébe érkező hideg légtömeg nyugalomba jutásával kezdődött. Ezt követően a Kelet-európai-síkság fölött lévő anticiklon vált uralkodóvá. Ugyanakkor az összes nagy területre kiterjedő hideghullám esetén meghatározó volt az An helyzet. Ezen időszakok közül a 2012-es hideghullám emelhető ki az akkor ideérkező magas nedvességtartalmú légtömegek miatt. Elsőként egy mediterrán ciklon nedvesebb léghullámai érték el a térséget, majd átmenetileg nyugodt volt a légkör. Ezt követően, február 9–10-én észak, északkelet felől egy hidegcsepp haladt át felettünk. Látható a 32. ábrán, hogy ekkor a Kárpát-medence fölé magas nedvességtartalmú levegő advektálódott, viszont a hidegcseppekre jellemzően az izobárokban nem jelent meg az alacsony nyomás a felszínen, csak kisebb zavart keltett, így hullám képződött rajtuk. E képződmény labilizálta felettünk a légréteget – és a mediterrán ciklonon kívül – havazást is okozott. Ezt követően elkezdődött a tőlünk északra lévő anticiklon leépülése és ezáltal az enyhülés folyamata.



32. ábra: A 700 hPa-os nyomási szint relatív nedvessége (színezés) és a tengerszintre átszámított légnyomás értékek izovonalai 2012. február 9-én, 12 UTC-kor.

5. Összefoglalás

Diplomamunkámban a Kárpát-medencét érintő anticiklonális hatások alatt kialakult szélsőségesen meleg, illetve hideg időszakokkal foglalkoztam. A tudományos és hétköznapi életben is egyre több figyelem hárul az extrém hőmérsékletű eseményekre, hiszen ezek épp olyan pusztítóak lehetnek, és megterhelőek az emberek és élővilág számára is, mint például a hurrikánokhoz, viharciklonokhoz kapcsolódó jelenségek. Vizsgálataimban az 1971 és 2020 közti időszakból származó magyarországi megfigyelési adatain alapuló HuClim adatbázissal [1 – OMSZ Adattár], az ERA5 reanalízisekkel (*Hersbach et al., 2023a; Hersbach et al., 2023b*), valamint a napijelentésekből származó információkkal [3 – Napijelentés kiadványok, met.hu] dolgoztam. Kutatásom során a hazánkra vonatkozó éghajlati indexek időbeli fennállását, területi kiterjedését, évtizedes, havi eloszlásait vizsgáltam. Ezt követően a legintenzívebb, leghosszabb hideg- és hőhullámokat szinoptikai helyzetüket tekintve elemeztem, összehasonlítottam, valamint intenzitásukat a kumulatív index segítségével becsültem meg.

Az extrém meleg időszakokat vizsgálva egy gyorsan növekvő tendencia mutatkozik meg, ami a 2000-es évektől kezdődően még inkább fokozódott. Ezt nemcsak a másodfokú (*14. ábra*), illetve a harmadfokú (*F2. ábra*) hőhullámos vagy hőség- (*16. ábra*), valamint forró (*F4. ábra*) napokra vonatkozó kutatás támasztja alá, hanem az is, hogy a tíz legintenzívebb hőhullám közül nyolc eset az ezredforduló után következett be. A növekvő trend ellenére az ország leginkább hőség sújtotta régiói nem változtak (*13. ábra*), csak a hőhullámos napok száma sokszorozódott meg. Ha az évtizedes eloszlásokat (*15., F1., F3. és F5. ábra*) nézzük, akkor megmutatkozik a szélsőségesen meleg időszakok kitolódása, amit az utolsó évtizedekben az augusztusi, illetve a hőségnapoknál a márciusi, valamint szeptemberi esetszámok megjelenése és növekedése jelez. Ezen kívül a nyáron belüli eltolódás is detektálható, mivel a júliusi események száma elkezdett csökkenni, míg a 2010-es évekre az augusztusiaké jócskán megnövekedett. Tehát az év legmelegebb időszaka egyre későbbre, nyár végére, ősz elejére kezd tolni. Ugyanakkor a jövőre vonatkozó kutatások alapján várhatóan még inkább növekedni fog a hőhullámos időszakok száma (*Guerreiro et al., 2018; Pongrácz et al., 2013*), ami az átmeneti évszakok rövidülését vetíti előre (*Dian et al., 2021*). A melegedő tendenciát szintén alátámasztja a vizsgálataim során kiválasztott tíz hőhullámos időszak felében tapasztalt melegrekordok megdőlése is. Ezen extrém meleg események leginkább a Magyarországtól keletre lévő, illetve a Kárpát-medence felett elhelyezkedő anticiklonok idején alakultak ki. Előbbi szinoptikai helyzetben (Ae) dél felől

szárazabb és melegebb kontinentális eredetű légtömeg advektálódik hazánk térségébe, míg utóbbi esetében a melegmagvú magasnyomású képződmény legforróbb területe található felettünk. Tehát összességében a dél, délnyugat felől érkező meleg, afrikai, szubtrópusi, száraz léghullámok okoznak szélsőségesen meleg időszakokat a Kárpát-medencében, amelyek intenzitását a csapadékszegény időjárás még inkább fokozza a csapadék hűtő hatásának, valamint a felszín párologtató képességének hiányában. Fontos megjegyezni, hogy egy hosszú, de kevésbé intenzív, illetve egy nagyon meleg, de rövidebb ideig tartó hőhullám is hasonló mértékben megterhelő lehet az emberek, élőlények számára, ezért az összehasonlítás során e tényezőket is megvizsgáltam (24. ábra).

A zord időszakok elemzésénél változatosabb kép rajzolódott ki, mint a hőhullámoknál. A zord és fagyos napok előfordulásában kevésbé jelenik meg erős csökkenő tendencia (17., 19. és 20. ábra), ami azt tükrözi, hogy a globális felmelegedés ellenére is kialakulhatnak kiemelkedően hideg évek. Ezt alátámasztja az a tény is, hogy a tíz jelentős hideghullám felét regisztrálták csak az ezredforduló előtti időszakból. Ugyanakkor a melegedő trend újabb bizonyítéka lehet az is, hogy a tíz zord esemény közül csak kettő esetben dőlt meg napi hidegrekord – hiszen a legtöbb rekord az 1900-as évek első felében született –, illetve, hogy a legintenzívebb hideghullámok többsége a múlt században fordult elő (30. ábra). Tehát a fagyos időszakok számában megjelenő csökkenő trend 1901-től kezdődően jobban megmutatkozik, mint az általam vizsgált 50 év alatt. Várhatóan a következő évtizedekben még kevesebbszer fognak előfordulni ilyen zord időszakok (Dian et al., 2021). Ugyanakkor a nagytérségi helyzet átalakulása ellenére lehetnek még a jövőben is fagyosabb események a Kárpát-medencében, mivel a felszínközeli légréteg hűlésében a mezo- és mikroskálájú folyamatok és a domborzat is szerepet játszik. Emellett hazánkban a hidegre érzékeny régiók területi eloszlása nem változott – hasonlóan a hőség sújtotta területekhez –, egy nyugatról kelet felé tartó, illetve a magassággal történő hűlés rajzolódik ki (18. ábra). Ezen kívül a tíz kiemelkedő hideghullám szinoptikai viszonyait megvizsgálva elmondható, hogy az Észak-, Északkelet-Európa felett elhelyezkedő anticiklonok idején északias áramlással, illetve ciklon hátoldalán a Kárpát-medencébe érkező hideg, sarkvidéki légtömeg nyugalomba jutása eredményezhet leginkább hideghullámokat. Továbbá a száraz levegő, valamint a kiterjedt hófelszín nagyban hozzájárulhat a levegő hűléséhez és ezáltal a zord időszak intenzitásához, amit például a nagyskálájú folyamatok, mint a NAO is befolyásolni tud. Ezen kívül a hideghullámok idején a nagyobb területi kiterjedés (30. ábra) is tovább tarthat, mint a hőhullámok esetén.

6. Köszönetnyilvánítás

Elsőként köszönetet szeretnék mondani témavezetőimnek Dr. Pongrácz Ritának és Soósné Dr. Dezső Zsuzsannának, hogy időt nem sajnálva munkámat végig figyelemmel kísérték. Köszönöm a segítségüket, szakmai tanácsaikat, melyekkel még tovább gyarapították meteorológiai tudásomat, és hozzájárultak, hogy e diplomamunka elkészülhessen.

Nagyon hálás vagyok családomnak, szüleimnek, nővéremnek, barátomnak, hogy az egyetem öt éve alatt mindvégig mellettem voltak, erőt adtak szeretetükkel, támogattak. Nélkülük nem készülhetett volna el ez a dolgozat.

Köszönöm az Országos Meteorológiai Szolgálatnak, hogy méréseit, megfigyeléseit rendelkezésemre bocsátotta, illetve Szabó Péternek, aki ezen adatokat NetCDF formátumba átalakította és segítségemre nyújtotta.

A diplomamunka keretében végzett kutatásokat az alábbi 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).

7. Irodalomjegyzék

- Beillouin, D., Schauburger, B., Bastos, A., Ciais, P., Makowski, D.*, 2020: Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1810), 20190510. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0510>
- Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Soci, C., Villaume, S., Bidlot, J. R., Haimberger, L., Woollen, J., Buontempo, C., Thépaut, J. N.*, 2021: The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(741), 4186-4227. <https://doi.org/10.1002/qj.4174>
- Boussousou, N., Boussousou, M., Merész, G., Rakovics, M., Entz, L., Nemes, A.*, 2019: Complex effects of atmospheric parameters on acute cardiovascular diseases and major cardiovascular risk factors: data from the CardiometeorologySM study. *Scientific Reports*, 9(1), 1-9.
- Boussousou, N.*, 2019: Morbidity of acute cardiovascular diseases in the light of various atmospheric parameters. Doctoral dissertation, Semmelweis University, Budapest
- Cattiaux, J., Vautard, R., Cassou, C., Yiou, P., Masson-Delmotte, V., Codron, F.*, 2010: Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate. *Geophysical Research Letters*, 37(20). <https://doi.org/10.1029/2010GL044613>
- 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>
- Colucci, S.J.*, 2015: Anticyclones. In: North, G. R., Pyle, J. A., Zhang, F. (Eds.). (2015). *Encyclopedia of atmospheric sciences* (Vol. 1). Elsevier, pp. 273–279.
- Demirtaş, M.*, 2017: The large-scale environment of the European 2012 high-impact cold wave: prolonged upstream and downstream atmospheric blocking. *Weather*, 72(10), 297-301. <https://doi.org/10.1002/wea.3020>
- Demirtaş, M.*, 2018: The high-impact 2007 hot summer over Turkey: atmospheric-blocking and heat-wave episodes. *Meteorological Applications*, 25(3), 406-413. <https://doi.org/10.1002/met.1708>
- Demirtaş, M.*, 2022: The anomalously cold January 2017 in the south-eastern Europe in a warming climate. *International Journal of Climatology*, 42(11), 6018-6026. <https://doi.org/10.1002/joc.7574>
- Dian, Cs., Pongrácz, R., Bartholy, J., Talamon, A.*, 2021: The impact of global climate change on the characteristics of seasons in the Carpathian Basin. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU21-1409). [10.5194/egusphere-egu21-1409](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-1409)
- Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Vidale, P. L., Lüthi, D., Schär, C.*, 2007: Soil moisture–atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. *Journal of Climate*, 20(20), 5081-5099. <https://doi.org/10.1175/JCLI4288.1>

- Founda, D., Katavoutas, G., Pierros, F., Mihalopoulos, N.*, 2022: The extreme heat wave of summer 2021 in Athens (Greece): cumulative heat and exposure to heat stress. *Sustainability*, 14(13), 7766. <https://doi.org/10.3390/su14137766>
- Garmsiri Mahvar, A., Azizi, G.*, 2020: An Analysis of Subtropical High Pressure Systems (Azores and Hawaiian). *Physical Geography Research Quarterly*, 52(3), 409–428. [10.22059/JPHGR.2020.283794.1007400](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2020.283794.1007400)
- Gáspár, N., Wantuch, F.*, 2016: Nagy térségű légnomási mező és a magyarországi repülőterek időjárásának kapcsolata. *Repüléstudományi Közlemények*, 28(1), 73–80.
- Guerreiro, S. B., Dawson, R. J., Kilsby, C., Lewis, E., Ford, A.*, 2018: Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034009. [10.1088/1748-9326/aaaad3](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3)
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ..., Thépaut, J. N.*, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N.*, 2023: ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47)
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N.*, 2023: ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), [10.24381/cds.bd0915c6](https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6)
- Hess, P., Brezowsky, H.*, 1952: Katalog der Grosswetterlagen Europas. Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone 33, 39 p.
- Hoffmann, L., Kircsi, A., Lakatos, M.*, 2017: A leghidegebb január 1985 óta. OMSZ, Tanulmányok, Budapest. https://www.met.hu/omsz/OMSZ_hirek/index.php?id=1778&hir=A_leghidegebb_január_1985_óta
- Holden, W. N., Marshall, S. J.*, 2018: Climate change and typhoons in the Philippines: Extreme weather events in the anthropocene. In: Integrating disaster science and management [P. Samui, D. Kim, C. Ghosh (eds.)], 407–421. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812056-9.00024-5>
- Horváth, Á., Breuer, H.*, 2022: A 2022-es rendkívüli szárazság fizikai-meteorológiai háttere. OMSZ, Tanulmányok, Budapest. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekesssegek_tanulmanyok/index.php?id=3200&hir=A_2022-es_rendkivuli_szarazsag_fizikai-meteorologiai_hattere
- Horváth, Á., Simon, A.*, 2020: Az áramszolgáltatást veszélyeztető szélsőséges időjárási helyzetek II. rész: Viharciklonok. *Légekör*, 68, 4–9.

- Iván, M., Dezső, Zs., Bartholy, J., Pongrácz, R.*, 2018: A blocking jelenség szinoptikus klimatológiai vizsgálata az Atlanti-európai régióban. In: Aktuális környezeti problémák az időjárás és az éghajlat összefüggésében. Egyetemi Meteorológiai Füzetek, 30, 76-83. <https://doi.org/10.31852/EMF.30.2018.076.083>
- Izsák, B., Szentimrey, T., Lakatos, M., Pongrácz, R.*, 2022: Extreme Months: Multidimensional Studies in the Carpathian Basin. *Atmosphere*, 13(11), 1908. <https://doi.org/10.3390/atmos13111908>
- Kautz, L. A., Martius, O., Pfahl, S., Pinto, J. G., Ramos, A. M., Sousa, P. M., Woollings, T.*, 2022: Atmospheric blocking and weather extremes over the Euro-Atlantic sector—a review. *Weather and Climate Dynamics*, 3(1), 305-336. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-305-2022>
- Klein Tank, A. M. G., Zwiers, F. W., Zhang X.*, 2009: Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. WMO-TD No 1500, World Meteorological Organization.
- Kovács, T., Lakatos, M.*, 2015: Hőhullámok nyara. OMSZ, Tanulmányok, Budapest. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekesssegek_tanulmanyok/index.php?id=1398&hir=Hohullamok_nyara
- Kron, W., Löw, P., Kundzewicz, Z. W.*, 2019: Changes in risk of extreme weather events in Europe. *Environmental Science & Policy*, 100, 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.06.007>
- Lhotka, O., Kyselý, J., Farda, A.*, 2018: Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties. *Theoretical and applied climatology*, 131(3-4), 1043-1054. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2031-3>
- Liu, X., He, B., Guo, L., Huang, L., Chen, D.*, 2020: Similarities and differences in the mechanisms causing the European summer heatwaves in 2003, 2010, and 2018. *Earth's Future*, 8(4), e2019EF001386. <https://doi.org/10.1029/2019EF001386>
- Matishov, G. G., Dzhenyuk, S. L., Moiseev, D. V., Zhichkin, A. P.*, 2014: Pronounced anomalies of air, water, ice conditions in the Barents and Kara Seas, and the Sea of Azov. *Oceanologia*, 56(3), 445-460. <https://doi.org/10.5697/oc.56-3.445>
- Mika, J., Károssy, C., Lakatos, L.*, 2021: Variations in the Peczely macro-synoptic types (1881–2020) with attention to weather extremes in the Pannonian Basin. *Atmosphere*, 12(8), 1071. <https://doi.org/10.3390/atmos12081071>
- Mote, T. L.*, 2008: On the role of snow cover in depressing air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(7). <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1823.1>
- Mráz, A.*, 2021: A Kárpát-medencét érintő anticiklonok szinoptikus-klimatológiai elemzése. Szakdolgozat, ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék, Budapest (témavezető: Soósné Dr. Dezső Zsuzsanna), 50 p.
- Peczely, Gy.*, 1957: Áramlási helyzetek Magyarországon különböző makroszinoptikus helyzetekben. *Időjárás*, 61, 408.

- Pfahl, S.*, 2014: Characterising the relationship between weather extremes in Europe and synoptic circulation features. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(6), 1461-1475. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1461-2014>
- Planchon, O., Quénot, H., Irimia, L., Patriche, C.*, 2015: European cold wave during February 2012 and impacts in wine growing regions of Moldavia (Romania). *Theoretical and Applied Climatology*, 120(3), 469-478. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1191-2>
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Bartha, E.B.*, 2013: Analysis of projected changes in the occurrence of heat waves in Hungary. *Advances in Geosciences*, 35, 115-122, <https://doi.org/10.5194/adgeo-35-115-2013>
- Roxburgh, N., Guan, D., Shin, K. J., Rand, W., Managi, S., Lovelace, R., Meng, J.*, 2019: Characterising climate change discourse on social media during extreme weather events. *Global Environmental Change*, 54, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.11.004>
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, B. Zhou*, 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. 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., 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, B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766. [10.1017/9781009157896.013](https://doi.org/10.1017/9781009157896.013).
- Smiley, K. T., Noy, I., Wehner, M. F., Frame, D., Sampson, C. C., Wing, O. E.*, 2022: Social inequalities in climate change-attributed impacts of Hurricane Harvey. *Nature communications*, 13(1), 3418. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31056-2>
- Sousa, P. M., Trigo, R. M., Barriopedro, D., Soares, P. M., Santos, J. A.*, 2018: European temperature responses to blocking and ridge regional patterns. *Climate Dynamics*, 50(1), 457-477. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3620-2>
- Spinoni, J., Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z., Szalai, S., Vogt, J., Antofie, T.*, 2015: Heat and cold waves trends in the Carpathian Region from 1961 to 2010. *International Journal of Climatology*, 35(14), 4197-4209. <https://doi.org/10.1002/joc.4279>
- Stefanon, M., D'Andrea, F., Drobinski, P.*, 2012: Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014023. doi: [10.1088/1748-9326/7/1/014023](https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014023)
- Szabóné André, K., Bartholy, J., Pongrácz, R.*, 2017: Hideg légpárna helyzet vizsgálata esettanulmány alapján. *Légekör*, 62, 183-184.
- Szentes O.*, 2022: Szárazság Magyarországon 2022-ben és a múltban. OMSZ, Tanulmányok, Budapest. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3198&hir=Szarazsag_Magyarorszagon_2022-ben_es_a_multban

- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007: Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis), Proceedings of the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology, Budapest, Hungary, 2004, COST Action 719, COST Office, 2007, pp. 17-27.*
- Szentimrey, T., Bihari, Z., Lakatos, M., 2010: Quality control procedures in MISH-MASH systems. In 10th EMS Annual Meeting (pp. EMS2010-437).*
- Szentimrey, T., 2011: Manual of homogenization software MASHv3. 03. Hungarian Meteorological Service, 66.*
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2014: Manual of interpolation software MISHv1. 03. Hungarian Meteorological Service, 60.*
- Torma, C., Soósné Dezső, Z., 2019: Európai példák inverziós helyzetekre: 2015. december. Légkör, 64(3), 100-104.*
- van der Velde, M., Tubiello, F. N., Vrieling, A., Bouraoui, F., 2012: Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data. Climatic change, 113, 751-765.*
- Vaszkó, A. I., 2016: A Péczy-féle makroszinoptikus helyzetek objektív osztályozásának alapjai. Szakdolgozat. ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék, Budapest (témavezetők: Mészáros Róbert, Leelőssy Ádám), 37 p.*
- Vautard, R., Yiou, P., D'andrea, F., De Noblet, N., Viovy, N., Cassou, C., Polcher, J., Ciais, P., Kageyama, M., Fan, Y., 2007: Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit. Geophysical Research Letters, 34(7). <https://doi.org/10.1029/2006GL028001>*
- Vida, V. I., 2009: Éghajlati extrém indexek várható tendenciája a Kárpát-medence térségére regionális klímascenáriók felhasználásával. Diplomamunka, ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék, Budapest (témavezetők: Dr. Pongrácz Rita, Dr. habil. Bartholy Judit), 56 p.*
- Voeikov, A. I., 1884: Klimaty zemnogo shara, v osobennosti Rossii. SPb: Kartogr. Ilina.*
- Weilhammer, V., Schmid, J., Mittermeier, I., Schreiber, F., Jiang, L., Pastuhovic, V., Herr, C., Heinze, S., 2021: Extreme weather events in Europe and their health consequences—A systematic review. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 233, 113688. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113688>*
- Woollings, T., Barriopedro, D., Methven, J., Son, S. W., Martius, O., Harvey, B., Sillmann, J., Lupo, A. R., Seneviratne, S., 2018: Blocking and its response to climate change. Current climate change reports, 4(3), 287-300 <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0108-z>*
- Xu, P., Wang, L., Liu, Y., Chen, W., Huang, P., 2020: The record-breaking heat wave of June 2019 in Central Europe. Atmospheric Science Letters, 21(4), e964. <https://doi.org/10.1002/asl.964>*
- Zhang, C., 2005: Madden–Julian oscillation. Reviews of Geophysics, 43(2). <https://doi.org/10.1029/2004RG000158>*
- Zhang, C., 2013: Madden–Julian oscillation: Bridging weather and climate. Bulletin of the American Meteorological Society, 94(12), 1849-1870. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00026.1>*

Zhang, T., 2005: Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Reviews of Geophysics*, 43(4). <https://doi.org/10.1029/2004RG000157>

Zschenderlein, P., Pfahl, S., Wernli, H., Fink, A. H., 2020: A Lagrangian analysis of upper-tropospheric anticyclones associated with heat waves in Europe. *Weather and Climate Dynamics*, 1(1), 191-206. <https://doi.org/10.5194/wcd-1-191-2020>

Zsilinszki, A., Dezső, Z., Bartholy, J., Pongrácz, R., 2014: Synoptic climatological analysis of the 2012-2013 winter. In: Sustainable regional development: Landscape, social, economic and educational challenges - Project closing conference, 2014.11.20., Eger, Hungary. 6 p.

Internetes hivatkozások

[1 – OMSZ Adattár]

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

[2 – Éghajlati szélsőségek vizsgálata, met.hu]

https://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/klimamodellezes/eghajlati_szelsosegek/

[3 – Napijelentés kiadványok, met.hu]

https://www.met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes_2005-2019/

[4 – Climate Prediction Center, NWS, NOAA]

<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml>

[5 – Napi éghajlati rácsponti adatok leírása]

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

[6 – ECMWF, ERA5 reanalízis]

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>

[7 – Hidegindexek, met.hu]

https://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_hazai_valtozasok/hidegindexek/

[8 – CDO, Max Planck Intézet]

<https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/>

[9 – Globálsugárzás, napfénytartam, met.hu]

https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/sugarzas/

[10 – A legmelegebb nyár 1901 óta, met.hu]

https://www.met.hu/omsz/OMSZ_hirek/index.php?id=3208&hir=A_legmelegebb_nyar_1901_ota_%E2%80%93_elozetes_elemzes

[11 – Időjárási rekordok, met.hu]

https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/rekordok/#homerseklet

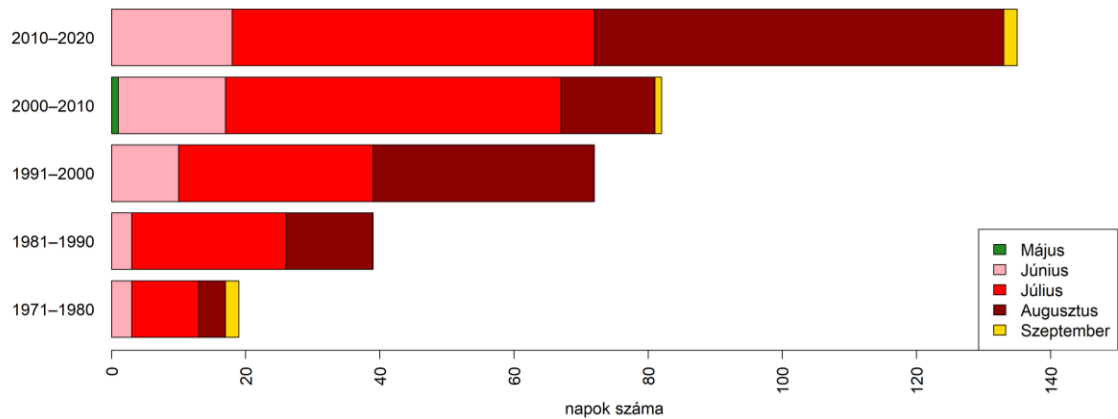
[12 – Climate Prediction Center, NOAA]

https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/month_nao_index.shtml

[13 – Magyarország hőmérsékleti viszonyai, met.hu]

https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/homerseklet/

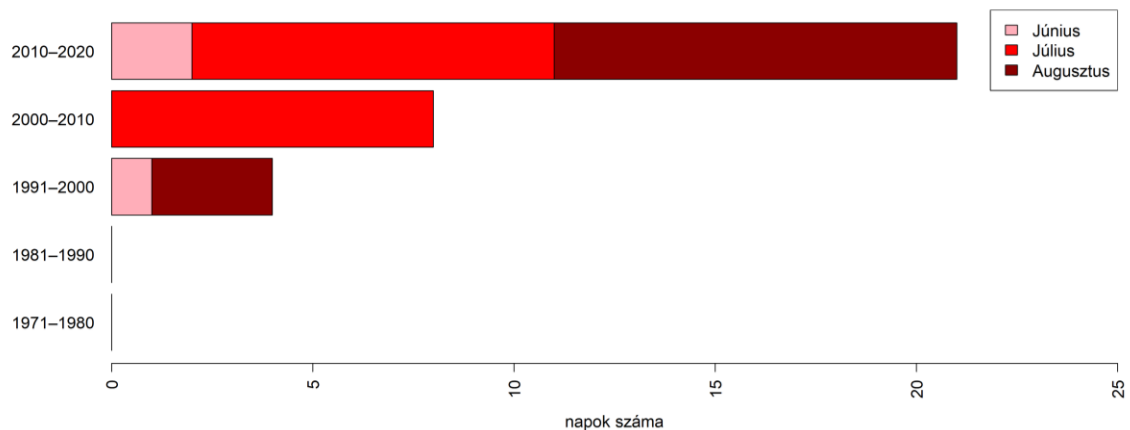
8. Függelék



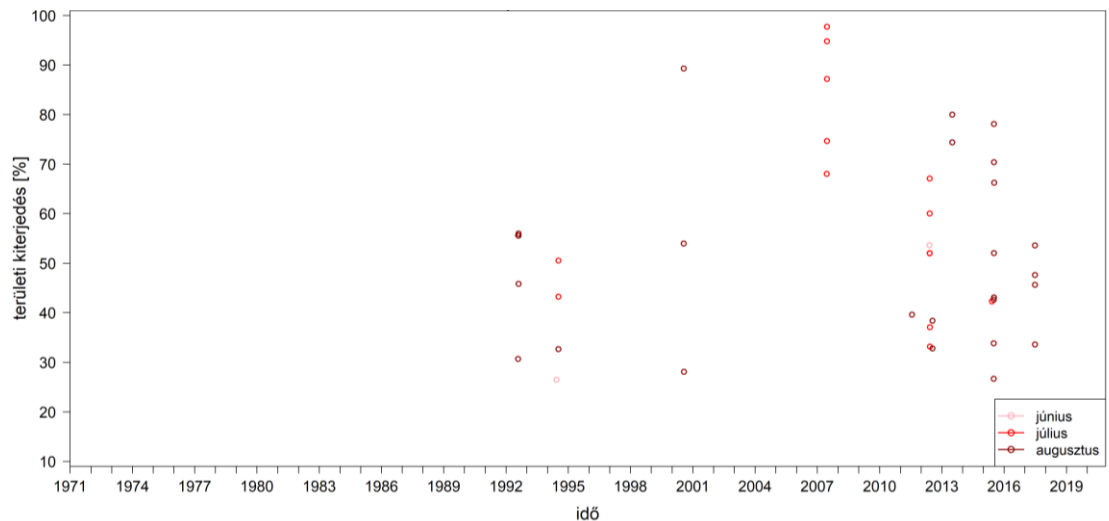
F1. ábra: Az ország területének minimum 25%-át érintő legalább 5 napig tartó hőségnapok számának évtizedenkénti eloszlása havi bontásban.



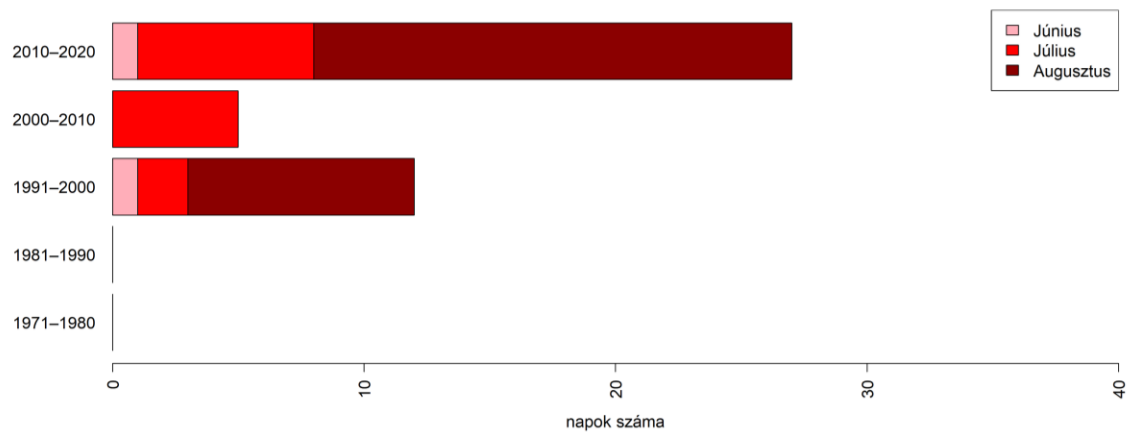
F2. ábra: Magyarország területének nem kevesebb mint 25%-án harmadfokú hóhullámos napok előfordulása 1971 és 2020 között.



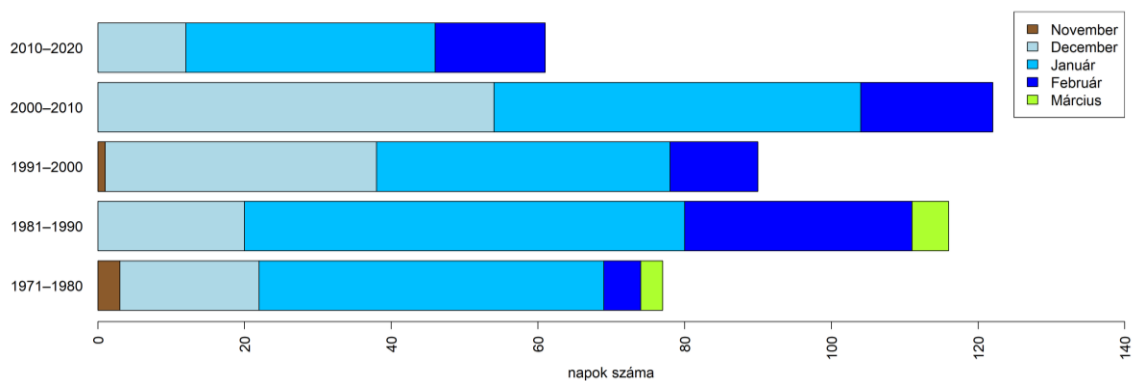
F3. ábra: Magyarország területének minimum 25%-át érintő harmadfokú hóhullámos napok évtizedes eloszlása 1971 és 2020 között havi bontásban.



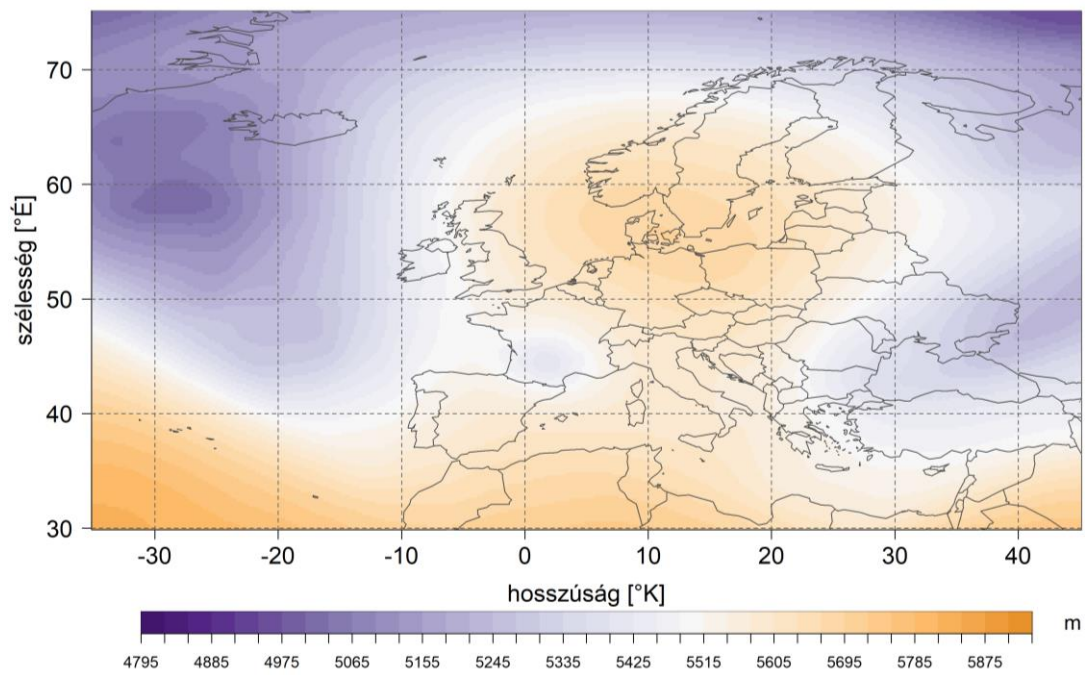
F4. ábra: Legalább 3 napon keresztül tartó forró napok előfordulása, mely az ország területének minimum 25%-án teljesült 1971 és 2020 között.



F5. ábra: Magyarország területének minimum 25%-án és legalább 3 napon keresztül tartó forró napok évtizedes eloszlása 1971 és 2020 között.



F6. ábra: Magyarország területének minimum 25%-án és legalább 5 napon keresztül tartó téli napok évtizedes eloszlása 1971 és 2020 között havi bontásban.



F7. ábra: Az 500 hPa-os nyomási szint geopotenciális magassága 2017. január 26-án, 12 UTC-kor.