

Globális változások tükröződése a Kárpát-medence éghajlatában; távkapcsolatok elemzése és várható tendenciák

Készítette: Topál Dániel I. éves földtudományi BSc szakos hallgató
Eötvös Loránd Tudományegyetem
2014

Témavezetők:

Dr. Gál Tamás Mátyás tanszékvezető-helyettes egyetemi adjunktus;
Dr. Unger János tanszékvezető egyetemi tanár
SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék

XVII. Országos Tudományos Diákköri Konferencia 2015

Tartalomjegyzék

Függelék 1	2
Összefoglalás.....	3
1. Bevezetés.....	4
1.1.Az általános légkörzés	4
1.2.Földrajzi elhelyezkedés és éghajlati tényezők	4
1.3.A periodikusan változó globális éghajlati tényezők	6
1.4.Távkapcsolatok elemzése - szakirodalmi áttekintés	8
1.5.Célkitűzések.....	9
2. Adatok és módszerek	10
2.1. A felhasznált adatok forrása	10
2.2. Alkalmazott eljárások.....	10
3. Eredmények.....	11
3.1. A légköri cirkulációs jelenségek és a hőmérséklet közötti kapcsolat	11
3.2.A légköri cirkulációs jelenségek és a csapadék közötti kapcsolat	13
3.3.A felszínre beérkező napsugárzás energiatartalma, és a cirkulációs rendszerek kapcsolata	14
3.4.Az 500 hPa nyomásszinten mért szélirányok elemzése az 1979-2014 időszakban	14
3.4.1. A kategóriaváltozók és távkapcsolatok.....	14
3.4.2. Az ÉNy-i és DNy-i szélirányok által uralt hónapok összehasonlítása.....	16
3.4.3. A zonális és meridionális áramlatok gyakorisága térségünkben	16
4. Diskusszió.....	18
4.1.A hőmérséklet és a cirkulációs rendszerek kapcsolata	18
4.2.A csapadék és a cirkulációs rendszerek közötti kapcsolat	18
4.3.A naptevékenység és a Kárpát-medence időjárásának lehetséges összefüggése	19
4.4.Az elmúlt évtizedekben tapasztalt éghajlati változások a Kárpát-medencében a távkapcsolatok és klímamodellek tükrében	19
4.4.1. A szezonális aszimmetria.....	20
4.4.2. Az átalakuló cirkulációs rendszer	23
4.4.3. A változások a Kárpát-medence tekintetében	25
5. Következtetések és kitekintés.....	27
Függelék 2	28
Idézett irodalom.....	33

Függelék 1.

A témavezetőtől kapott feladat

A kutatás során egyrészt a Kárpát-medence hőmérsékleti, csapadék anomáliái és az Észak-Atlanti térség tengerszinti légnyomásának periodikus megváltozásán alapuló cirkulációs rendszerek (Észak- (NAO), Kelet-Atlanti (EA) és Arktikus Oszcilláció) közötti statisztikai összefüggések, azaz időjárási távkapcsolatok megállapítását kaptam feladatul, illetve az utóbbi 50 év éghajlati ingadozásainak leírását. A két részfeladat nagyban kapcsolódik egymáshoz, hiszen a nagytérségi összefüggések segítenek megérteni a légkörben fellépő változásokat.

A kutatás egyik alappillérenek a nemrégiben publikált WACC (Warm Arctic Cold Continents) modell szolgált, amelyben a felmelegedő sarkvidék Közép-Európa téli időjárására gyakorolt hatásának leírása szerepel. A modell szerint a felmelegedő sarkvidék hatására negatívabb AO/NAO indexek az északi félgömb középső szélességein hőmérsékleti értékeit tekintve nagy variabilitást mutató telek előfordulását valószínűsítik. Ennek kárpát-medencei vonatkozásának igazolására megvizsgáltam a rendelkezésemre álló idősor alapján a szezonális hőmérsékleti trendek alakulását a térségben.

A téli időjárási helyzetek vizsgálatához szintén elvégeztem az 500 hPa nyomásszintről vett szélirány adatok elemzését, amik alapján a térségünket jellemző zonális (kiegyenlítettebb időjárás) és meridionális (változékonyabb időjárás) áramlási mezők gyakoriságáról kaptam tisztább képet. Elképzelésem szerint a WACC modell által leírt jelenség, miszerint a felmelegedő sarkvidék hidegbetörésekkel tarkított teleket okozhat Közép-Európában, számszerűsíthető a meridionális áramlatok gyakoriságvizsgálatával. A meridionális áramlatok ugyanis a kontinentálisabb típusú időjárási helyzeteket eredményezhetik, melyek utóbbi években tapasztalt előfordulásának számszerűsítésére kiszámoltam az ún. kontinentalitás indexet (a nyári és a téli szezonális hőmérsékleti anomáliák különbsége). Ennek segítségével az utóbbi évtizedek téli időjárásának változásairól tájékozódhattam.

A kutatás során a 2. fejezetben leírt adatok és módszerek alapján vizsgáltam.

Összefoglalás

A kutatás során az OMSZ által vezetett Carpatclim projekt 1961-2010 évekre vonatkozó hőmérséklet, csapadék és globálsugárzás adatbázisát felhasználva a Kárpát-medence területére (é.sz. 44°É – 50°É; k.h. 15°K – k.h. 26°K) végeztem klimatológiai vizsgálatokat.

Az utóbbi évtizedek éghajlati ingadozásainak hátterének feltárása érdekében statisztikai összefüggést kerestem a Kárpát-medence hőmérsékleti, csapadék anomáliái és a globálsugárzás, illetve az Észak- (NAO) és Kelet-atlanti (EA), valamint Arktikus Oszcilláció (AO) között. A téli félév egyes hónapjainak hőmérsékleti anomáliái és a NAO, AO indexek között figyelemreméltóan szignifikáns korreláció mutatkozott. Ezen szezonális aszimmetriát mind a csapadék, mind pedig a globálsugárzás tekintetében szintén érvényesnek találtam.

A Kárpát-medence téli hőmérsékleti anomáliái, illetve az őszi végén, télen lehullott csapadék mennyisége összefüggésbe hozható az atlanti térség légnyomásának periodikus megváltozásával, az Észak- Atlanti, illetve Arktikus Oszcillációs indexekkel, amelyekre az északi jégsapka utóbbi években tapasztalható drasztikus csökkenése is erős befolyással van. A nagytérségi összefüggéseken keresztül a téli időjárási helyzetek előrejelzéséről, illetve értelmezéséről kaphatunk tisztább képet.

Kíváncsi voltam továbbá a globális klímaváltozás Kárpát-medencei vonatkozásaira is, ezért megvizsgáltam, hogy milyen tendenciák azonosíthatók az utóbbi négy-öt évtized éghajlati ingadozásaiban. Fontos megjegyezni, hogy a hőmérsékleti trendek szezonális aszimmetriája olyan jelenség, amely nem illeszkedik bele a hagyományos klímaváltozási elképzelésekbe. Ezért további elemzéseimben két egymásnak ellentmondó globális klímaváltozási scenáriót hasonlítottam össze a feltárt összefüggések tükrében.

Az ENSZ kormányközi testülete, az IPCC által 2013-ban kiadott jelentésben körvonalazott elképzelés és egy másik, szintén nemzetközi tudományos folyóiratokban publikált modell – a WACC-modell (Warm Arctic Cold Continents) – predikcióit vetítettem le a Kárpát-medence viszonyaira, arra a kérdésre keresve a választ, hogy melyik modell előrejelzései a valószínűbbek az éghajlat jövőbeni alakulását illetően. Úgy tűnik, hogy az egyre melegedő nyarak mellett kisebb mértékben változó, de hőmérsékleti értékeit tekintve nagy variabilitást mutató telek jellemzik a Kárpát-medence éghajlatát, s ez nagymértékben egyezik azzal, amit a WACC modell alapján a Közép-Európai térségben várhatunk. Az eredmények összességében a kontinentális hatások befolyásának erősödését támasztják alá.

1. Bevezetés

1.1. Az általános légkörzés

Az általános légkörzés a Föld egészére kiterjedő, a földfelszín különböző szélességeinek eltérő felmelegedéséből következő légáramlatok által létrehozott rendszer. Az Egyenlítő közelében felmelegedő légtömegek a troposzféra felső határáig felszállnak, majd horizontális áramlasként folytatják útjukat mind az Északi-, mind pedig a Déli-sark felé. A Föld forgásából származó eltérítő Coriolis-erő hatásaként azonban a 30. szélességeken már zonális (NY-K) irányúak a légmozgások. Az Egyenlítőtől való távolodás következtében a légtömeg hőmérséklete fokozatosan csökken, sűrűsége megnő, így a levegő egy része visszasüllyed a felszínre, kialakítva a szubtrópusi magasnyomású övet. A Földön a nyomáseloszlás természetesen nem egyenletes, így a magasnyomású öv nem az egész Földet körbeérő, hanem különálló, tartós zónákból áll, nagy „akciócentrumok” formájában.

A felszíni levegő két irányban folytatja útját; egy része visszatér az Egyenlítőhöz, kialakítva a Hadley-cellát, másrészt pedig a sarkok felé áramlik, és a Coriolis-erő eltérítése következtében ismét zonális irányú lesz a sarkkörökön. Ezek a szubtrópusi nyugati szelek összetalálkoznak a sarkok felől érkező hideg légtömegekkel, aminek eredményeképpen frontális feláramlás történik. Így alakulnak ki a sarkköri alacsonynyomású övek, melyek szintúgy nagy „akciócentrumok”. A feláramlott levegő kisebb része kialakítja a Ferrel cellát, a nagyobbik rész azonban a sarkok felé áramolva a poláris örvény, illetve leszállván a sarki magasnyomású öv kialakulását eredményezi. A légkörzés teljessé egészítése a Poláris cella révén valósul meg (Georgieva et al. 2007).

A Hadley és a Poláris cella az eltérő szélességek eltérő léghőmérséklete miatt állandó jelenség, míg a Ferrel cella az előbbi cellák, illetve a középső szélességek alacsony- és magasnyomású öveinek függvényében alakul. A Ferrel cella tehát nem zárt, a benne fújó szelek iránya nagyban függ a különböző időjárási helyzetektől. A felsőlégköri áramlatok alapvetően zonális iránya legyengülhet, meridionálisba is fordulhat.

1.2. Földrajzi elhelyezkedés és éghajlati tényezők

Az Alpok és a Kárpátok, illetve délnyugatról a Dinári-hegység koszorúja által határolt Kárpát-medence sajátos éghajlattal rendelkezik. Köztudott, hogy medencénk három éghajlati tartomány, az óceáni, kontinentális és mediterrán légtömegek találkozhelye és ezek egyenlőtlenül érvényesülő hatása nagy változékonyságot okoz.

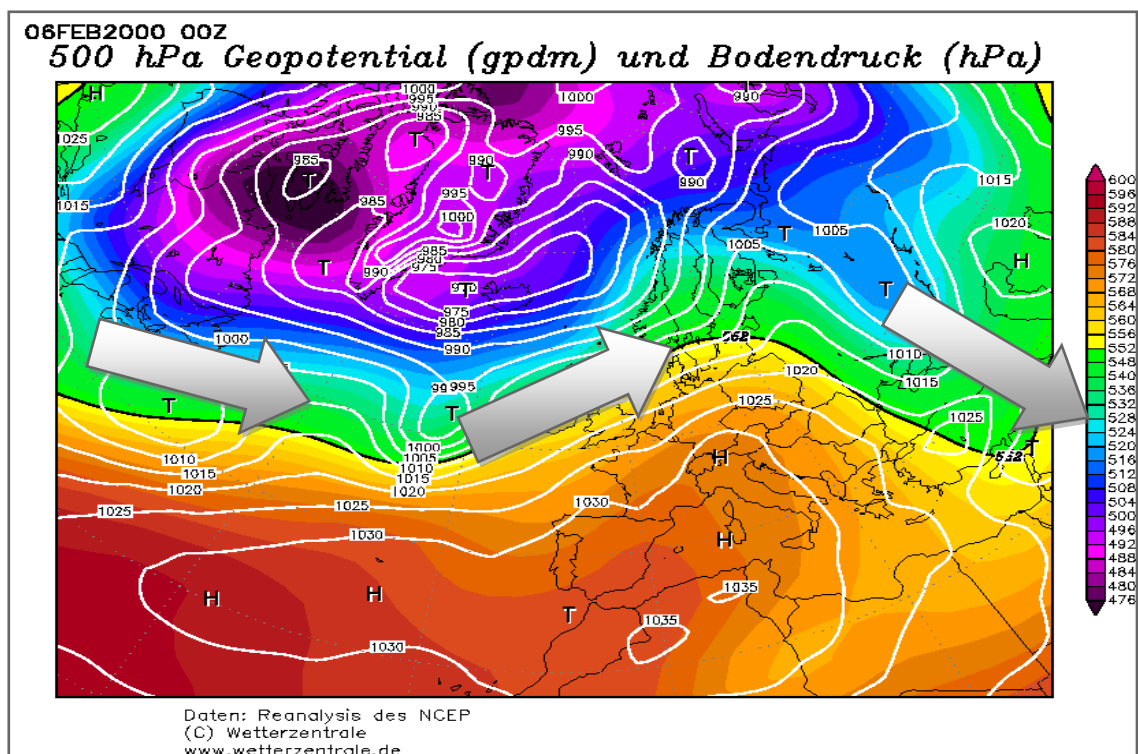
A változékony időjárás a Kárpát-medencében a négy nagy, eltérő nyomással jellemezhető „akciócentrum” összjátékának köszönhető. Az Izland közeli alacsony nyomású területről (izlandi ciklon) télen enyhe, nyáron hűvös és páradús légtömegek érkezhettek. Télen a nagyon hideg és száraz levegő a szibériai magas nyomású központból származik. Az Azori-szigetek környéki magas légnyomású hely (azori anticiklon) felől tengeri eredetű szubtrópusi levegő érkezik hazánkba, ami egész évben csapadékos időjárást okoz. A Perzsa-öböl menti alacsony légnyomású területről pedig (főként nyáron) meleg, száraz levegő érkezik a Kárpát-medencébe (Bartholy és Weidinger 1997).

Az, hogy a Kárpát-medencében egy adott időben melyik akciócentrum érezteti hatását, jelentősen összefügg az áramlási mezők alakulásával. Az áramlási mezőket a légnyomáskülönbségből adódó légmozgások, a szelek határozzák meg, köztük kiemelt szerepet játszik a futóáramlás (jet stream). Ez a szélrendszer 7-15 kilométeres magasságban, a troposzféra és a sztratoszféra határán, Ny-K irányban állandóan, nagy sebességgel fújó szeleket jelent. Egyes esetekben azonban, a megszokott NY-K irány helyett behullámozhatnak, így É-D, illetve D-É irányúvá fordulhatnak.

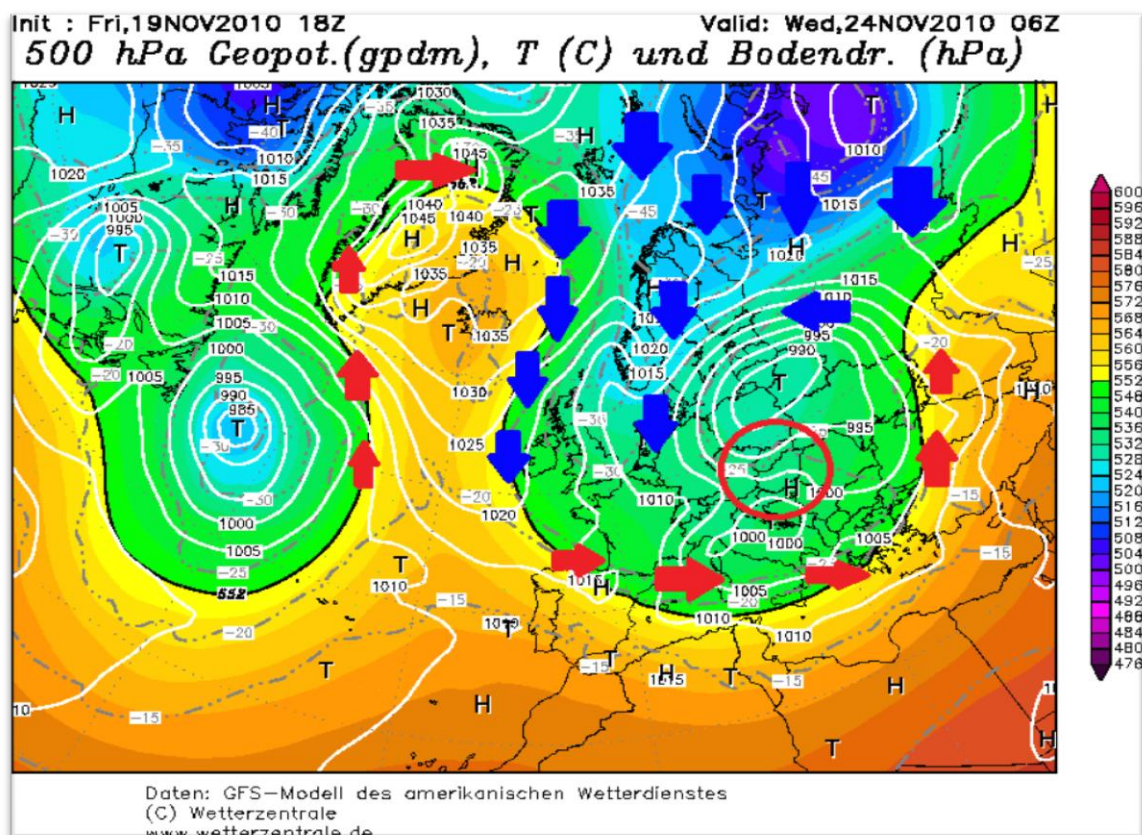
Alapvetően kétfajta áramlási kép alakulhat ki Európa felett: zonális és meridionális. A zonális áramlás esetén NY-K irányú szelek dominálnak, mely térségünkben az óceáni behatásnak kedvez. Ilyen esetben a nyugat felől érkező légáramlatok páradús óceáni levegőt szállítanak, ezzel télen enyhébb, nyáron hűvösebb csapadékosabb, jellegében egy kiegyenlített időjárást okozva a Kárpát-medencében (1. ábra).

Meridionális áramlási mező esetén É-D vagy D-É irányú légmozgások jellemzik térségünket. Ekkor az északról beáramló hidegebb, vagy a délről érkező meleg levegő határozza meg az időjárás alakulását, ezáltal vagy az átlagnál hidegebb, vagy annál melegebb, tehát egy jellegében erősen ingadozó szélsőségesebb időjárást okozva (2. ábra).

A kontinentális hatások erősödése – tehát a meridionális áramlási képek – a futóáramlás megváltozásához, valamint az egyes akciócentrumok légnyomásviszonyainak jellegzetes megváltozásához köthető.



1. ábra. Tipikus zonális áramlási mező
Forrás: www.wetterzentrale.de



2. ábra. Meridionális áramlási mező
Forrás: www.wetterzentrale.de

1.3.A periodikusan változó globális éghajlati tényezők

Az éghajlat alakításában – a földrajzi elhelyezkedés mellett – szerepet játszanak olyan globális tényezők is, melyek éves-évtizedes vagy nagyobb léptékű skálán mérhető ciklusos változásokat mutatnak, és hatásaik nagy területre, egész kontinensekre is kiterjedhetnek.

Így például az óceánok felszínközeli vizeinek periodikus hőmérsékletváltozása, a felette elhelyezkedő légtömegek hőmérsékletére és nyomására gyakorolt hatása miatt befolyással lehet a Kárpát-medence éghajlatának alakulására. Az Észak-Atlanti Oszcilláció (továbbiakban NAO = North Atlantic Oscillation) az Észak-atlanti tengeráramlás környékén fellépő jelenség, mely a térség tengerszinti légnyomásának ingadozása, az izlandi alacsony és az azori-szigeteki magas nyomás különbsége. Értékét a NAO indexszel szokás megadni, mely két olyan kutatóállomás tengerszinten mért légnyomáskülönbsége, melyek közel vannak az alacsony és a magas légnyomású képződmények központjaihoz (Marshall et al. 2001).

Szintén az Észak-Atlanti térséghez köthető a Kelet-Atlanti Mintázat (East Atlantic pattern = EA). Az EA a NAO-hoz hasonló felépítésű, annak légnyomásközpontjaitól DK-i irányban elfordult, észak-déli légnyomás anomália eloszláshoz köthető jelenség. A központok eltérése okozza az alapvető különbséget az EA és a NAO között, ugyanis az EA dominánsabb déli szubtrópusi légnyomásközponttal rendelkezik. Az EA index számítása a NAO indexéhez hasonló.

Az Arktikus Oszcillációhoz (továbbiakban AO = Arctic Oscillation) köthető a sarkok környékén kialakuló áramlás, az ún. poláris örvény erőssége. A poláris örvény (jelen esetben az északi féltekére koncentrálna) az Északi-sarkvidék felett fennálló tartós, körkörös áramlás, mely a poláris anticiklon hideg levegőjét a sarkok környékén tartja bezárva. Ugyancsak pozitív, illetve negatív értékekkel jellemezhetjük.

A pozitív NAO index az átlagnál erősebb azori anticiklont és az átlagnál alacsonyabb nyomású izlandi ciklont jelent. Az EA pozitív fázisában ugyancsak nagy a légnyomáskülönbség az északi és déli nyomáscentrumok között. A nyomáskülönbség miatt több nagyobb téli vihar alakul ki az Atlanti-óceánon, északabbra tolódó pályával. Ilyenkor a Ny-K irányú szelek megerősödnek (zonális áramlási képek lesznek a jellemzőek), melynek hatásaként télen, Európában és a Kárpát-medencében is pozitív hőmérsékleti, ugyanakkor negatív csapadék anomáliák jellemzőek. Amikor az AO index pozitív, a sarki felszíni légnyomás alacsony, ami elősegíti a középső szélességeken futó jet stream erőteljes és állandó NY-K irányú áramlását. A poláris örvény a talajszinttől egészen a sztratoszféra alsó szintjéig megerősödik. Ez szintén a zonalitást erősíti és a hideg sarki levegőt a sarkok környékén

bezárva tartja. Tehát a NAO és az AO index pozitív értékei egyaránt az óceáni behatás erősödését valószínűsítik a Kárpát-medence környékén (1. ábra).

Negatív NAO/EA illetve AO index esetén a mérsékelt övben megszokott cirkulációs kép jócskán felborul. A negatív NAO index gyenge szubtrópusi anticiklont és izlandi ciklont jelez. A nyomáskülönbség kicsi, ezért a Ny-K irányú légáramlatok legyengülnek, Közép-Európa térségében az óceán mérséklő hatása gyengül, s inkább a mediterrán területekre szállítódik nedves levegő. Ennek érdekes következménye lehet a pozitív csapadék anomália. Negatív AO index a poláris örvény gyengülésére utal, melynek következménye lehet, hogy a jellemző körkörös áramlatok helyett a jet stream „behullámzik” és É-D, D-É irányú légmozgások veszik át az uralmat. Ez esetben tehát az északias vagy a délies légmozgások jellemzik térségünket, így az északról beáramló hidegebb, vagy a délről érkező meleg levegő határozza meg az időjárás alakulását. Ez jellegében erősen ingadozó, szélsőségesebb, kontinentálisabb, részben pedig mediterrán hatású időjárást okozhat (2. ábra).

1.4. Távkapcsolatok elemzése – szakirodalmi áttekintés

A Kárpát-medence időjárásának elemei és az észak-atlanti térség légnyomásviszonyai összefüggésének feltárása még gyermekcipőben jár, azonban már több publikáció is született a távkapcsolatok leírása és számszerűsítése céljából. Magyarországon Babolcsai (2014) volt az első, aki a szeptemberi észak-atlanti légnyomás-anomália iránya és a rá következő december Kárpát-medence környéki átlaghőmérséklete közötti távkapcsolatot felismerte és nyilvánosságra hozta. Munkájában kiemelte, hogy „e cikk szinte járatlan utakon jár”, mellyel a téma újszerűségére és fontosságára egyaránt felhívta a figyelmet.

Babolcsai korábbi munkája során definiált már egy új indexet, ami a DAI (Decemberi Anomália Index) nevet kapta (Babolcsai 2013). Ennek pontosítására született előbb említett cikkének lényege, hogy az észak-atlanti térség szeptemberi légnyomás anomáliája az estek nagy többségében néhány ezer kilométerrel keletebbre mintegy „visszatér” decemberben, jelentősen meghatározva ezzel az általános cirkulációs képet térségünkben is. Ezáltal a szeptemberi légnyomás eloszlás nagy biztonsággal előrevetítheti a soron következő december hónap hőmérsékleti anomáliájának irányát.

Azonban nemcsak hazánkban, hanem Szerbiában és Romániában is végeztek hasonló vizsgálatokat. A NAO és AO indexek, valamint Szerbia téli csapadéértékei között Gordana et al. (2008) mutattak ki szignifikáns összefüggést az 1961-2006 időszakra nézve. A Románia területén tapasztalt téli extrém meleg hőmérsékleti értékek és a cirkulációs rendszerek közötti korrelációról Dumitrescu et al. (2014) számoltak be. Munkájukban az EA, illetve az ún.

Blocking Index szerepét hangsúlyozták az 1961-2010 téli (december-február) időszak extrém magas hőmérsékleti anomáliák gyakoriságának előfordulásában.

A nagytérségi cirkulációk hátterében Fredrik és Henrik (2002) szerint a naptevékenység is szerepet játszhat. Vizsgálataik szerint a Napszél által az ionoszférában keltett elektromágneses „zavar” tovaterjed a légkör alsóbb rétegeibe, következésképpen hatást gyakorolhat a nagytérségi légnyomáseloszlásra az Észak-Atlanti térségben. Hasonló vizsgálatokat végeztek Dániában is (Thejll et al. 2003), azonban a Nap-klíma összefüggés már régóta vitatott téma a tudományban. Talán a legfontosabb aktív kutató Michael Lockwood, aki számos cikket írt a naptevékenység és az időjárás kapcsolatáról. Kutatásai szerint alacsony naptevékenység idején a hidegebb telek gyakoribbá válhatnak az észak-atlanti régióban (Lockwood et al. 2010).

Továbbá néhány más tanulmány is (Soon 2005; Mayewski et al. 2005; Ruzmaikin és Feynman 2002) is szignifikáns kapcsolatot feltételez a naptevékenység és az Arktikus, illetve az Észak-Atlanti Oszcilláció között.

1.5.Célkitűzések

A távkapcsolatok vizsgálata nemcsak térségünk rövidtávú időjárás-előrejelzésében nyújthat nagy segítséget, hanem a klímaváltozás minket érintő vonatkozásait is pontosabban tanulmányozhatjuk. Ezért vizsgálataimban (a 2. fejezetben részletezett adatbázis és módszerek alapján) a Kárpát-medence egyes időjárási elemei és a fent bemutatott nagytérségi cirkulációs rendszerek között kerestem statisztikai kapcsolatot, majd pedig a feltárt összefüggések tükrében gondoltam át térségünk klímaváltozással kapcsolatos hipotéziseit.

A Kárpát-medence téli (december – január – február) hőmérsékleti, csapadék és globálsugárzás értékei, illetve a NAO, EA, AO indexek közötti korrelációs kapcsolatok vizsgálatán túl elvégeztem az 500 hPa nyomásszinten mért szélirányok utóbbi 35 évre vonatkozó elemzését a Kárpát-medence térségére, mely alapján az áramlási mezők gyakoriságáról és változásairól kaptam tisztább képet.

Ahogy a fentebb bemutatott szakirodalmi áttekintés is mutatja, vizsgálataim nem előzmény nélküliek. Dolgozatomban éppen ezekre alapozva próbáltam mélyebb betekintést nyerni a feltételezett kapcsolatrendszerbe.

2. Adatok és módszerek

2.1. A felhasznált adatok forrása

A meteorológiai témájú kutatások pontos és helytálló adatbázisokat igényelnek, amelyekben meg kell hagyni igencsak hiány van nemcsak Magyarországon, de szinte a világban. Nyilvánvaló, hogy egy meteorológiai adatbázis létrehozása és tudományosan érvényes (valid) adatokkal való folyamatos bővítése nem mindennapi nehézségű feladat, hiszen a légkör, mint kaotikus rendszer állapotát leírni, vagy változásának okait megismerni igen bonyolult dolog. Problémát jelent továbbá, hogy nemcsak pontos, hanem megfelelően hosszú idősorokra van szükség a megbízható következtetések levonásához.

A kutatásom során felhasznált Carpatclim adatbázis az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) vezetésével végrehatott projekt eredménye, mely kellően pontos és hiteles adatokat nyújthatott munkámhoz. Az 1961-2010 közötti fél évszázadot felölelő adatbázis ugyan nem a leghosszabb, Magyarországon fellelhető idősor, azonban különlegessége, hogy csaknem az egész Kárpát-medencét lefedő, 10*10 km-es rácsponti hálózata az é.sz. 44°É – 50°É; k.h. 15°K – 26°K közötti területre terjed ki. Homogenizált (MISH), interpolált (MASH) adatokat tartalmaz, melynek matematikai és szoftveres háttérét az OMSZ fejlesztette ki. Projektem során a rácspontonként számolt havi középhőmérsékleti, csapadék, valamint a globálsugárzás adatokat használtam fel.

Segítségemre volt továbbá az Európai Középtávú Meteorológiai Előrejelző Központ (ECMWF) ERA Interim 1979-2014 időszakot felölelő reanalízis adatbázisa, melyből az 500 hPa nyomásszintről származó szélirány adatokat nyertem. A NAO, EA és AO index adatok az Egyesült Államok Nemzeti Óceonográfiai és Légkörkutató Intézetének (NOAA) szabadon letölthető adatbázisából valók (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>).

2.2. Alkalmazott eljárások

A sokak szerint „normálisnak” vélt és ezért viszonyítási alapként gyakran alkalmazott 1960-90-es időszak helyett a hőmérsékleti és csapadék anomáliák kiszámításának alapjául az általam vizsgált teljes időszak (1961-2010, illetve 1973-2010) átlagértékeit vettem. A hőmérsékleti és csapadék adatok szórásának számításakor az adott rácspont adott hónapbeli átlagértéktől vett átlagos eltérését (Standard Deviation – SD) számítottam ki. Gyakran használtam az adott téli szezon (december–január–február – DJF) hónapjainak átlagértékeit, melyet téli szezonális átlagértéknek nevezem. Ez tehát az egymást követő három téli hónapból számolt átlagértéket illetve anomáliát jelent.

Vizsgálataim során Pearson-féle korrelációs számítást, „t próbát”, illetve regresszió analízist (InStat statisztikai programcsomag: <http://www.graphpad.com/scientific-software/instat/>) használtam a Kárpát-medence időjárási elemei és a nagytérségi cirkulációs rendszerek közötti lehetséges összefüggések felderítése érdekében. Mind a Carpatclim, mind pedig az ERA Interim adatbázisból származó adatokat a GrADS (<http://www.iges.org/grads/grads.html>) program segítségével kezeltem.

Az ún. kontinentalitás index számításához az adott év téli és nyári szezonjának hőmérsékleti anomáliáinak különbségét vettem alapul. Ezzel a módszerrel követhetőnek véltem a Kárpát-medence szempontjából fontos két tényező, az óceáni és a kontinentális hatások gyakoriságának alakulását az elmúlt évtizedekre nézve.

3. Eredmények

3.1. A légköri cirkulációs jelenségek és a hőmérséklet közötti kapcsolat

A kutatás egyik célja volt, hogy megvizsgáljam van-e kapcsolat a NAO, EA és AO indexek, valamint a Kárpát-medence földfelszíni hőmérsékleti értékei között. Mivel a bevezetőben is említett korábbi vizsgálatok arra utalnak, hogy elsősorban a téli-korlatavaszi hónapok (december, január, február, március) mutathatnak szignifikáns összefüggést a cirkulációs rendszerek indexeivel, ezért elemzések során én is erre az időszakra fókuszáltam.

Az elemzésekhez a Carpatclim adatbázisában megtalálható 5897 rácspont december, január, február, március hónapban mért havi átlaghőmérsékleteinek anomáliáit gyűjtöttem ki az 1961-2010-es időszakból. Az 50 év minden egyes hónapjára vonatkozóan kiszámoltam a teljes területre vonatkoztatható átlagos hőmérsékleti anomáliát (5897 rácspont adatából) majd ezen értékek és a légköri cirkulációs jelenségek indexei között korrelációt számítottam. (Az anomáliák alapjául az 1961-2010 időszak átlagai szolgáltak.) A kapott összefüggések alapján a következő főbb megállapítások tehetők (bővebben ld. 2. Függelék 1. táblázat):

- A fél évszázadot felölelő időszak december hónapjainak hőmérsékleti anomáliáiban szignifikáns kapcsolat mutatható ki mind a NAO, mind pedig az AO indexek havi átlagos értékeivel. A kapott korrelációs koefficiensek: $r=0,4348$; $p=0,0016$ a NAO, valamint $r=0,2073$; $p=0,1486$ az AO esetében. Az EA indexet illetően ebben a hónapban nem mutatkozott szignifikáns kapcsolat.
- Január hónapban kaptam a legjelentősebb összefüggést a NAO és az AO tekintetében. A NAO esetében a korrelációs koefficiens $r=0,6479$; $p<0,0001$, az AO-t illetően pedig $r=0,5113$; $p=0,0001$ adódott. Az EA index januárban $r=0,482$ $p=0,0004$ szinten korrelál a hőmérsékleti anomáliákkal, ami szintén erősen szignifikáns.
- Február hónapban tapasztalható a legerősebb korreláció az EA index és a hőmérséklet alakulása között. A korrelációs koefficiens $r=0,6088$; $p=0,0001$, ami ugyancsak szignifikáns kapcsolatot jelent. Látható, hogy az EA esetében télen csak január-február hónapban áll fent szignifikáns pozitív korreláció. (Megjegyzem: ezen index júliusban is korrelál a hőmérséklettel, ám vizsgálataim során a téli negyedévre koncentrálok.) Ami a NAO és AO indexeket illeti, szintén szignifikáns, ám kevésbé erős korreláció mutatkozott. A NAO esetében $r=0,2625$; $p=0,0655$; az AO-t illetően pedig $r=0,3056$; $p=0,0309$ adódott.

- A március tekintetében csak az AO korrelál a hőmérséklettel szignifikáns mértékben ($r=0,4113$; $p=0,0028$).

Kiszámoltam továbbá az adatsorom összes rácspontjára vonatkozó adott hónapbeli minimum hőmérsékleti értékeket, majd a téli minimumhőmérsékletek átlagából készített adatsort szintén összevettem a cirkulációs rendszerek indexeivel. A vizsgált időszak januári NAO indexei és a Kárpát-medence átlagos minimumhőmérsékleti értékei között ($r=0,646$; $p<0,0001$) erős szignifikáns korreláció mutatkozott. A DJF havi átlagos anomáliák (téli szezonális átlag) és az ugyanezen időszak átlagos NAO indexe között szintén szignifikáns ($r=0,4839$; $p=0,0004$) összefüggés adódott. Ugyanezen vizsgálat eredményeül az AO index tekintetében január hónapban $r=0,4881$; $p=0,0003$, míg a DJF időszakra nézve $r=0,2876$; $p=0,0451$ korrelációt kaptam.

Az 1961-2010 időszak téli szezonális átlagértékeinek szórása (SD) és a NAO, AO indexek között ugyancsak végeztem statisztikai elemzést. A NAO esetében $r=-0,3794$; $p=0,0072$, az AO esetében pedig $r=-0,3518$; $p=0,152$ szignifikáns negatív korreláció mutatkozott. Ennek nagy szerepe lehet a téli időjárási helyzetek magyarázásában, mint azt majd látni fogjuk.

3.2.A légköri cirkulációs jelenségek és a csapadék közötti kapcsolat

A hőmérséklethez hasonló módon megvizsgáltam a Kárpát-medence 1961-2010 időszakban feljegyzett csapadék értékei és a NAO, EA, AO indexek közötti összefüggést. Minden egyes rácspontra kiszámoltam az 1961-2010-es évek havi csapadékösszegeit, majd pedig a teljes időszak átlagaihoz képesti havi csapadékösszegek anomáliáit összevettem az ugyanazon időszakra vonatkozó cirkulációs indexekkel. A korrelációs számítás alapján a következőket állapítottam meg (bővebben ld. 2. Függelék, 1. táblázat):

- Január ($r=-0,3823$; $p=0,0061$) és február ($r=-0,3696$; $p=0,0082$) hónapokban a csapadékösszeg anomáliái és a NAO index között szignifikáns negatív korreláció adódott. A DJF időszak csapadékösszegeinek átlaga (téli szezonális átlag) alapján pedig $r=-0,4592$; $p=0,0009$ szignifikáns, ugyancsak negatív irányú összefüggést találtam.
- December ($r=-0,4776$; $p=0,0005$), január ($r=-0,478$; $p=0,0004$) és február ($r=-0,5011$; $p=0,0002$) hónapokban a csapadékösszeg anomáliái és az AO index között a NAO-nál erősebb szignifikáns negatív korreláció mutatkozott. A téli szezonális átlagok alapján pedig $r=-0,7009$; $p<0,0001$ erősen szignifikáns negatív korrelációt kaptam.

A vizsgált időszak csapadéértékeinek havi átlagos szórását is kiszámoltam, és szintén összevettem az észak-atlanti térség cirkulációs indexeivel. A korrelációs számítás eredményei a következők:

- Az 1961-2010-es időszakban, a téli szezonális átlag szórásai és a NAO index között $r=-0,4443$; $p=0,0014$, az AO index esetében pedig $r=-0,6627$; $p<0,0001$ szignifikáns negatív korreláció adódott.

Az 1961-2010 közötti DJF időszakban a csapadékösszegek szórása, és a hőmérsékleti értékek szórása között szintén szignifikáns negatív korrelációt találtam: $r=-0,327$; $p=0,001$.

Az EA index és a csapadék között a vizsgált időszakban (DJF) nem találtam szignifikáns kapcsolatot.

3.3.A globálsugárzás, és a cirkulációs rendszerek kapcsolata

A Carpatclim adatbázisban fellelhető globálsugárzási adatok és a NAO, AO indexek közötti összefüggésre is kíváncsi voltam, ezért kiszámoltam az 1961-2010 időszakban a havi átlagos felszínre érkező napsugárzás energiatartalmát majd korrelációs számítást végeztem (bővebben ld. 2. Függelék, 1. táblázat). A globálsugárzás és a NAO, AO indexek között szignifikáns összefüggést – a hőmérséklethez és csapadékhoz hasonlóan – csak a DJF időszakban tapasztaltam. Az EA és a globálsugárzás között nem találtam szignifikáns korrelációt. A felszínre érkező napsugárzás energiatartalmának február hónapbeli értékei és a NAO index között $r=0,3915$; $p=0,0049$, az AO index esetében pedig $r=0,6281$; $p<0,0001$ szignifikáns pozitív korreláció mutatkozott. A globálsugárzás téli szezonális átlagértékei (DJF időszak átlagai) és a NAO index között $r=0,3068$; $p=0,032$, az AO-t illetően pedig $r=0,5333$; $p<0,0001$ korrelációt kaptam.

3.4.Az 500 hPa nyomásszinten mért szélirányok elemzése az 1979-2014 időszakban

3.4.1. A kategóriaváltozók és távkapcsolatok

Ebben az alfejezetben az ERA Interim adatbázisból származó 500 hPa légnyomás szinten mért szélirány elemzését ismertetem. A bevezetésben ismertetett általános légkörzés közel sem olyan állandó, mint azt a hétköznapi ember gondolná. Amint már feljebb is említettem a légkörzésben fellépő ingadozások, változások a légnyomáscentrumok anomáliáit eredményezhetik. A Kárpát-medence térségében általánosan domináló nyugatias, zonális irányú szelek a légkörzésben fellépő változások hatására meridionális irányúvá is átfordulhatnak.

Az ERA Interimből az 1979. január – 2014. március (434 hónap) időszakra nézve az 500 hPa nyomásszintről az é.sz. 44°É – 50°É; k.h. 15°K – 26°K területre lekértem a havi átlagos szélirány „u” (K-Ny) és „v” (É-D) komponensét. A kapott adatpontokra kiszámoltam a $\tan \alpha = \frac{v}{u}$ képlet alapján az adott szélirányt. Ezen érték alapján 4 kategóriát különböztettem meg:

- 1. kategória: DNY-i szél: $\alpha = 0^\circ - 90^\circ$
- 2. kategória: ÉK-i szél: $\alpha = 90^\circ - 180^\circ$
- 3. kategória: DK-i szél: $\alpha = 180^\circ - 270^\circ$
- 4. kategória: ÉNy-i szél: $\alpha = 270^\circ - 360^\circ$

(Természetesen az $\alpha = 90^\circ$ és $\alpha = 270^\circ$ nem értelmezett.)

Ezek után a szélirányt, mint kategóriaváltozót tekintettem, és a fentebb részletezett távkapcsolatokat a szélirányok függvényében is kiszámoltam. Fontos megjegyezni, hogy a számítás elve alapvetően eltér attól, ahogyan a fent tárgyalt esetekben történt a korrelációs együttható megállapítása. Ugyanis itt mindössze annyira voltam kíváncsi, hogy adott szélirányok esetén jellemzőek-e a távkapcsolatok, és ha igen milyen eloszlással jelentkeznek a szélirányok függvényében. Feltételezésem szerint a távkapcsolatok magyarázata nem feltétlenül az adott hónapok szintjén dől el, hanem a cirkulációs rendszer adott állapotához köthető. Itteni vizsgálataimba a naptevékenységet is bevontam, ugyanis a szakirodalom alapján feltételezésem, hogy a cirkulációs rendszer megváltozásához valamilyen módon köthető a naptevékenység. (Ennek igazolása, vagy cáfolása azonban jelen tanulmányban nem szerepel, csak mintegy felvetésként.)

1. kategóriájú (DNY) szélirány által uralt időszakok a hónapok 31,68%-ában, 134 alkalommal fordultak elő. Leggyakrabban az év április (12,69%), május (11,19%), október (9%) és november (13,43%) hónapjaiban volt DNY-i szélirány 1979-2014 között.

A DNY szélirány által uralt időszakokra vonatkozóan elvégzett korrelációs számítás alapján a NAO index és a napfoltok száma között szignifikáns összefüggés mutatkozott ($r=0,3249$; $p=0,0155$). A NAO és a hőmérsékleti anomáliák között ($r=0,38$; $p=0,0036$) valamint az AO és a hőmérsékleti anomáliák között ($r=0,3991$; $p=0,0025$) is szignifikáns pozitív korreláció adódott.

A 2. és 3. kategóriában gyakorlatilag nem fordult elő érték, hiszen igen ritka esetben lehetséges, hogy egy teljes hónap átlagos uralkodó széliránya DK-i, vagy ÉK-i legyen. A több mint 35 év alatt mindössze egyetlen olyan hónap volt, ami a 2., és hét olyan hónap, ami a 3. kategóriába került besorolásra.

Annál inkább gyakoribb volt azonban a 4. (ÉNy) kategória. Természetes, hogy a Ny-i szelek övében fekvő Kárpát-medencére legjellemzőbb szélirány az ÉNy-i. Az egyes hónapokat külön tekintve elmondható, hogy nem mutatkozott különösebb eltérés abban, hogy milyen arányban fordult elő bennük ÉNy-i uralkodó szélirány (egy adott hónapon belül átlagosan az esetek 71,5%-ában (25 eset) volt 4. kategóriás szélirány). Egyedül április (16 eset), május (18 eset) és november (17 eset) hónapok esetében fordult elő a többi hónaphoz képest valamivel ritkábban az ÉNy-i áramlás. Az ÉNy szélirány által uralt időszakokra vonatkozóan számított távkapcsolatok a következőket mutatták:

A 4. kategóriaváltozó esetében a napfoltszám és az AO index között nem túl erős, de szignifikáns ($r=0,1762$; $p=0,024$) összefüggést találtam. Az AO index és a hőmérsékleti anomáliák között ($r=0,3542$; $p<0,0001$) és a NAO index és a hőmérsékleti anomáliák között ($r=0,2451$; $p=0,0016$) pedig erősebb szignifikáns kapcsolatot kaptam. Érdekes eredmény, ami akár a véletlen műve is lehet (az adatsor viszonylagos rövideége miatt), hogy a napfoltok száma és a csapadék anomáliák között $r=-0,16$; $p=0,0407$ összefüggés adódott. A NAO index és a csapadék anomáliák között $r=-0,2251$; $p=0,0038$, míg az AO és a csapadék anomáliák között $r=-0,2458$; $p=0,0015$ összefüggés adódott.

3.4.2. Az ÉNy-i és DNy-i szélirányok által uralt hónapok összehasonlítása

További vizsgálataimban a két leggyakoribb szélirány-kategóriába eső hónapok cirkulációs indexeit, illetve a csapadék anomália értékeit hasonlítottam össze t-próba segítségével.

DNy-i (1. kategória) áramlások esetében átlagosan 0,3935-el alacsonyabb volt a NAO index átlagos értéke, mint ÉNy-i áramlások esetében. Az AO tekintetében ugyanezen különbség -0,47-nek adódott. Mindkét próba eredménye szignifikáns különbséget jelzett (a szignifikancia szintek: $df = 217$ (szabadsági fok), $t = 2,472$, $p = 0,0142$ a NAO és $df = (217)$, $t = 2,948$, $p=0,0035$ az AO-nál).

Ezen legutóbbi vizsgálat magyarázata a NAO index definíciójában rejlik, hiszen negatív NAO index esetében inkább a mediterrán területekre szállítódik a nedves, óceáni levegő, ami onnan DNy-i áramlással, mediterrán ciklonok formájában érheti el a Kárpát-medencét. Ennek bizonyítéka lehet az 1. és 4. kategóriaváltozók függvényében elvégzett t-próba a csapadék anomáliák eloszlásáról. A DNy-i szelek esetében ugyanis +12,324 mm, míg ÉNy-i áramlások esetében -4,311 mm-nek adódott a csapadékösszeg 1961-2010-es átlagától vett eltérése. A különbség erősen szignifikáns: $t(217) = 5,143$; $p<0,0001$. Tehát DNy-i

áramlások útján átlagosan több csapadék érkezik a Kárpát-medencébe, mint ÉNy-i szelek révén.

3.4.3. A zonális és meridionális áramlatok gyakorisága térségünkben

Amint azt már említettem, a Kárpát-medence térségében a nyugatias, zonális szelek dominálnak, azonban az áramlási mezők másik típusa, a meridionális áramlási helyzetek is számottevően jelen vannak. Az áramlási helyzetek gyakoriságának számszerűsítése érdekében, valamint abban a reményben, hogy ezáltal pontosabb képet kaphatok a térség légköri cirkulációs jellegéről, az 1979-2014 időszakra vonatkozóan az 500 hPa nyomásszint szélirányai alapján elvégeztem a meridionális hónapok gyakorisági vizsgálatát.

Az adatbázis alapján meridionális hónapnak definiáltam az olyan hónapokat, amelyekben az átlagos szélirány 45° – 135° (déli meridionális), illetve 225° – 315° (északi meridionális) közé esett. Tehát csak abban az esetben kapta a hónap a „meridionális jellegű” minősítést, ha az átlagos szélirány É-i, vagy D-i volt az adott hónap során.

Adatsorom alapján leginkább a január hónapok azok, amik jellemzően hajlamosak a meridionális jelleg mutatására. Az elmúlt 35 évben 9-szer, az esetek több mint 25%-ában fordult elő meridionális áramlási képet mutató január. Ebből 4 eset (2000, 2002, 2006, 2012) történt az ezredforduló óta. Február hónap tekintetében már valamivel alacsonyabb a ráta, az esetek 20%-ában fordult elő meridionális jellegű február az elmúlt 35 évben. Az elmúlt években megszorozódott a meridionális márciusok száma, 2011-ben, 2012-ben és 2014-ben is meridionális átlagos szélirány jellemezte a tavasz első hónapját, míg előtte 1997-ben, 1998-ban és 2003-ban fordult elő. E három hónap adja a meridionális jellegű hónapok eseteinek 40%-át. Az utóbbi években a május hónap tekintetében látszik még a meridionalitás gyakoribbá válása: az utóbbi 4 évben 2011, 2012 és 2013-ban is meridionális volt a május, míg előtte legutóbb 1992-ben fordult elő.

Szintén figyelemreméltó az a tény, hogy azokban az években, amikor előfordult meridionális hónap, az esetek 33,2%-ában télen fordultak meridionálisba az egyébként többnyire zonális irányú szelek (nyárra az esetek alig 13%-a jut). Az utóbbi 13 évben mindössze egy alkalommal fordult elő olyan nyári hónap amikor az átlagos uralkodó szélirány az általam alkalmazott kritérium szerint meridionálisnak volt tekinthető, míg téli hónap 8 alkalommal!

Meg kell azonban jegyezni, hogy a zonális és meridionális hónapok gyakorisága valószínűleg a vizsgálataimnál nagyobb időskálájú periodicitást mutatnak, éppen ezért későbbi célom, hogy jelen vizsgálataimat nagyobb adatbázissal is elvégezzem.

4. Diszkusszió

Az elvégzett kutatás eredményesnek bizonyult a Kárpát-medence időjárási elemei, illetve a nagytérségi cirkulációs rendszerek között vélhető fizikai kapcsolat feltárásában. A statisztikai elemzések magyarázatának még pontosabb bemutatása a jövő feladata.

4.1.A hőmérséklet és a cirkulációs rendszerek kapcsolata

A NAO, EA és AO indexek minden vizsgált hónapban pozitív korrelációban állnak a hőmérséklettel (ld. 2. Függelék). Ennek hátterében az állhat, hogy a fentebb részletezett pozitív NAO fázis esetében tapasztalható nagy tengerszinti légnyomáskülönbség Izland és az Azori-szigetek között, az időjárás kiegyenlítettebbé válását eredményezi (Marshall et al. 2001). Ugyanis a nyomáskülönbség miatt kialakuló viharok az uralkodó nyugatias szelek hátán érkeznek a Kárpát-medencébe, ezáltal enyhe, csapadékos, kiegyenlített időjárást okoznak. Ez a zonális áramlatok gyakoriságát okozza a Kárpát-medencében, így az óceáni hatás erősödését.

Amikor a NAO/EA és AO indexek negatív irányba változnak, a hőmérséklet a fennálló távkapcsolat miatt általában szélsőséesebb, extrémításokban gazdagabb időjárás tapasztalható. Ekkor a meridionális áramlási képek válnak gyakoribbá térségünkben, ami a változékonyabb, kontinentálisabb időjárásnak kedvez.

A korreláció a téli negyedévben mutatkozott szignifikánsnak, tehát az itt leírt következmények/hatások csak a DJF időszakban érvényesek.

A téli szezonális átlagértékek szórása és a NAO/AO indexek között negatív szignifikáns korreláció következtében a cirkulációs indexek negatív irányú változása, a hőmérséklet szórásának pozitív irányú megváltozását eredményezi. Ez szintén megerősíti a fent említetteket: a NAO/AO index negatív irányú változása télen a változékonyabb, kontinentális, illetve mediterrán típusú időjárási helyzetek kialakulásának kedvez.

4.2.A csapadék és a cirkulációs rendszerek közötti kapcsolat

A Kárpát-medence csapadékösszegeinek anomáliái, illetve azok havi szórásának és a NAO, AO indexek közötti erősen szignifikáns, negatív korreláció a hőmérséklethez hasonlóan az adott NAO/AO fázisokban tapasztalható, a cirkulációs rendszer változására vezethető vissza (ld. 2. Függelék). A cirkulációs indexek negatív irányú változása tehát a csapadék szórásának a növekedését is eredményezheti, ami szintén egyezik a feltevessel, miszerint a negatívabb NAO/AO indexek az időjárási szélsőségek gyakoribbá válását eredményezhetik.

Úgy tűnik, hogy szignifikánsan kevesebb csapadék érkezik hazánk területére ÉNy-i áramlások útján, mint amikor DNy-i áramlások dominálnak térségünkben. Ez egyezik azzal, amit a csapadék és a NAO/AO indexek között tapasztalt negatív korreláció vetít előre, miszerint a pozitív NAO/AO indexek esetén (nyugatias szelek) negatív irányban változik a csapadék mennyisége.

4.3.A naptevékenység és a Kárpát-medence időjárásának lehetséges összefüggése

A felszínre érkező napsugárzás energiatartalma és a NAO/AO indexek között bemutatott összefüggés hátterében igen bonyolult fizikai kapcsolatok állhatnak. A Kárpát-medence területén mért globálsugárzási értékek főként az Arktikus Oszcillációval mutattak erősen pozitív lineáris kapcsolatot (ld. 2. Függelék). Természetesen a felszínre érkező sugárzás energiatartalma nem a legjobb mérőszám a naptevékenység és az időjárás közötti összefüggések keresésére, hiszen a felhőzet alakulása nagyban befolyásolja a globálsugárzás alakulását. Ennek ellenére, a feltárt összefüggések alapján feltételezésem, hogy a naptevékenység közvetett módon hatást gyakorolhat a Kárpát-medence időjárására, hosszabb távon pedig az éghajlatra is.

Közvetlen, szignifikáns összefüggést a Kárpát-medence időjárási elemei, és a napfoltok száma, vagy a napból érkező teljes sugárzási fluxus között nem sikerült kimutatnom. A naptevékenység és a cirkulációs rendszerek között azonban másoknak sikerült szignifikáns összefüggést találniuk. Ezek során kimutatták, hogy a poláris örvény nagyobb valószínűséggel erősödik meg, ezáltal a zonális szelek is gyakoribbik magas naptevékenység idején Európában (Ruzmaikin és Feynman 2002; Mayewski et al. 2005). Kiemelték, hogy leginkább a téli negyedévben szoros az összefüggés, hiszen télen a sarkvidék és a délibb szélességek között fennálló nagyobb hő kontraszt miatt, a légkör érzékenyebbé válik.

4.4.Az elmúlt évtizedekben tapasztalt éghajlati változások a Kárpát-medencében a távkapcsolatok és klímamodellek tükrében

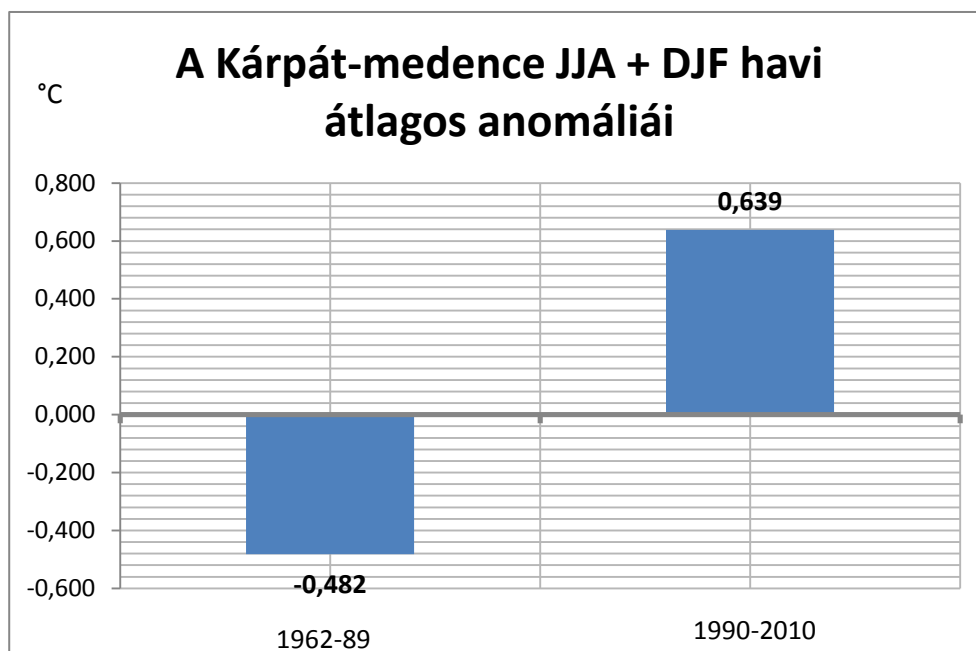
A globális klímamodellek, illetve a klímaváltozással kapcsolatos elképzelések különbözőképpen vélekednek a változások közép-európai térségben várható hatásairól. Az IPCC 2013-as jelentése szerint a jövőben egységes, minden évszakra érvényes felmelegedés várható, míg egy másik modell nem jósol ilyen egyöntetű változásokat. A modell neve is (Warm Arctic Cold Continents – meleg sarkvidék hideg kontinensek, Cohen et al. 2012) utal arra, hogy térségünkben a felmelegedő sarkvidék hatására hidegbetörésekkel tarkított, változékonyabb, és a nyári félévtől eltérően egyértelmű melegedő tendenciát nem mutató

telek várhatóak. E két, egymásnak ellentmondó feltételezés alapján vizsgáltam meg a Kárpát-medence éghajlatának utóbbi évtizedekben bekövetkezett változásait.

4.4.1. A szezonális aszimmetria

A legerősebb felmelegedés egyértelműen az Északi-sarkvidéken tapasztalható, ahol a hőmérséklet növekedésének üteme majdnem kétszerese a földi átlagnak. Mégis, miközben a bolygó melegszik, az északi félteke teleiben nem mutatható ki efféle változás. Ennek bizonyítéka az utóbbi években, Észak-Amerika és Eurázsia területén tapasztalt erős téli hideghullámok lehetnek. Az, hogy az egyre inkább jellemző hidegebb telek a klimatikus rendszer belső változékonyságának következménye, vagy a felmelegedés velejárója, nyitott kérdés marad. A WACC modell kutatói szerint az északi félteke hidegbetörésekkel tarkított telei nem magyarázhatóak teljességgel az egyébként stabil globális rendszer normális kilengéseivel (Cohen et al. 2012).

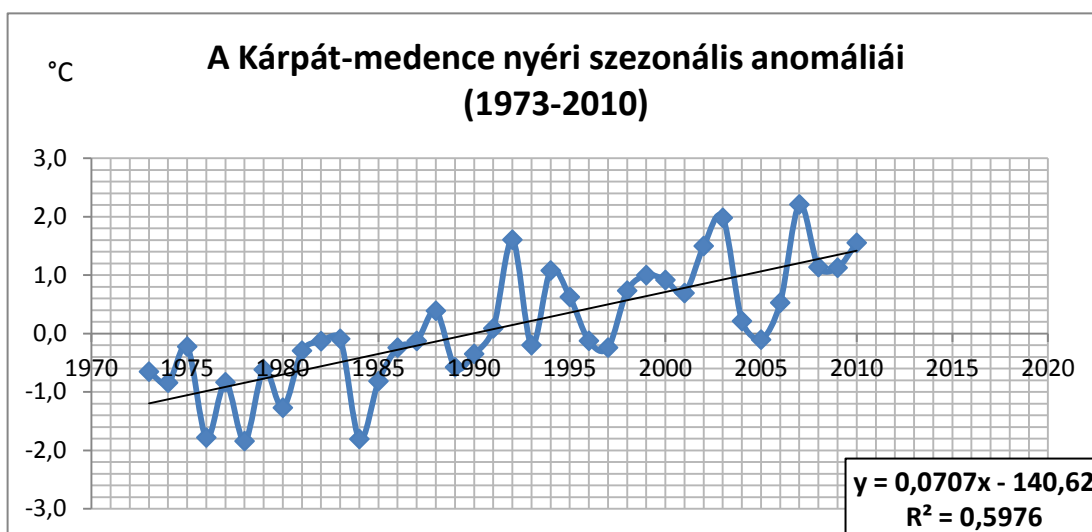
Az a tény, hogy az 1990-es évek óta a korábbi évekhez képest jelentősen emelkedett az átlaghőmérséklet, látszólag az IPCC modell elvárásait igazolja. Az 1962-1989 közötti időszakhoz képest az 1990-2010 időszak téli és nyári szezon átlagos anomáliáiból számolt éves átlaghőmérséklet a Carpatclim alapján $1,12^{\circ}\text{C}$ -al magasabb, és a különbség erősen szignifikáns ($t(47) = 4,125$, $p = 0,0001$; 3. ábra).



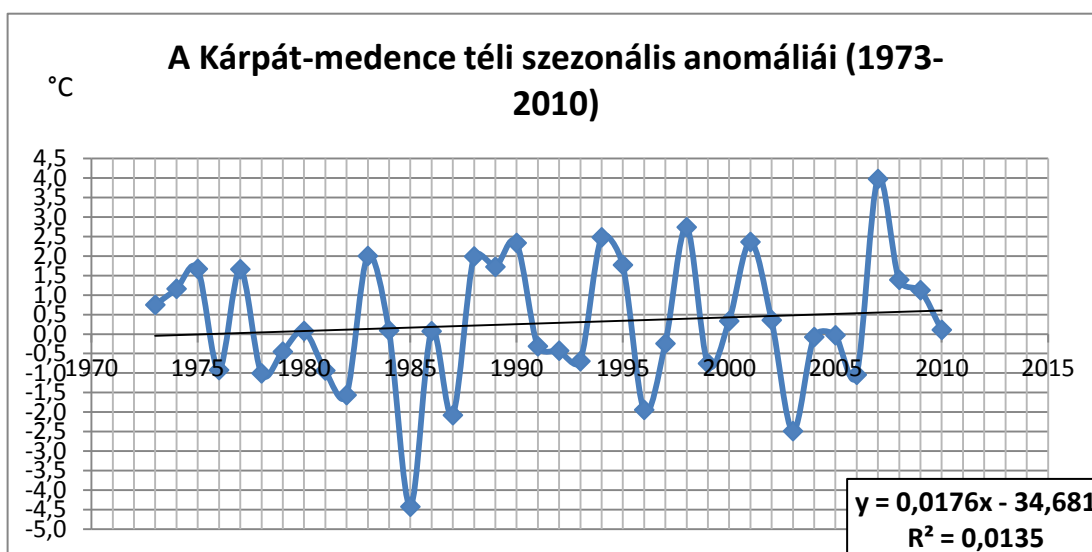
3. ábra. A Kárpát-medence téli és nyári szezonális anomáliái alapján számolt éves átlaghőmérsékletek anomáliái az 1962-89 és 1990-2010 időszakokban

Azonban ha az adatokat évszakos felbontásban nézzük, már korántsem ilyen egyértelmű a kép. Ugyanis a három nyári hónap (június, július, augusztus) alapján számolt szezonális anomáliák (az anomáliák számításához az 1973-2010 időszak 3 nyári hónapjának 37 éves átlaghőmérsékletét vettem alapul) a nyár melegedését mutatják az utóbbi évtizedekben a Kárpát-medencében, és e növekedés lineáris trendet követ (4. ábra).

Ezzel ellentétben, a téli szezon (december, január, február) anomáliái nem mutatnak efféle trendet, az időnként melegebb teleket időről-időre hidegebb telek követik meglehetősen változékonysággal. A telek e változékonyságát jelzi, hogy a legnagyobb pozitív és legkisebb negatív anomália különbsége megközelíti a 8,5°C-ot (5. ábra).

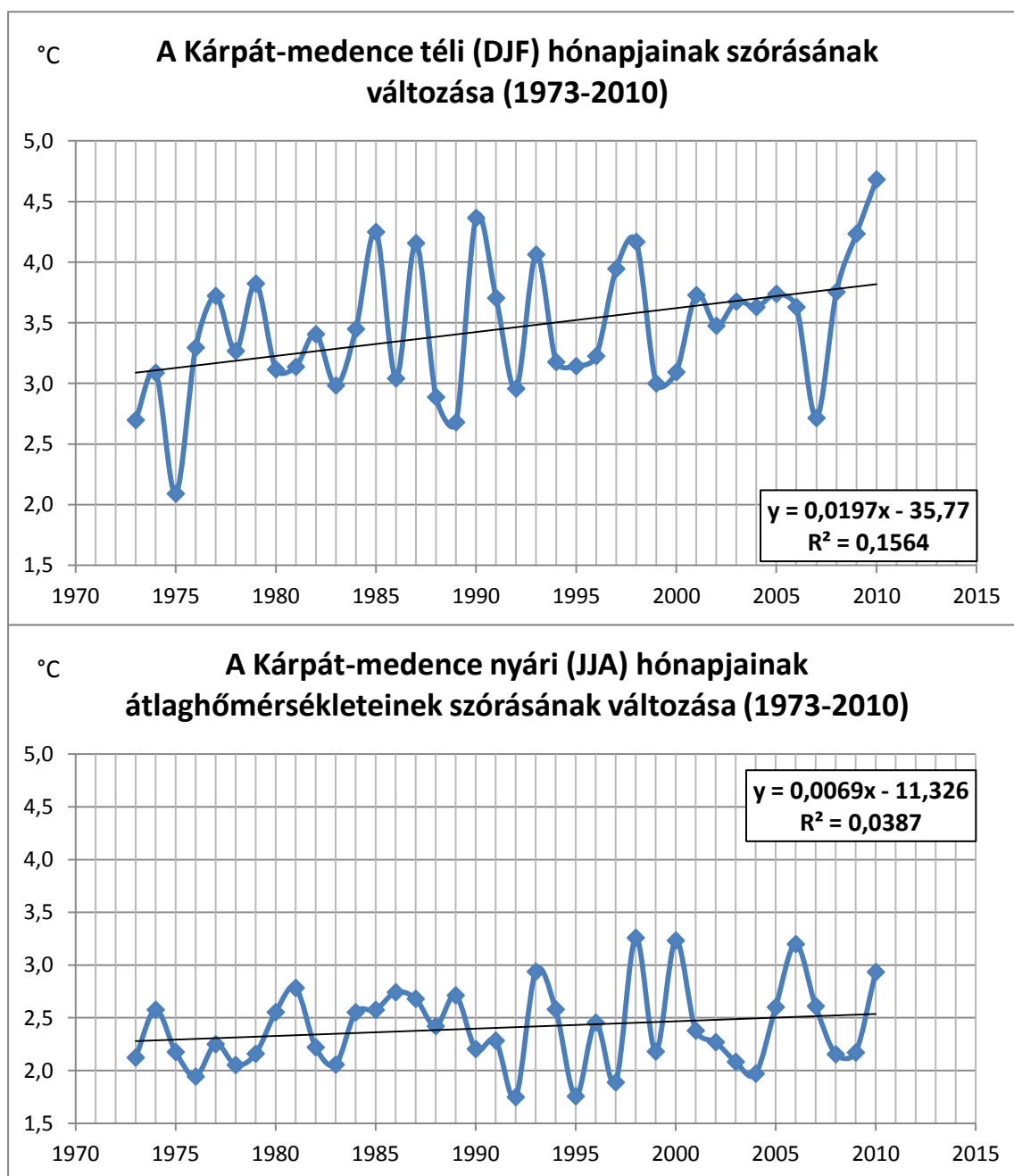


4. ábra. A nyári hónapok hőmérsékleti anomáliáinak változásai a Kárpát-medencében (1973-2010)



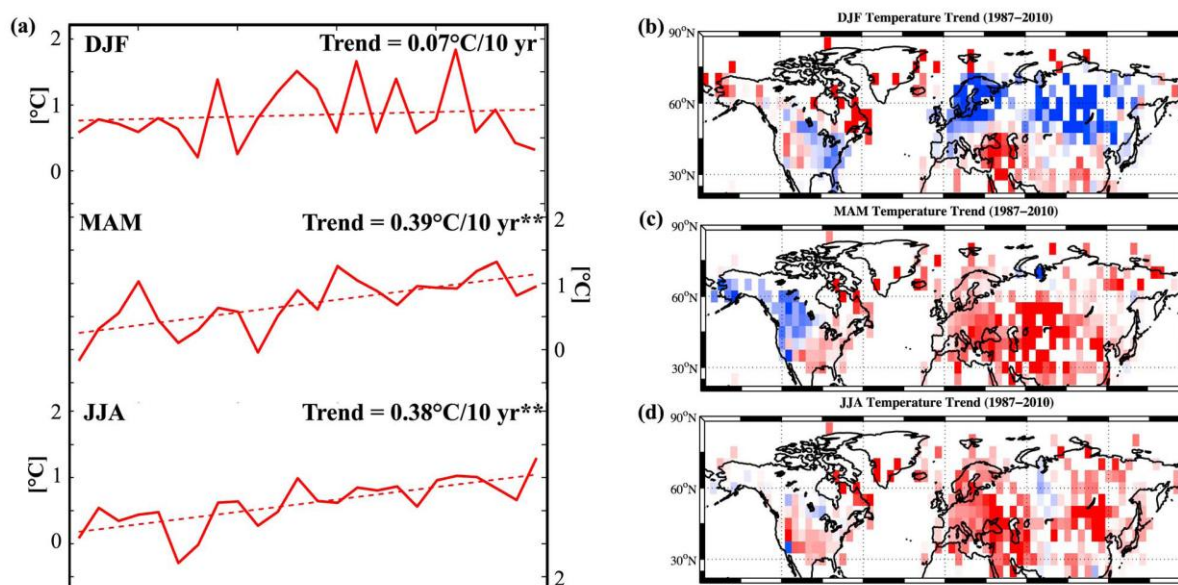
5. ábra. A téli hónapok hőmérsékleti anomáliáinak változásai a Kárpát-medencében (1973-2010)

Ami pedig a szezonális átlaghőmérsékleti értékek szórását illeti, szintén elmondható, hogy a téli hónapok átlaghőmérsékleteinek szórása igencsak nagyobb, mint a nyári hónapok esetében. Az utóbbi évtizedekben tapasztalt változásait megvizsgálva pedig arra a következtetésre jutottam, hogy az 1973-2010 időszakban a nyári hónapok szórásainak anomáliái a téli szórásanomália értékekkel szemben nem mutatnak jelentős változást (6. ábra). (Az anomáliák alapjául a 37 év nyári/téli szezonjainak átlagos szórásértéke szolgált.) A téli szezonális átlaghőmérsékletek szórása szignifikáns lineáris növekedő trendet mutat, ami a telek változékonyabbá válásának jele lehet.



6. ábra. A téli és nyári hónapok átlaghőmérsékleteinek szórása (1973-2010)

Az, hogy a Kárpát-medence területén a nyári és a téli hőmérsékleti anomáliák, illetve a szezonális átlaghőmérséklet szórásai ilyen eltérést mutatnak, egyezik annak a nemrégiben publikált felmérésnek a következtetéseivel, amely a teljes Északi félgömbön tapasztalható éghajlati tendenciákat elemzi (Cohen et al. 2012; 7. ábra).



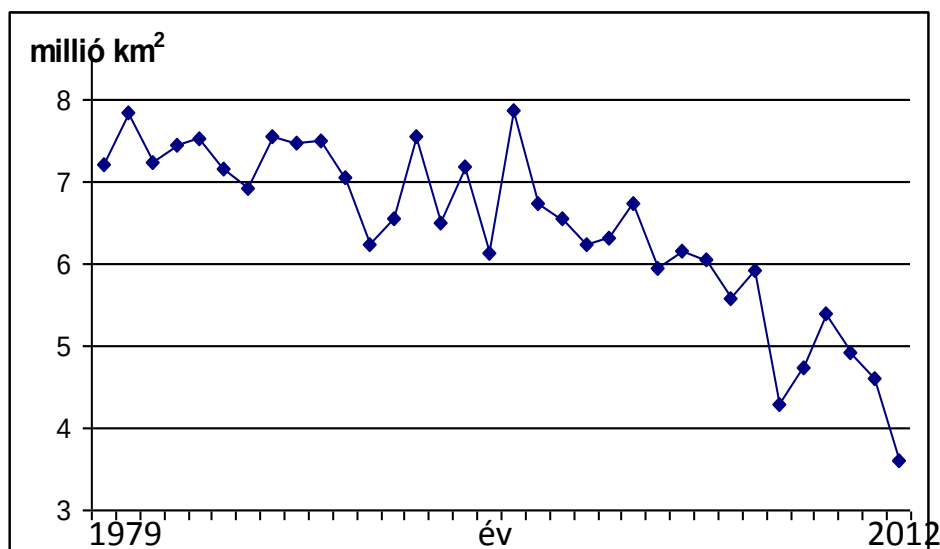
7. ábra. Az északi félgömbre vonatkoztatott szezonális anomáliák változásai az 1988-2010-es időszakban. Az ábra bal oldalán a megfigyelt trendek, jobb oldalán pedig az egyes régiók adott évszakban tapasztalható hőmérséklet változásának tendenciái láthatók (kék színek: hűlő, piros színek: melegedő tendencia). Forrás: Cohen et al. 2012

4.4.2. Az átalakuló cirkulációs rendszer

A bemutatott eltérések a téli és a nyári félév hőmérsékleti változásai között arra engednek következtetni, hogy a változások háttérében nem egy egyébként stabil globális rendszer normális kilengései, hanem a cirkulációs rendszer átalakulása állhat.

Az áramlási rendszerben fellépő változás az óceán és légkör bonyolult kapcsolatrendszerében bekövetkezett módosulás következménye. A térítők térségét jellemző leszálló légmozgások öve egyre gyakrabban kiterjed, ezért az Atlanti-óceán felett keletkező Európa felé tartó ciklonok kevesebb nedvességhez jutnak és pályájuk is északabbra tolódik elkerülve ezzel hazánkat (Francis et al. 2009; Petoukhov és Semenov 2010). Ennek az áramlási helyzetnek tartós fennállását tapasztalhattuk 2012-ben, ezért volt a Brit-szigeteken szokatlanul hűvös és csapadékos, míg Közép-, és Dél-Európában rendkívül meleg és száraz a nyár.

A szakemberek arra is felhívták a figyelmet, hogy az északi féltekén lezajló időjárási változások háttérében valószínűleg a sarkvidéki területek felgyorsult felmelegedése áll. A melegedés folyamata egyértelműen látható a jégtakaró kiterjedésének nyári időszakban tapasztalható, egyre drasztikusabb csökkenéséből (8. ábra).



8. ábra. Az északi jégsapka kiterjedésének nyári minimum értékei 1979-2012 között
(forrás: www.arctic.noaa.gov)

Az erős nyári olvadás megnöveli a levegő páratartalmát a térségben, ami pedig az eurázsiai hótakaró őszi eleji kiterjedésének növekedéséhez is vezethet. A WACC modell kutatói kimutatták, hogy a növekvő őszi eleji eurázsiai hótakaró negatív AO indexhez vezet, ezáltal pedig hidegebb telekhez Észak-Amerikában és Európában (Cohen et al. 2012).

Így a melegedő sarkvidék bonyolult kölcsönhatás révén alaposan megváltoztathatja az Északi-félgömb téli időjárását is. A kutatók szerint ugyanis az utóbbi években Európa, Ázsia és Észak-Amerika területén tapasztalható erős téli hideghullám a poláris örvény – azaz a hideg légtömeget a pólus környékén tartó körkörös áramlás – gyengülésével hozható kapcsolatba (negatív AO index).

Az erős nyári olvadás következtében a sarki térségben megnövekszik a sötétebb tengerfelület nagysága (alacsonyabb albedó), ez pedig főként a nyár végén nagy mennyiségben tudja felvenni a napsugárzás energiáját. Ez a hó a sarkvidéki éjszaka beállta után folyamatosan kisugárzódik a légkörbe, aminek hatására a sarki atmoszférikus cirkuláció alaposan összezavarodik. Minél több jég olvad el, annál több napenergia tárolódik el (ezt nevezik pozitív tenger-jég-albedó visszacsatolásnak). Az így megváltozott sarkvidéki áramlatok elősegíthetik a poláris örvény felszakadását, sőt, akár le is állíthatják azt. Ha ez az

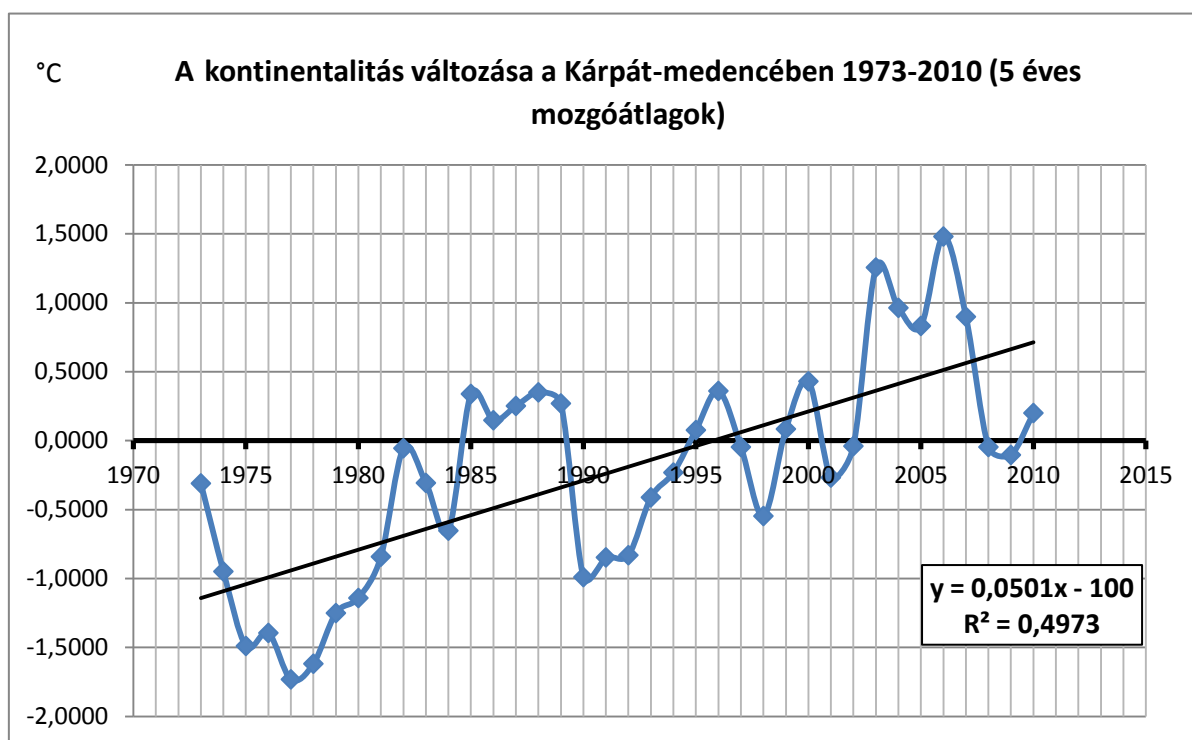
örvény összeomlik, a jet stream eredeti körkörös iránya helyett hurkokra bomlik, mely hullámokon hideg sarki léghullámok áramlanak dél felé a közepes szélességekre. Ezzel egy időben enyhe légtömegek áramlanak a sarki térségbe, és az egyébként zonális áramlatok meridionálisba fordulnak. A poláris örvény összeomlásakor a NAO/AO indexek zuhanása figyelhető meg, pl. a 2009-2010-es télen a NAO az utóbbi 145 év legalacsonyabb értékét érte el. A negatív NAO/AO indexek tehát nagyobb valószínűséggel okozhatnak hidegebb teleket Közép-Európában (Cohen et al. 2012; Petoukhov és Semenov 2010).

Meg kell azonban jegyezni, hogy az IPCC globális felmelegedéssel kapcsolatban kidolgozott elképzelése a fentiekkel ellentétben a poláris örvény erősödését prognosztizálja, melyet a troposzféra melegedése és a sztratoszféra lehülése okoz. Ezen előrejelzések szerint a NAO/AO a következő teleken gyakorta a pozitív tartományban lesz, ez pedig Európában – a beálló Ny-i áramlás miatt – enyhe teleket jelez előre (Francis et al. 2009).

4.4.3. A változások a Kárpát-medence tekintetében

Ami a Kárpát-medencében tapasztalható változásokat illeti, úgy tűnik, hogy a melegedő nyarak és az időről időre hidegbetörésekkel tarkított – ezért nem nagyon változó átlaghőmérsékletű – telek felé látszik elmozdulás. (Ez pedig a WACC modellt látszik igazolni).

A 9. ábrán a negatív értékek negatív hőmérsékleti anomáliájú nyarat és/vagy pozitív hőmérsékleti anomáliájú telet jelentenek, ami az óceáni hatás tipikus következménye. A pozitív értékek a nyári pozitív hőmérsékleti anomáliára és/vagy a negatív téli hőmérsékleti anomáliára utalnak, mely a kontinentális hatás velejárója. Jól látható hogy az 1990-es évektől kezdve egyre inkább az erősödő kontinentális hatás jellemzi a Kárpát-medence klímáját. Mindezt a lineáris regresszió analízis is alátámasztja, ugyanis szignifikáns lineáris trend mutatható ki a kontinentális hatás erősödése irányában ($r=0,7923$, $p<0,0001$; 9.ábra).



9. ábra. A kontinentalitás erősödésének változása 1973-2010 között a Carpatclim adatbázis alapján

5. Következtetések és kitekintés

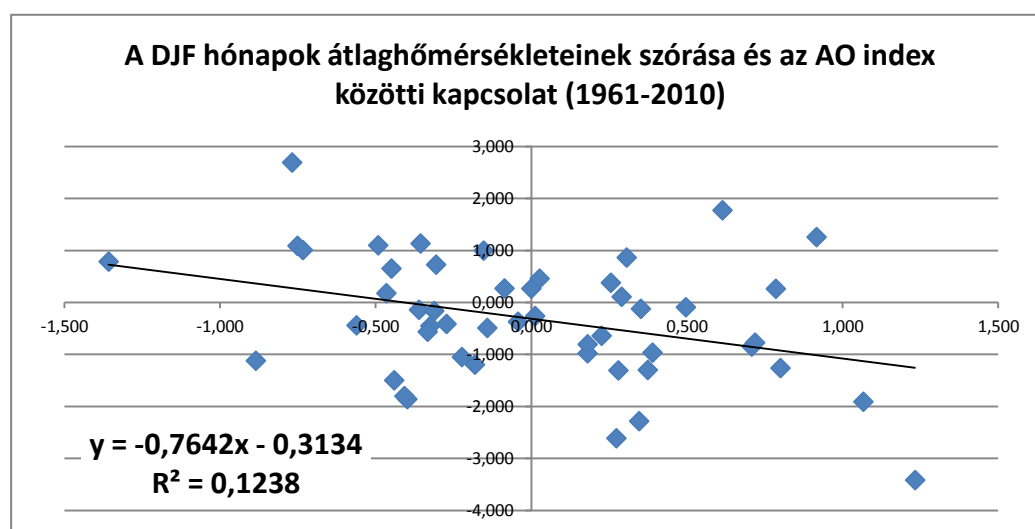
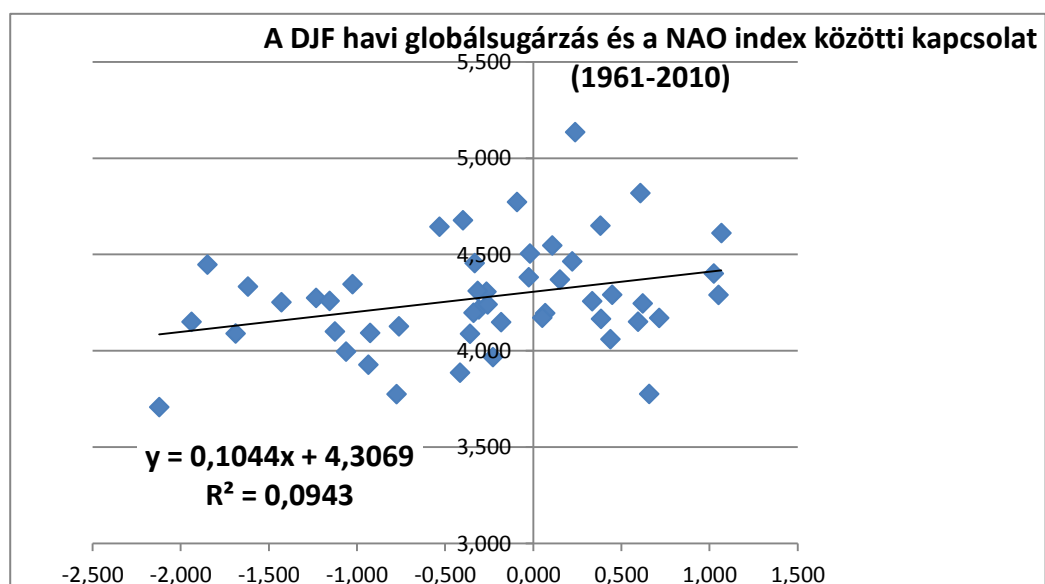
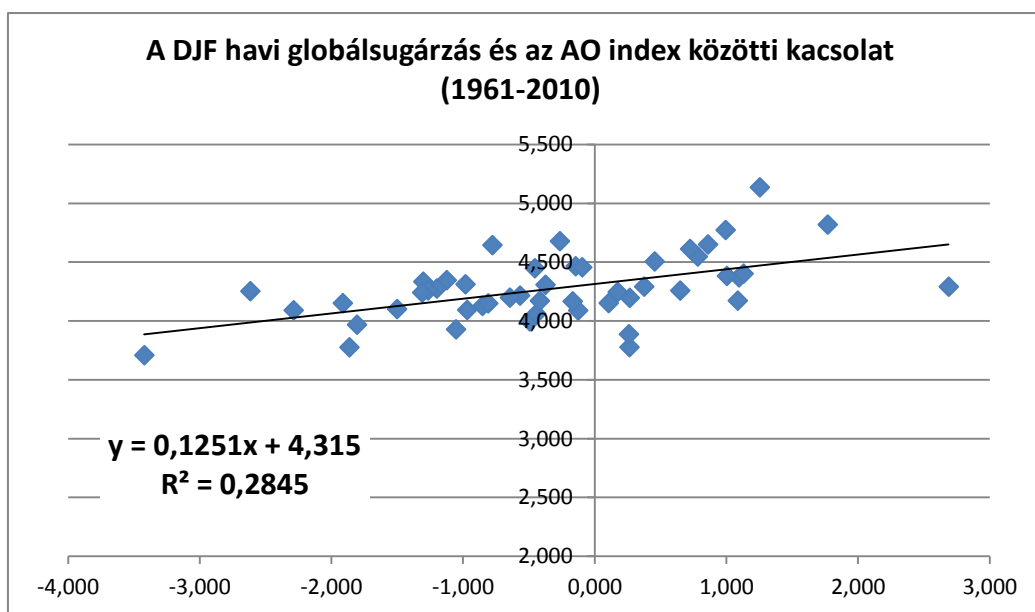
A kutatás eredményesnek bizonyult olyan nagytérségi összefüggések kimutatásában, melyben a kárpát-medencebeli december-február időszakbeli hőmérsékleti anomáliák, azok szórása és az Észak- Atlanti térség légköri cirkulációs rendszerei játszanak szerepet. A térség csapadék-, és globálsugárzás viszonyai között szintén szignifikáns távkapcsolat adódott, melyek pontos magyarázata további kutatásokat igényel. A bemutatott összefüggések segítségével nemcsak a téli szezon időjárásának előrejelzéséről, hanem a globális klímaváltozás Kárpát-medencei vonatkozásáról is tisztább képet kaphatunk.

A téma szempontjából fontos felismerés, hogy a NAO és az AO indexek változásai összefüggésbe hozhatók az északi jégsapka kiterjedésének csökkenésével. Ha ugyanis az olvadó sarkvidék tenger-jég-albedó visszacsatolásán keresztül a sarkvidéki légkörbe jutó hő meggyengíti a poláris örvényt, e területek légnyomása így a NAO/AO indexek is megváltoznak. Mivel pedig ezen cirkulációs rendszerek korrelációban állnak a Kárpát-medencében a december-február időszakban mért hőmérsékleti, illetve csapadék értékekkel, e kapcsolat következményeként közvetett módon, a nyári évszakban tapasztalható sarkvidéki felmelegedés alapján, következtethetünk a soron következő tél hőmérsékleti és csapadékanomália viszonyaira.

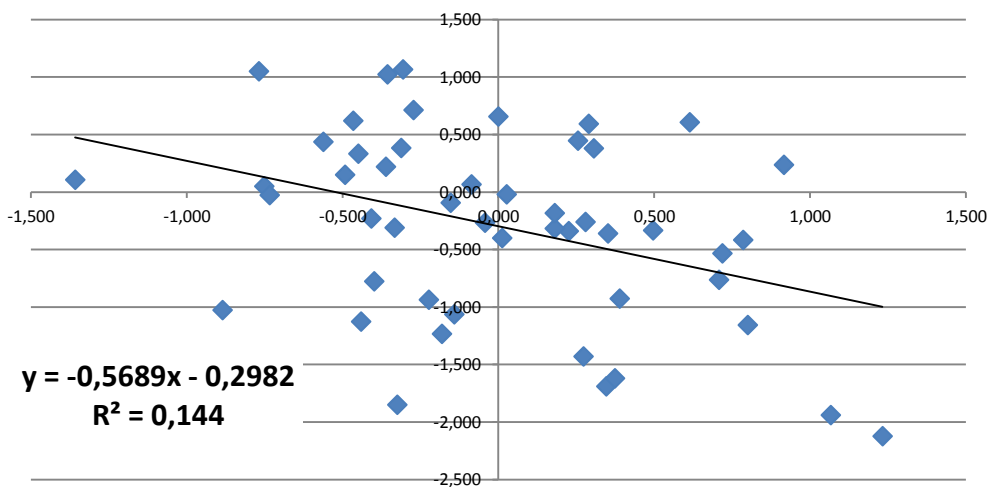
Ami pedig a globális klímaváltozás Kárpát-medence térségét érintő vonatkozását illeti, a kutatás során kapott eredmények a WACC modellel mutatnak egyezést. A felmelegedő sarkvidék hatására a negatív NAO/AO indexek gyakorisága megnövekszik, így változékonyabb, nem nagyon változó átlaghőmérsékletű telek várhatóak térségünkben. Ezt az ismertetett szezonális aszimmetriák, illetve a kontinentális hatások erősödése is igazolja.

Az, hogy a különböző modellek által elvárt eseménysorok melyike fog megvalósulni, az a következő évek-évtizedek kérdése, annyi azonban nagy valószínűséggel elmondható, hogy a légkörben fellépő globális változások már nem a jövő problémái, hanem itt és most történnek, és éreztetik hatásukat szűkebb környezetemben is. A klíma változásaival való megbirkózás komoly kihívást jelent az egész emberiség számára. A megfelelő válaszlépések megtalálását elsősorban attól remélhetjük, ha az éghajlati rendszerek működésével kapcsolatos, szisztematikus adatgyűjtésen és állapotfelmérésen alapuló kutatások a jövőben új felismerésekkel gazdagítják jelenleg még meglehetősen hiányos tudásunkat.

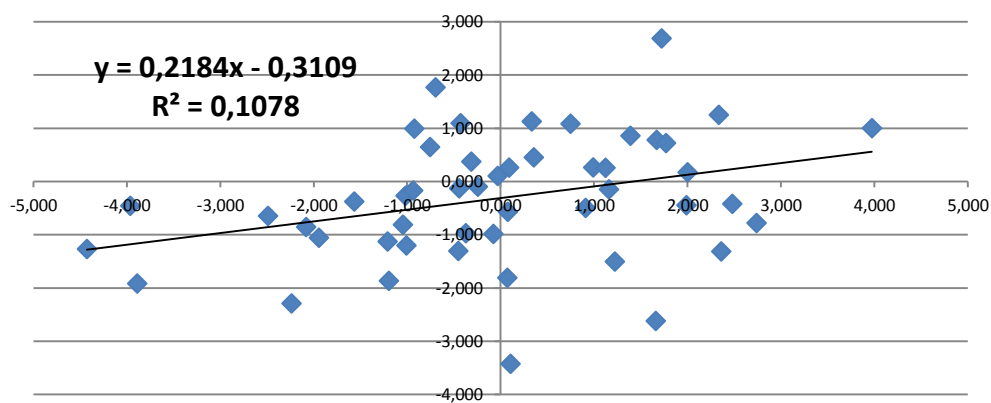
Függelék 2.



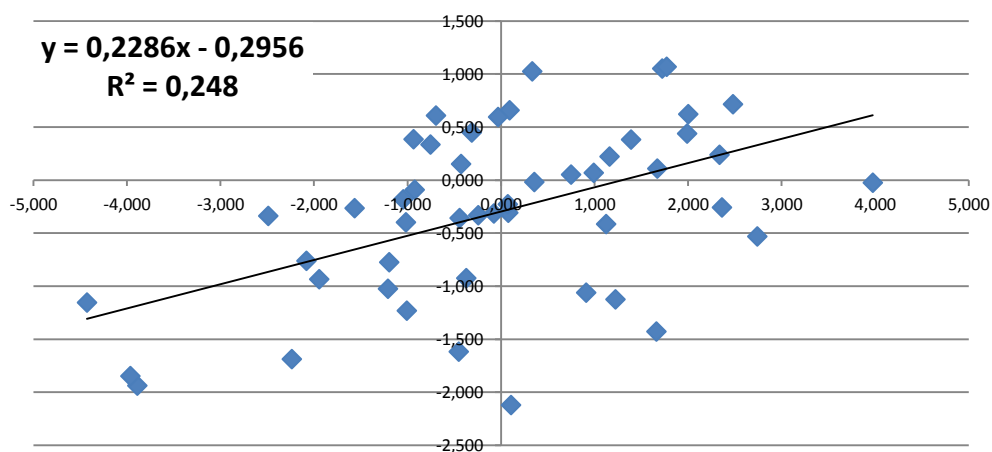
A DJF hónapok átlaghőmérsékleteinek szórása és a NAO index közötti kapcsolat (1961-2010)



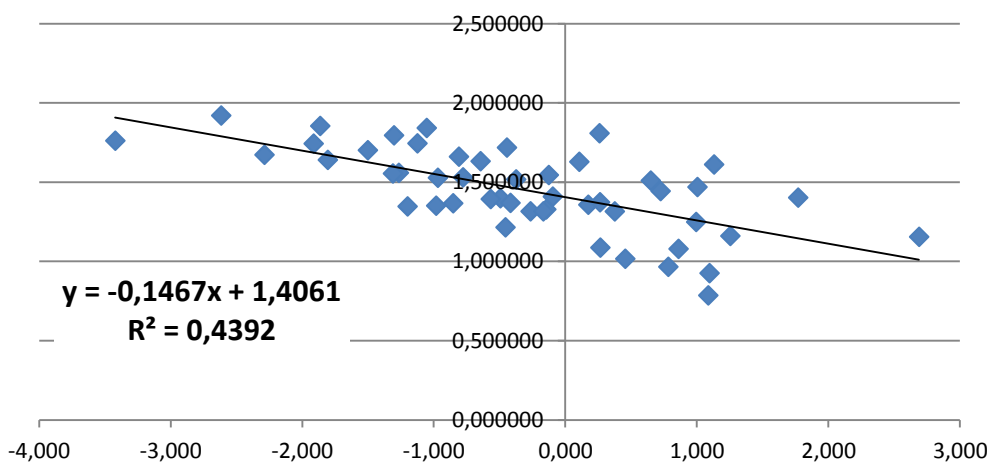
A DJF hónapok hőmérsékleti anomáliái és az AO index közötti kapcsolat (1961-2010)



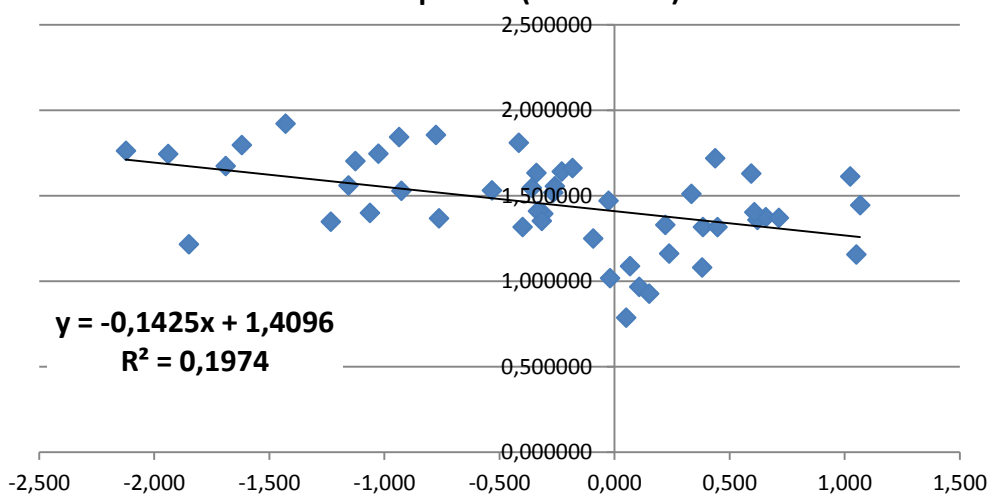
A DJF hónapok hőmérsékleti anomáliái és a NAO index közötti kapcsolat (1961-2010)



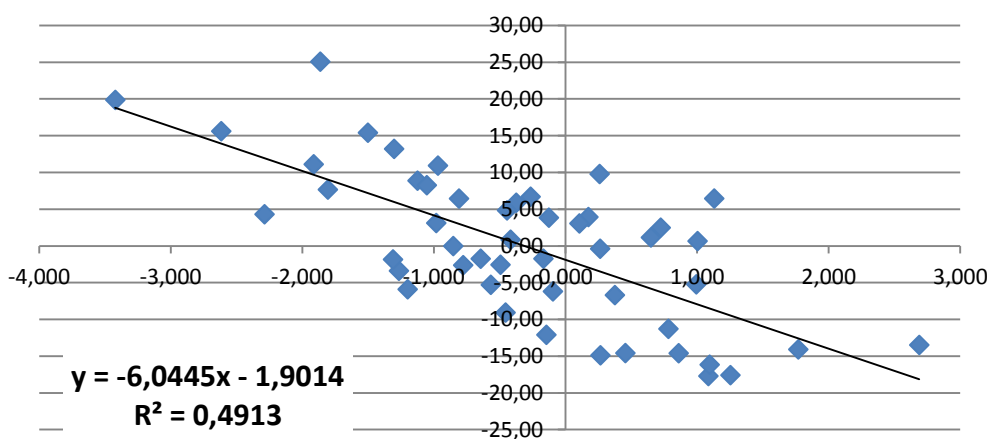
A DJF havi csapadékösszegek szórása és az AO index közötti kapcsolat (1961-2010)

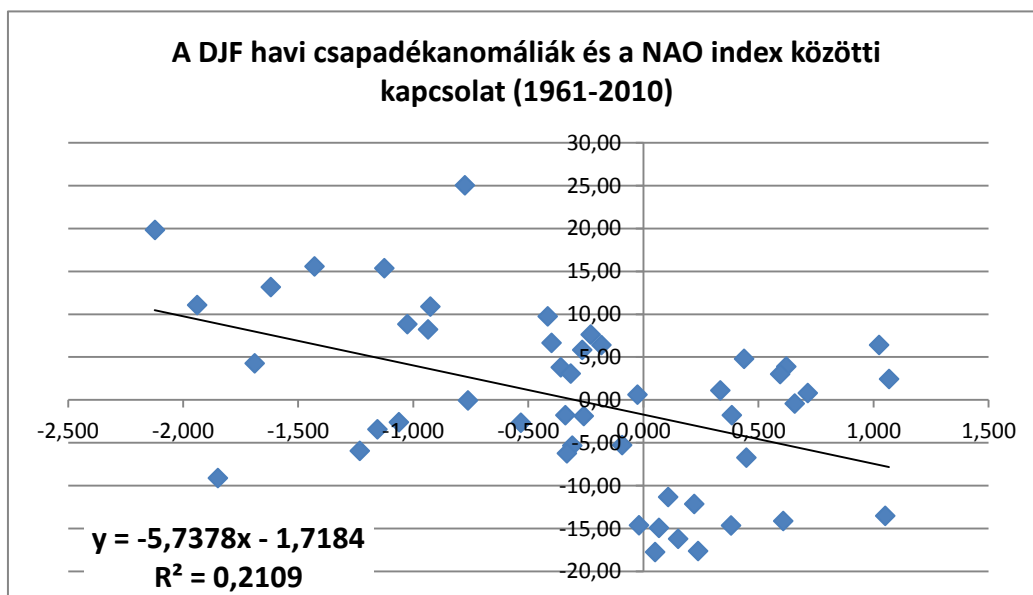


A DJF havi csapadékösszegek szórása és a NAO index közötti kapcsolat (1961-2010)



A DJF havi csapadékanomáliák és az AO index közötti kapcsolat (1961-2010)





PREC anomaly-AO index				PREC anomaly-NAO index			
	r	r ²	p		r	r ²	p
dec	-0,4776	0,2281	0,0005	dec	-0,1434	0,02058	0,3203
jan	-0,478	0,2285	0,0004	jan	-0,3823	0,1462	0,0061
feb	-0,5011	0,2511	0,0002	feb	-0,3696	0,1366	0,0082
DJF	-0,7009	0,4912	< 0,0001	DJF	-0,4592	0,2109	0,0009
PREC SD-AO index				PREC SD-NAO			
	r	r ²	p		r	r ²	p
dec	-0,4477	0,2004	0,0011	dec	-0,3222	0,1038	0,0225
jan	-0,4573	0,2091	0,0008	jan	-0,2952	0,08713	0,0374
feb	-0,3414	0,1165	0,0153	feb	-0,274	0,07505	0,0542
DJF	-0,6627	0,4292	< 0,0001	DJF	-0,4443	0,1974	0,0014
T Min - AO index				T Min - NAO index			
	r	r ²	p		r	r ²	p
Jan	0,4881	0,2382	0,0003	Jan	0,646	0,4173	<0,0001
DJF anomaly	0,2876	0,0827	0,0451	DJF anomaly	0,4839	0,2342	0,0004
T anomaly - AO index				T anomaly - NAO index			
	r	r ²	p		r	r ²	p
dec	0,2073	0,04297	0,1486	dec	0,4348	0,189	0,0016
jan	0,5135	0,2637	0,0001	jan	0,6496	0,422	< 0,0001
feb	0,3056	0,09339	0,0309	feb	0,2625	0,06892	0,0655
marc	0,4143	0,1716	0,0028	marc	0,3761	0,1414	0,0071
T anomaly - East Atlantic Index				PREC SD - T SD			
	r	r ²	p		r	r ²	p
Jan	0,482	0,2323	0,0004	DJF	-0,327	0,1059	0,001
Feb	0,6088	0,3706	< 0,0001				
T SD - AO index				T SD - NAO index			
	r	r ²	p		r	r ²	p
dec	-0,343	0,1177	0,0147	dec	-0,4536	0,2057	0,0009
jan	-0,303	0,09181	0,0324	jan	-0,3437	0,1181	0,0145
feb	-0,2848	0,0811	0,045	feb	-0,2452	0,06012	0,0861
DJF	-0,3518	0,1238	0,132	DJF	-0,3794	0,144	0,0072
RAD - AO index				RAD - NAO index			
	r	r ²	p		r	r ²	p
dec	0,4369	0,1908	0,0015	dec	0,2647	0,07008	0,0632
jan	0,3603	0,1298	0,0102	jan	0,3141	0,09864	0,0263
feb	0,6281	0,3945	< 0,0001	feb	0,3915	0,1533	0,0049
DJF	0,5333	0,2844	< 0,0001	DJF	0,3068	0,09415	0,032

1. táblázat. A kutatás során azonosított összefüggések a Kárpát-medence területén az 1961-2010 időszakban (T – hőmérséklet, PREC – csapadék, RAD – globálsugárzás)

Idézett irodalom

1. Babolcsai Gy. 2013. http://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=615&hir=Decemberi_Anomalia_Index
2. Babolcsai Gy. 2014. http://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1037&hir=Az_eszak-atlanti_terseg_szeptemberi_legnyomas-anomaliajanak_kapcsolata_a_Karpat-medence_kornyekenek_decemberi_atlaghomersekletevel
3. Bartholy J., Weidinger T. 1997. Napsugárzás, felhőzet, szél. In: Karátson D. (szerk.) Pannon enciklopédia, Kertek, Budapest 1997, 226-227.
4. Cohen J. Jones J. Furtado J.C. Tziperman E. 2013. Warm Arctic, Cold Continents: A Common Pattern Related to Arctic Sea Ice Melt, Snow Advance, and Extreme Winter Weather. *Oceanography*, 26(4), 150–160. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2013.70>
5. Cohen J.L. et al. 2012. Asymmetric seasonal temperature trends. *Geophysical Research Letters*, 39, L04705, doi:10.1029/11GL050582
6. Dumitrescu A. Bojariu R. Birsan M.V. Marin L. Manea A. 2014. Recent climatic changes in Romania from observational data (1961–2013). *Theor Appl Climatol.* published online. 14 Sept. DOI 10.1007/s00704-014-1290-0
7. Francis J.A., Weihs C., Daniel J. L., Miller J. R., Veron D. E. 2009. Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent. *Geophysical Research Letters* 36(7) Published online: 11 APR 2009 DOI: 10.1029/2009GL037274
8. Fredrik B., Henrik L. 2002. Solar wind variations related to fluctuations of the north atlantic oscillation, *Geophysical Research Letters*, Volume 29, NO. 15, 1718, 10.1029/2002GL014903
9. Georgeiva K. et al. 2007. Long-term variations in the correlation between NAO and solar activity: the importance of North-South solar activity asymmetry for atmospheric circulation, *Advances in Space Research*, 40(7), 1152-1166
10. Gordana J. et al. 2008. The influence of Arctic and North Atlantic Oscillation on precipitation regime in Serbia, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 4, 012025 doi:10.1088/1755-1307/4/1/012025
11. IPCC 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility, Stockholm
12. Lockwood M., Harrison R. G., Woollings T., Solanki S.K. 2010. Are cold winters in Europe associated with low solar activity? *Environmental Research Letters*, 5, 024001 doi:10.1088/1748-9326/5/2/024001
13. Marshall J. et al. 2001. North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms. *International Journal of Climatology* 21(15), 1863-1898.
14. Mayewski P.A. et al. 2005. Solar forcing of the polar atmosphere: *Annals of Glaciology*, 41(1), 147-154.
15. Petoukhov V. Semenov V.A. 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *Journal of Geophysical Research*, 115(D21), DOI: 201010.1029/2009JD013568
16. Ruzmaikin A. Feynman J. 2002. Solar influence on a major mode of atmospheric variability, *J. Geophys. Res.*, 107(D14), 4209, doi:10.1029/2001JD001239.
17. Soon, W. 2005. Variable solar irradiance as a plausible agent for multidecadal variations in the Arctic-wide surface air temperature record of the past 130 years, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16712, doi:10.1029/2005GL023429.
18. Szalai S., Auer I., Hiebl J., Milkovich J., Radim T. Stepanek P., Zahradnicek P., Bihari Z., Lakatos M., Szentimrey T., Limanowka D., Kilar P., Cheval S., Deak Gy., Mihic D., Antolovic I., Mihajlovic V., Nejedlik P., Stastny, P. Mikulova K., Nabyvanets I., Skyrýk O., Krakovskaya S., Vogt J., Antofie T., Spinoni J.: Climate of the Greater Carpathian Region. Final Technical Report: www.carpatclim-eu.org

19. Thejll P. Christiansen B. Gleisner H. 2003. On correlations between the North Atlantic Oscillation, geopotential heights, and geomagnetic activity Geophysical Research Letters, 30(6), 80-81. DOI:10.1029/2002GL016598
20. www.cpc.ncep.noaa.gov
21. www.arctic.noaa.gov