

A magyarországi szélsébség várható változása a XXI. század végére a PRUDENCE eredmények alapján

**SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNY ALAPSZAK
METEOROLÓGIA SZAKIRÁNY**



**Készítette: Dobor Laura
Témavezetők: Dr. habil. Bartholy Judit
Dr. Pongrácz Rita**

**Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudomány Intézet
Meteorológiai Tanszék**

Budapest, 2009.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Adatok	6
2.1. A PRUDENCE projekt	6
2.2. Az ECMWF ERA-40 reanalízis adatbázis	8
2.3. A szélökésesség paramétere	9
2.4. A szélirány paramétere	12
3. A szélviszonyok szimulációjának validálása az ERA-40 adatok alapján.....	13
4. A várható maximum szélsébség elemzése	20
4.1. Vizsgálati módszerek.....	20
4.2. A várható változás mértéke és területi eloszlása	21
4.3. A gyakorisági eloszlás módosulásának vizsgálata	26
4.4. Tercilisek vizsgálata	29
5. A várható szélirány vizsgálata.....	32
5.1. Vizsgálati módszerek.....	32
5.2. A szélirány gyakoriságának várható módosulása	33
5.3. Az uralkodó szélirány várható változása	36
6. Összefoglalás.....	39
Irodalomjegyzék	41
Köszönetnyilvánítás	44

1. Bevezetés

A népesség energiafelhasználása az elmúlt évtizedek során rohamosan növekedett, aminek súlyos környezetszennyezési következményei vannak. A világ villamos energia termelésének kb. 70%-át napjainkban is fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből fedezik (IPCC, 2008). A fenntartható fejlődés megtartására kézenfekvő megoldást kínál a megújuló energiaforrások nagyobb mértékben történő bevonása az energiatermelésbe. A megújuló energiaforrások olyan nem fosszilis energiaforrások, amelyek korlátlanul rendelkezésre állnak vagy folyamatosan újatermelődnek. Az egyre javuló technikai háttérnek, illetve az energiaárak folyamatos növekedésének köszönhetően a megújuló energiaforrások egyre nagyobb hányadát adják az energiatermelésnek, ezzel csökkentve a szennyezőanyagok kibocsátását, és lassítva a globális felmelegedés ütemét. A világ összes megújuló energiatermelése 2007-re elérte 240 GW-ot, ami 150%-a a 2004-es kapacitásnak (Hajdu, 2008). Az Európai Unió célkitűzései között szerepel a megújuló energia hányadának 20%-ra való növelése az egyes tagállamok energiatermelésében az elkövetkező évtizedben. Így hazánkban is egyre nagyobb figyelmet fordítanak a lehetőségek felmérésére. Magyarország összes megújuló energiaforrás készlete kb. 80 GW, melyből a gyakorlatban is kitermelhető energia értéke csupán 16-40 GW-ra becsülhető (Kardos és Fodor, 2006).

A szélenergia felhasználása ma már a megújuló energiák hasznosítása szempontjából is egyre jelentősebb szerepet játszik. 2007-re elérte a 94 GW-ot a világ szélenergia teljesítménye és becslések szerint 2016-ra elérheti akár a 360 GW-ot (IPCC, 2008). A szélenergia hasznosítása óriási turbinák telepítésével jár, amelyek szeles időben a szél által keltett mozgási energiát elektromos energiává alakítják. A szélesebb területi eloszlásának ismerete alapvető követelmény, ezért a megfelelő területek kiválasztásához szélatlászokat használnak (<http://www.windatlas.dk>). A beruházást gondos előkészítő munka előzi meg, mely során fel kell mérni gazdaságos-e az adott területre tervezett szélenergia park (Radics és Bartholy, 2001). Hazánkban az első két szélenergia Inota községben épült 2000-ben illetve Kulcs községben, 2001-ben. Napjainkban már összesen 63 szélenergia park működik, melyeknek összkapacitása 112 MW (MSZET, 2008). Az időben átlagolt szélesebbégeken alapuló potenciálisan kinyerhető energiamennyiség becslése mellett (Radics et al., 2003) ugyancsak fontos a széllökésesség figyelembevétele. A globális éghajlatváltozás hatással lehet a regionális szélléklímára is, ezért lényeges a rendelkezésre álló modellszimulációk alapján a szélesebbesség statisztikai paramétereinek elemzése.

E dolgozat célja, hogy Magyarország térségére becsléseket adjon a szélsébség irányának és nagyságának várható változására a XXI. század végére, amelyekhez klíma szimulációkat használtunk fel. Az eredmények segíthetik a jövőbeli tervezéseket, információt adhatnak arról, hogy hazánkban mely területek válhatnak potenciális szélenergia parkok helyszínévé.

A globális klímamodellezés során a Föld éghajlatának jelenlegi, múltbeli és jövőbeni állapotának paramétereit szimulálhatjuk. A hosszabb időtávra (több évtizedre) készülő előrejelzéseket, melyek során egy feltételezett éghajlati kényszerhez rendelünk hozzá egy adott klímaállapotot, feltételes prognózisoknak nevezzük. A legalapvetőbb légköri sugárzási kényszer azon szén-dioxid koncentráció lehetséges megváltozása, amely emberi tevékenységekre vezethető vissza. Az IPCC jelentések négy fő emisszió scenariót (A2, B2, A1, B1) alkalmaznak, melyek közül e dolgozatban az A2 és a B2 scenáriókkal foglalkozunk. Az A2 scenárió a helyi értékek megőrzését, a világ sokféleségének megmaradását tételezi fel. Az emberiség számának állandó, de lassú növekedésével számol. A gazdasági fejlődés és a technikai változások várhatóan minden földrajzi régióban érvényesülnek, de az összes forgatókönyv közül a leglassabban (IPCC, 2000). A B2 scenárió a felmerülő környezeti és társadalmi problémák regionális és helyi megoldását helyezi előtérbe. A Föld népességszáma várhatóan növekszik, de az A2 scenárió feltételezésénél lassabban. A gazdasági növekedés közepes gyorsasággal zajlik, a technológiai változások visszafogottabbak, ugyanakkor szerteágzóbbak, mint a másik három alapscenárió esetén. Az A2 scenárió 2100-ra várhatóan 850 ppm szén-dioxid koncentrációt feltételez, míg az optimistább B2 scenárió 625 ppm-et (IPCC, 2000).

A globális klímamodellek (GCM) kb. 100-250 km-es felbontása miatt csupán átlagos tendenciát mutathatnak a Föld egészét érintő változásokról. Kisebb térségek éghajlati módosulásai akár ellentétesek is lehetnek a globális modellek által szolgáltatott előrejelzésekkel, mivel a durva felbontása miatt a regionális jellemzők nem érvényesülhetnek a modellszimulációkban. A regionális klímamodellek (RCM) már finomabb felbontással rendelkeznek, így képesek mezoskálájú folyamatok és részletesebb orográfikus hatások leírására. A finomabb felbontás nagyobb számítási igényt is von maga után, így a regionális klímamodelleket korlátos tartományra és rövidebb időszakra, általában 30 évre futtatják (Giorgi, 1990). A regionális modellhez a globális modellből kapunk bemenő adatokat, ún. kezdeti- és peremfeltételeket.

Az utóbbi időben világszerte nagy erőfeszítéseket tettek a regionális klímamodellezés minőségének és megbízhatóságának javítása érdekében. A korábban megjelenő, nem

kellően koordinált előrejelzések helyett az V. és VI. EU-keretprogramban megjelentek az egész kontinenst magába foglaló szervezett projektek (PRUDENCE, STARDEX, MICE). A PRUDENCE (Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate) projekt keretében kilenc Európai Unió tagállamból összesen 21 egyetem, nemzeti meteorológiai szolgálat és kutatóintézet végzett Európa térségére regionális klímamodellezést az A2 és B2 scenárióra (<http://prudence.dmi.dk>).

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén néhány éve kezdődött a Kárpát-medence térségére vonatkozóan a PRUDENCE szimulációk elemzése (Bartholy et al., 2007a, 2007b, 2008a). Ezekbe a vizsgálatokba kapcsolódtam be. A futtatásokból rendelkezésre álló paraméterek közül a napi középhőmérséklet, a napi minimum- és maximum hőmérséklet, valamint a napi csapadékösszeg várható változásait Szabó (2007) vizsgálta. A hőmérséklet és a csapadék extrémumainak elemzésére is sor került (Bartholy et al., 2007c, 2008b, 2008c). Jelen dolgozat célja a PRUDENCE projekt Magyarország térségére szolgáltatott paramétereit közül a szellőkésesség várható változásának vizsgálata. A sugárzási paraméterek értékelése szintén folyamatban van (Miklós, 2008).

A továbbiakban először a PRUDENCE projektet, a résztvevő intézeteket, és az általuk használt regionális klímamodelleket ismertetjük röviden, majd áttérünk a hazánk területén valószínűsíthető szellőkésesség-változások elemzésére.

2. Az adatok

Ebben a fejezetben röviden áttekintjük a PRUDENCE projektre vonatkozó lényegesebb információkat és az elemzésre kerülő adatbázist.

2. 1. A PRUDENCE projekt

A projekt az Európai Unió V. keretprogram támogatásával 2001 és 2004 között valósult meg a Dán Meteorológiai Intézet vezetésével (Jens Hesselberg Christensen projektvezető közreműködésével), összesen 25 intézmény együttműködésével, melyek közül 11 szolgáltatott modellszimulációs eredményeket (Christensen et al, 2007a). A projektben résztvevő intézmények: Dán Meteorológiai Intézet (DMI), Brit Hadley Központ, Zürichi Műszaki Főiskola (ETH), KieLi Atomenergiahasznosító Hajóépítési Társaság (GKSS), Hamburgi Max Planck Intézet (MPI), Svéd Hidrometeorológiai Intézet (SMHI), Madridi Egyetem (UCM), Trieszti Nemzetközi Elméleti Fizikai Központ (ICTP), Norvég Meteorológiai Intézet (met.no), Holland Meteorológiai Intézet (KNMI), Francia Meteorológiai Szolgálat, Olasz Egyetemközi Szövetség (CINECA), Német Levegő- és Űrkutató Központ (DLR), Madridi Műszaki Egyetem, Dán Agrárkutató Intézet, Readingi Egyetem, Kelet-Angliai Egyetem, Finn Meteorológiai Szolgálat, Prágai Károly Egyetem, Fribourgi Egyetem, Finn Környezettudományi Intézet (SYKE), Dán Energiakutató Intézet (RISO), Svéd Lundi Egyetem, Nemzetközi Környezetkutató Központ (CIRED), Tel-Avivi Egyetem.

A projekt kitűzései a következők voltak (Christensen et al, 2007):

- Párhuzamosan több, nagy felbontású modell futtatása Európa egészére. A felhasznált globális modellek határfeltételeit és az alkalmazott légköri kényszerek változását előre egyeztetették.
- A regionális klímamodellek bizonytalanságainak meghatározása, az 1961-1990 időszakra adott modellszimulációk és referencia adatsorok összevetésével. Ezek után az egyes futtatások bizonytalanságai összehasonlíthatóak egymással, akár egy reprezentatív modell is kiválasztható.
- Elemezzék a finomfelbontású regionális modellekből nyert eredményeket a 2071-2100-as időszakra az A2, B2 emisszió scenáriókat alkalmazva.
- Az olyan extrém események jövőbeni gyakoriságának megváltozásáról nyerjenek információkat, melyek az emberre és a gazdasági helyzetre súlyos veszélyforrást je-

lenthetnek (pl. árvizek, aszályok, hőhullámok, erős vihartevékenységek valószínűsége)

- Az eredmények széles körben való terjesztése, különös tekintettel a döntéshozókra. Éghajlati forgatókönyvek felállításával segíteni a gazdasági, a társadalmi és a politikai döntések meghozatalát.

A regionális klímamodelleket két 30 éves időszakra futtatták le 50 km-es horizontális felbontással: az 1961-1990 közötti referencia időszakra és a 2070-2100 közötti jövőbeli időszakra. Az elsődleges célkitűzés az A2 scenárió vizsgálata volt, de néhány intézet kiegészítésként a B2 scenárióra is végzett szimulációkat. Alapvetően a Hadley Központ globális klímamodellje (HadAM3H, HadAM3P, HadCM3) (Rowell, 2005) szolgáltatta a kiindulási és peremfeltételeket a regionális klímamodellek számára. Néhány intézet több különböző globális modell által meghajtott szimulációt is közöl mind a jövőbeli, mind a referencia időszakra. Például a Francia Meteorológiai Szolgálat az ARPEGE (Déqué et al., 2003) modellt, a Dán és a Svéd Meteorológiai Intézet pedig a hamburgi ECHAM (Roeckner et al., 1996) globális modellt is alkalmazta.

Az európai kivágot a modellek az egyenlítői térségre transzformálták át, hogy kiküszöböljék a földrajzi fokhálózat okozta torzulásokat. A havi és évszakos mezőket a Kelet-Angliai Egyetem Éghajlatkutató Osztályán (Climatic Research Unit, <http://www.cru.uea.ac.uk/>) létrehozott referencia adatbázis (New et al., 1999) szabványos területére alakították át, míg a napi mezők az eredeti futási terület rácspontjai szerint vannak tárolva.

Az adatbázisok a PRUDENCE honlapjáról (<http://prudence.dmi.dk>) netCDF formátumban tölthetőek le napi, havi és évszakos felbontásban. A szimulációs idősorok az alábbi 24 paraméterre érhetőek el: (1) hőmérséklet 2 méteren (K), (2) csapadék (mm/nap), (3) teljes felhőfedettség (%), (4) párolgás (mm/nap), (5) hó-vízegyenérték (mm), (6) teljes lefolyás (mm/nap), (7) talajnedvesség (mm), (8) felszíni légnyomás (hPa), (9) tengerszíni légnyomás (hPa), (10) napi maximum hőmérséklet (K), (11) napi minimum hőmérséklet (K), (12) átlagos szél 10 méteres magasságban (m/s), (13) napi maximális szél 10 méteren (m/s), (14) átlagos szélirány 10 méteren (15) átlagos szél horizontális komponense 10 méteres magasságban, (16) átlagos szél meridionális komponense 10 méteres magasságban, (17) nettó rövidhullámú sugárzás (W/m^2), (18) lefelé irányuló rövidhullámú sugárzás (W/m^2), (19) lefelé irányuló hosszuhullámú sugárzás (W/m^2), (20) nettó hosszuhullámú sugárzás (W/m^2) (21) relatív nedvesség (%), (22) specifikus légnedvesség 2 méteren

(kg/kg), (23) a tengerjég vastagsága (mm), (24) harmatpont (K). A rendelkezésre álló paraméterek közül e dolgozatban a 10 méteres magasságra vonatkozó napi maximális szélesség és szélirány várható változását elemezzük.

A PRUDENCE projekten belül a modellszimulációk lefuttatása után sor került azok összehasonlító elemzésére. A projektben résztvevők a *Climatic Change* nemzetközi folyóirat különszámában publikálták a referencia időszakra vonatkozó futtatások hibáit (Jacob et al., 2007), valamint összehasonlították a jövőbeli időszakra adott eredményeket (Déqué et al., 2007). Elemezték a hőmérséklet és a csapadék várható változásait Európa területére (Christensen és Christensen, 2007), illetve az extrém indexek valószínűsíthető módosulásait (Beniston et al., 2007).

A projekt lezárása után, a közzétett modellfutattási eredmények felhasználásával a Kárpát-medencére is megtörtént a fenti paraméterek elemzése (Bartholy et al., 2007a, 2007c, 2008b).

2. 2. Az ECMWF ERA-40 reanalízis adatbázis

Az ERA-40 (ECMWF ERA-40 Re-Analysis) projekt egy olyan széleskörű nemzetközi együttműködés eredménye az Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központnál (ECMWF), amely keretében az egész Földre vonatkozóan rekonstruálták az elmúlt évtizedek meteorológiai paramétereit. Ennek köszönhetően az 1957-2002 időszakra rendelkezésre állnak a legfontosabb meteorológiai változók megbízható adatsorai a nemzetközi kutatócsoportok számára. Az adatbázis az 1957. szeptember 1. és 2002. augusztus 31. közötti időszak rácsponti értékeit 6 órás időlépcsővel (0, 6, 12, 18 UTC) tartalmazza (Gibson et al., 1997). A reanalízis mezőkben felhasznált rácshálózat az Egyenlítőre szimmetrikus és 1 fokos horizontális felbontású. Ezekhez a finomabb felbontású mezősorokhoz az Országos Meteorológiai Szolgálat segítségével jutottunk hozzá, de 2,5 fokos, durvább felbontásban az adatbázis egy része nyilvános szerveren keresztül is elérhető.

A meteorológiai változók 60 vertikális légnyomási szinten (a felszíntől egészen 65 km magasságig) való előállításához a lehető legtöbb mérési adat (felszíni megfigyelések, rádiószondás felszállások, repülőgépes adatok, radar- és műholdas mérések adatai stb.), illetve megbízható modell-előrejelzések kerültek felhasználásra. Annak érdekében, hogy az időjárási jelenségek minél nagyobb pontossággal leírhatóak legyenek, a magassági szintek fele az alsó 10 km-es tartományból kerül ki, ahol a meteorológiai folyamatok legnagyobb hányada zajlik (Kallberg et al., 2004).

Jelen a dolgozatban ebből az adatbázisból a horizontális és a meridionális szélkomponens hat órás felbontású idősorait használtuk fel az egyes modellek kontroll futtatásainak a validációjához.

2. 3. A széllekésesség

A napi széllekésesség egy, a szélsébsesség kifejezésére szolgáló paraméter, amely a szélsébsesség csúcsértékét adja meg a nap folyamán. A modellek néhány perces időlépcső szerint számítják, majd ezen értékek közül választják ki minden rácspontra az adott nap legnagyobb értékét. A maximumok megadása a földfelszíntől számított 10 méteres magasságban m/s mértékegységben történik.

A szélsébsesség maximumainak vizsgálatát az alábbi 10 magyarországi városra végeztük el: Budapest, Debrecen, Kalocsa, Miskolc, Mosonmagyaróvár, Pécs, Siófok, Szeged, Szolnok, Zalaegerszeg (1. ábra, 1. táblázat). A városokat a modellben szereplő rácshálózat pontjai közül a hozzájuk legközelebb eső rácspontok reprezentálják.



1. ábra: A vizsgált tíz hazai város földrajzi elhelyezkedése.

1.táblázat: A vizsgált városok földrajzi koordinátái.

Város	Földrajzi szélesség (É)	Földrajzi hosszúság (K)	Tengerszint feletti magasság (m)
Budapest	47°31'	19°02'	118
Debrecen	47°33'	21°37'	123
Kalocsa	46°31'	18°59'	92
Miskolc	48°08'	20°48'	118
Mosonmagyaróvár	47°53'	17°16'	121
Pécs	46°00'	18°14'	202
Siófok	46°55'	18°02'	108
Szeged	46°15'	20°06'	82
Szolnok	47°10'	20°12'	90
Zalaegerszeg	46°50'	16°51'	162

Az 2. táblázatban azon PRUDENCE projektben résztvevő intézetek szerepelnek, amelyek az Interneten elérhetővé tették a 10 méteres maximum szélességre vonatkozó adatokat. A táblázatban továbbá szerepelnek az egyes regionális modellek és azonosítóik, valamint a felhasznált globális modellek. Az elemzés során összesen 14 szimulációt vetünk figyelembe az A2 scenárióra, és 5 szimulációt a B2 scenárióra.

2. táblázat: A PRUDENCE projektben résztvevő azon intézetek, melyek a 10 méteres szellőkészségre szolgáltatott adatokat. Ezen modellek eredményeit elemzi jelen dolgozat.

	Intézet	Regionális modell	Globális modell	Szcenárió	Azonosító
1	Dán Meteorológiai Intézet (DMI)	HIRHAM (ensemble/1)	HadAM3H	A2	HS1
2		HIRHAM (ensemble/2)	HadAM3H	A2	HS2
3		HIRHAM	ECHAM5	A2	HS4
4		HIRHAM finom felbontású	HadAM3H	A2	S25
5	Brit Hadley Központ (HC)	HadRM3P (ensemble/1)	HadAM3P	A2, B2	adhfa, adhfd
6		HadRM3P (ensemble/2)	HadAM3P	A2	adhfe
7		HadRM3P (ensemble/3)	HadAM3P	A2	adhff
8	Hamburgi Max Planck Intézet (MPI)	REMO	HadAM3H	A2	3006
9	Svéd Hidrometeorológiai Intézet (SMHI)	RCAO	HadAM3H	A2, B2	HCA2, HCB2
10		RCAO	ECHAM4	A2, B2	MPIA2, MPIB2
11		RCAO finom felbontású	HadAM3H	A2	highresHCA2
12	Madridi Egyetem (UCM)	PROMES	HadAM3H	A2, B2	a2, b2
13	Norvég Meteorológiai Intézet (METNO)	HIRHAM	HadAM3H	A2, B2	HADA2, HADB2
14	Holland Meteorológiai Intézet (KNMI)	RACMO	HadAM3H	A2	HA2

2.4. Szélirány

A szélirány paramétere megadja, hogy melyik égtáj felől fúj a szél. Az általunk vizsgált modellszimulációk a szélirányt fokban adják meg, (-180°)-($+180^\circ$) között. Ahol a 0° az északi, a $+180^\circ$ és a -180° a déli irányt, a $+90^\circ$ a keleti irányt és a -90° a nyugati irányt jelöli. Egyes modellek a szélirányt 0° - 360° közötti tartományban adták meg, ezekben az esetekben is áttértünk a fent ismertetett egységes jelölésre.

A maximum szélességhez hasonlóan a szélirány esetén is letöltöttük a napi bontású szimulált adatsorokat az 1. ábrán látható városokhoz legközelebb eső rácspontra, mind az 1961-1990, mind a 2071-2100 időszakra.

3. táblázat: A PRUDENCE projektben résztvevő azon intézetek, melyek szolgáltatottak szélirány adatokat. Ezen modellek eredményeit elemzi jelen dolgozat.

	Intézet	Regionális modell	Globális modell	Szcenárió	Azonosító
1	DMI	HIRHAM (ensemble/1)	HadAM3H	A2, B2	HS1,HB1
2		HIRHAM (ensemble/2)	HadAM3H	A2	HS2
3		HIRHAM	ECHAM4/OPYC	A2, B2	ecsca2, ecscb2
4		HIRHAM	ECHAM5	A2	HS4
5		HIRHAM Extra finom fel- bontású	HadAM3H	A2	ECS
6	SMHI	RCAO	HadAM3H	A2	HCA2
7		RCAO	ECHAM4	A2, B2	MPIA2, MPIB2
8	KNMI	RACMO	HadAM3H	A2	HA2

A 3. táblázatban azon PRUDENCE projektben résztvevő intézetek szerepelnek, amelyek az Interneten elérhetővé tették a szélirányra vonatkozó adatokat. A táblázatban szerepelnek továbbá az egyes regionális modellek és azonosítóik, valamint a felhasznált globális modellek. Az elemzés során összesen nyolc szimulációt vettünk figyelembe az A2 forgatókönyvre és hármat a B2-re.

3. A szélviszonyok szimulációjának validálása az ERA-40 adatok alapján

Jelen fejezetben először a maximum szélesebbségre, majd a szélirányra vonatkozó referencia időszakra futtatott modellszimulációk értékeinek a beválását vizsgáljuk. Ehhez a szimulációk eredményeit az ERA-40 adatbázissal vetjük össze.

Az ERA-40 adatokból rendelkezésre álltak a szél horizontális (u) és meridionális (v) komponenseire a hat órás időlépcsővel készített reanalízis mezősorok az 1957-2002 időszakra, melyekből a vizsgálat kezdetén kiválasztottuk az összehasonlításához szükséges 1961-1990 közötti időszakot. További előkészületeket igényelt a két adatbázis eltérő felbontása. Míg az ERA-40 adatbázis 1° -os felbontású, a PRUDENCE projektben résztvevő intézetek által rendelkezésre bocsátott modellszimulációk $0,5^\circ$ -os felbontásúak (azaz a rácspontok kb. 50 km-re találhatók egymástól, míg az ERA-40 esetén ez a távolság mintegy 100 km). Azért, hogy ezt az eltérést kiküszöböljük, két szomszédos ERA-40-beli rácsponti érték- és nagyságrendi átlagát vettük figyelembe azon városok esetén, melyeknél azok közelebb estek a rácspontok felezőpontjához, mint magukhoz a rácspontokhoz. Miskolc, Pécs, Siófok, Szolnok és Zalaegerszeg esetén nem volt szükség interpolációra, mivel találtunk megfelelően kis távolságra ERA-40-beli rácspontot. A következő öt városra viszont el kellett végeznünk az említett interpolációt: Budapest, Debrecen, Kalocsa, Mosonmagyaróvár és Szeged. Debrecen az 1° -os felbontású rácshálózaton belül 4 rácsponttól is nagyjából azonos távolságra helyezkedik el, ezért Debrecen esetén az öt körülvevő négy rácsponti értéknek az átlagát vettük figyelembe.

A rácsponti értékek kiválasztása után a horizontális (u) és a meridionális (v) komponensekből az alábbi képlet felhasználásával képeztük a V eredő szélesebbséget:

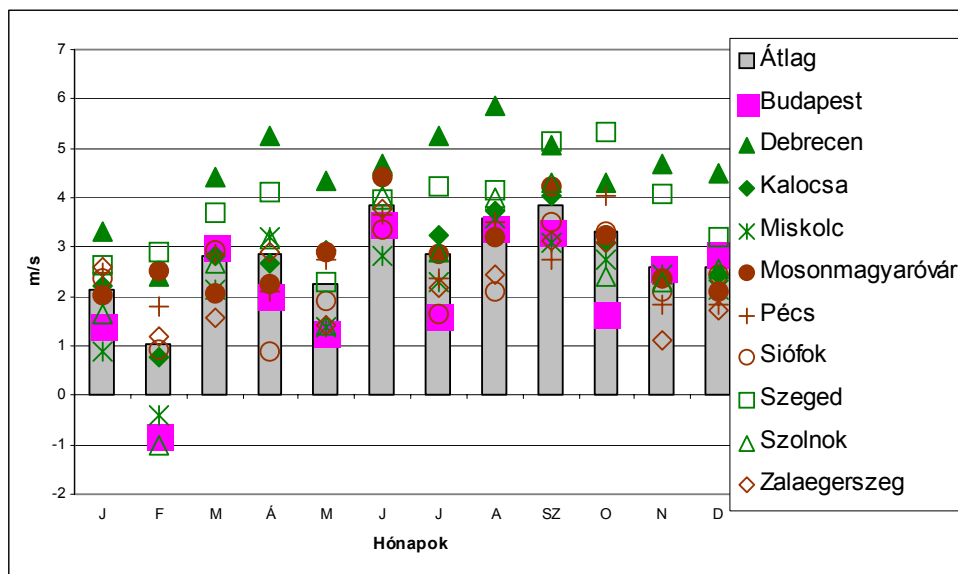
$$V = \sqrt{(u)^2 + (v)^2}$$

Végül a napi négy adat közül a maximális értéket választottuk ki, így a reanalízis adatbázis értékeit már össze tudtuk vetni a PRUDENCE projekt keretében a múltira futtatott modellszimulációk eredményeivel.

A 2. ábrán a referencia időszakra futtatott modellek átlagos eredményeit (azaz kompozitjait) havonta hasonlítjuk össze az ERA-40 adatbázis értékeivel mind a tíz rácspontra, illetve az országos átlagra. Zöld jelekkel az ország keleti felében fekvő városokat

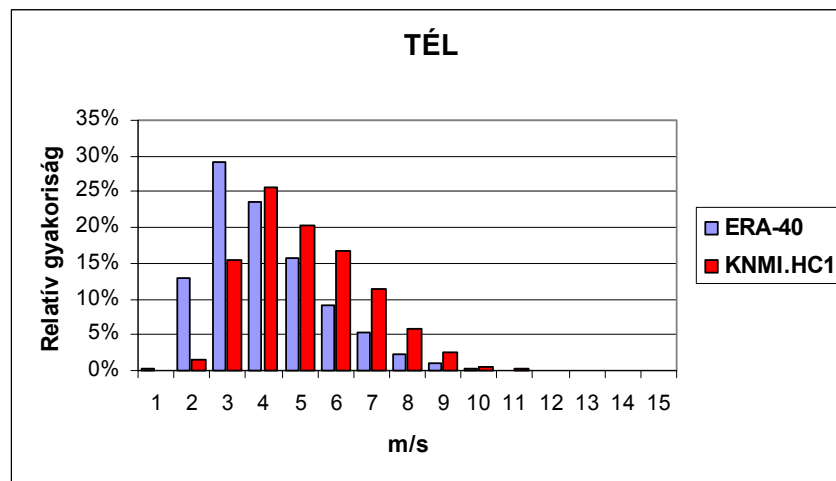
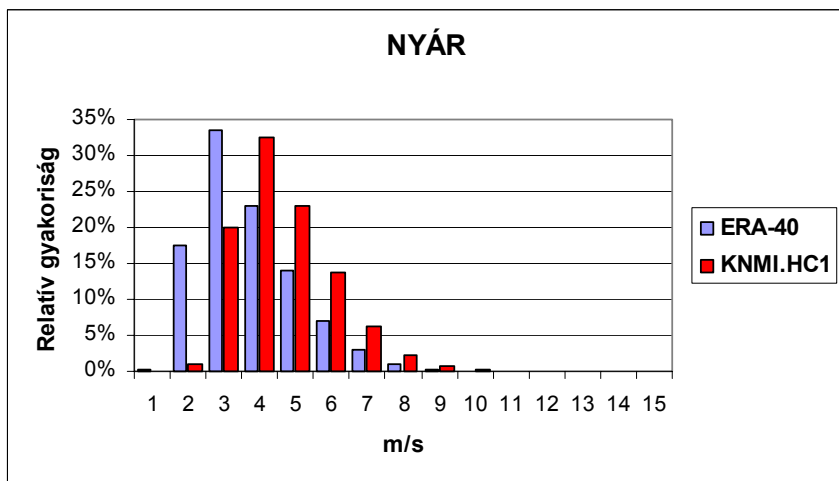
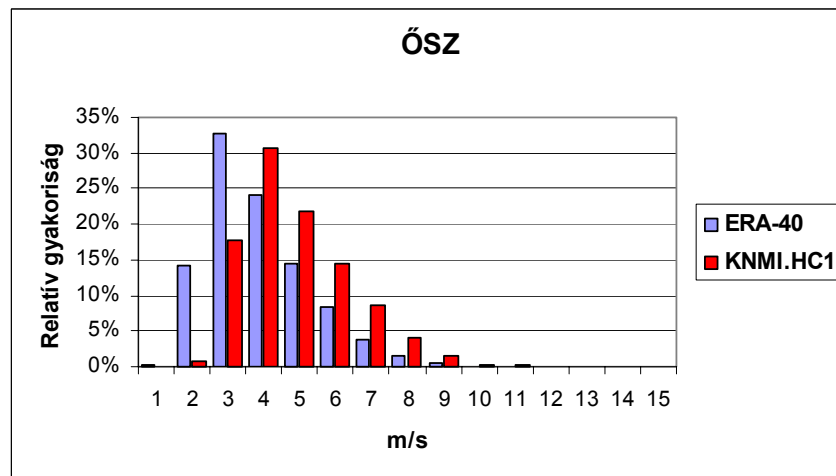
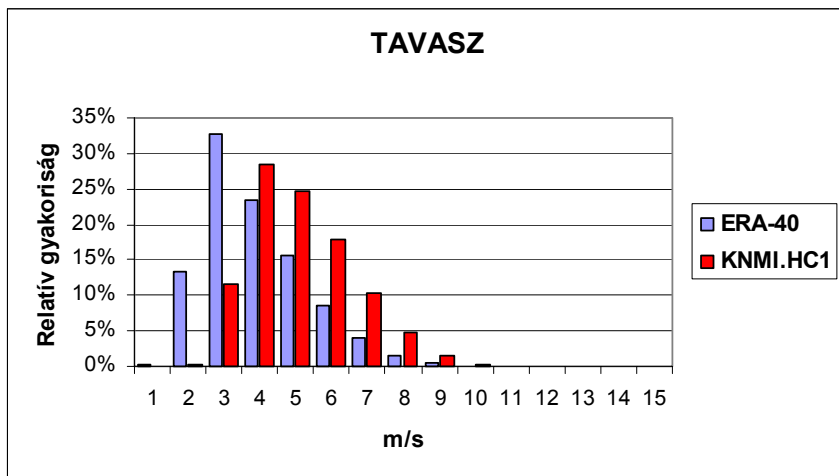
jelöltük és barna jelekkel a nyugati területeken elhelyezkedőket. Budapestet rózsaszínnel emeltük ki, mivel a főváros megközelítőleg az ország közepén fekszik.

Az összehasonlítást elvégezve megállapíthatjuk, hogy hazánk területén a rendelkezésre álló modellfuttatások szinte egész évben felül becslik a maximum szélességet az ERA-40 reanalízis adatbázishoz képest. A 2. ábrán jól látszik, hogy területi szétválasztást is tehetünk: a keleti városok esetén nagyobb a felülbecslés (kb. 3,5-5,5 m/s), főleg Debrecennél és Szegednél, míg a nyugati városok esetén ennek értéke alacsonyabb (kb. 1-3 m/s). Budapest esetén a különbség megközelítőleg az országos átlag alatt vagy annak mentén helyezkedik el. Országos átlagban a legnagyobb eltérés a referencia időszakra vonatkozó futtatások átlaga és az ERA-40 adatbázis között június, augusztus és szeptember hónapokra tehető (mely meghaladja a 3,5 m/s-ot), míg a legkisebb különbség a téli hónapokra, elsősorban februárra jellemző (ekkor mintegy 1 m/s az eltérés).



2. ábra: A maximum szélesség havi kompozitjainak eltérése az ERA-40 adatbázishoz viszonyítva, 1961-1990.

A következő vizsgálatban évszakonként meghatároztuk, hogy a szimulált adatsorok értékei közül hány esik az 1 m/s-os felbontású intervallumokba, majd a relatív gyakoriságokat oszlopdiagramokon ábrázoltuk. Mindezt az ERA-40 adatbázisra, a PRUDENCE projektben szereplő minden modellre, s modellenként mind a 10 városra elvégeztük. A 3. ábrán a maximum szélesség eloszlását egy konkrét modell példáján mutatjuk be az országos átlagra vonatkozóan, összevetve az ERA-40 adatbázis alapján előállított



3. ábra: Az 1961-1990 közötti maximum szélességek eloszlásának összehasonlítása az ERA-40 adatbázis és a Holland Meteorológiai Intézet szimulációi alapján.

napi maximum szélesebbesség eloszlásával. A hisztogramokról leolvasható, hogy a Holland Meteorológiai Intézet (KNMI) referencia időszakra végzett futtatásai minden évszakban felülbecsülik az ERA-40 adatbázis értékeit. (Hasonlóan, mint a modellek átlaga a 2. ábrán bemutatott, előző vizsgálatban.) A referencia időszakra futtatott modell esetén a legnagyobb gyakorisággal a 4-5 m/s nagyságú maximum szélesebbesség fordul elő, míg az ERA-40 adatbázis szerint a 3-4 m/s közötti napi maximum szélesebbesség értékek a leggyakoribbak. A téli hónapokban állnak ezek a csúcsok a legközelebb egymáshoz, ekkor a legkisebb a különbség a Holland Meteorológiai Intézet kontrollfuttatása és a reanalízis adatbázis között. Nyáron és tavasszal. A két adatsor eloszlása között a legnagyobb az eltérést nyáron és tavasszal kaptuk.

A szélirány esetén hasonlóan jártunk el az interpolációkat illetően, viszont itt a rendelkezésre álló két szélkomponensből (u , v) nem a szélesebbességet, hanem a szélirányt (α) határoztuk meg az 1961-1990 közötti időszakra, (-180°) - $(+180^\circ)$ között terjedő skálán az alábbi képlet alapján:

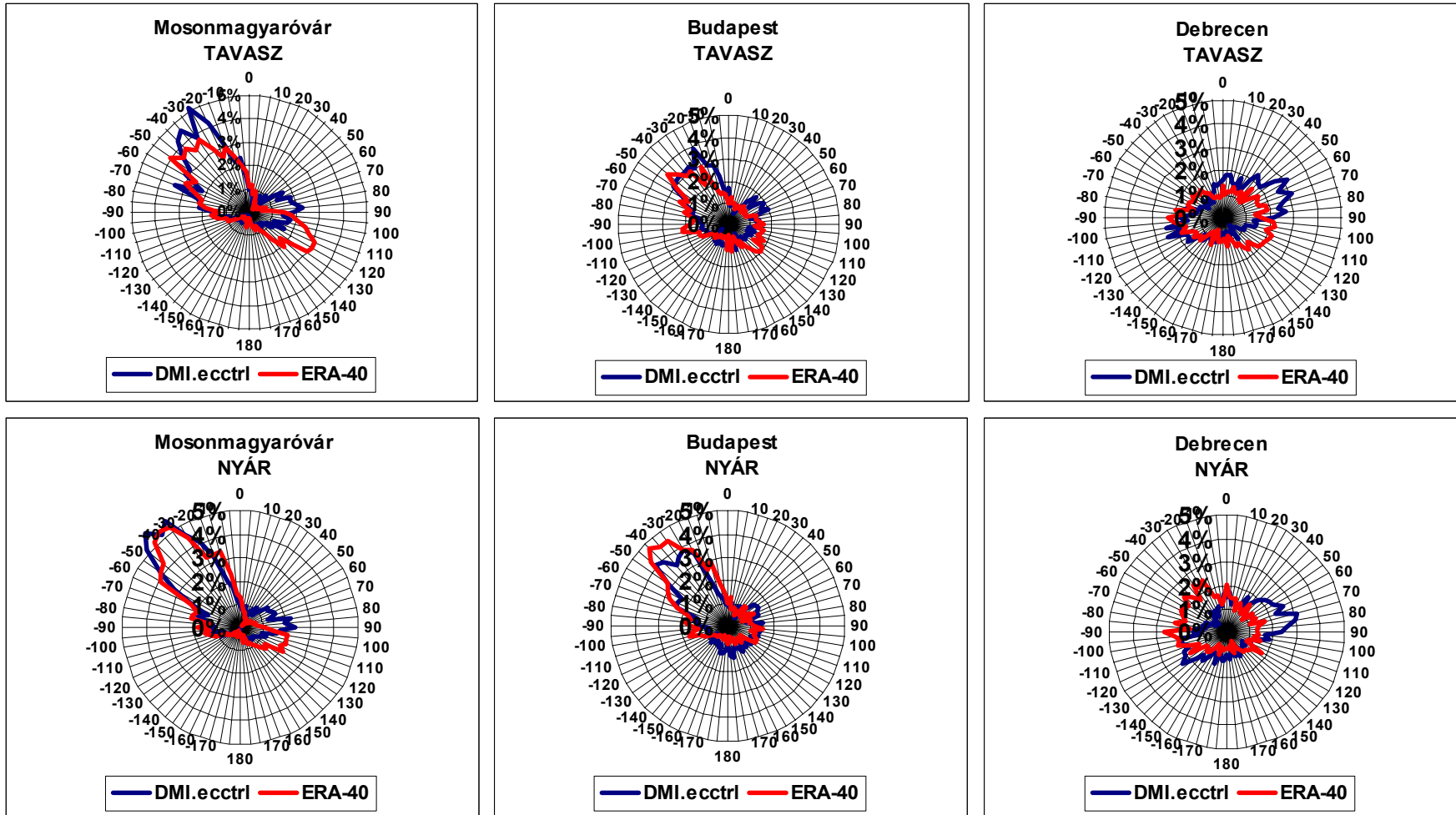
$$\alpha = \arctg\left(\frac{v}{u}\right)$$

Számításaink során a -180° és a $+180^\circ$ a déli, a 0° az északi, a -90° a nyugati és a $+90^\circ$ a keleti irányt reprezentálja. A napi négy szélirány adatból az adott napra vonatkozó maximális szélesebbesség irányát vettük csak figyelembe.

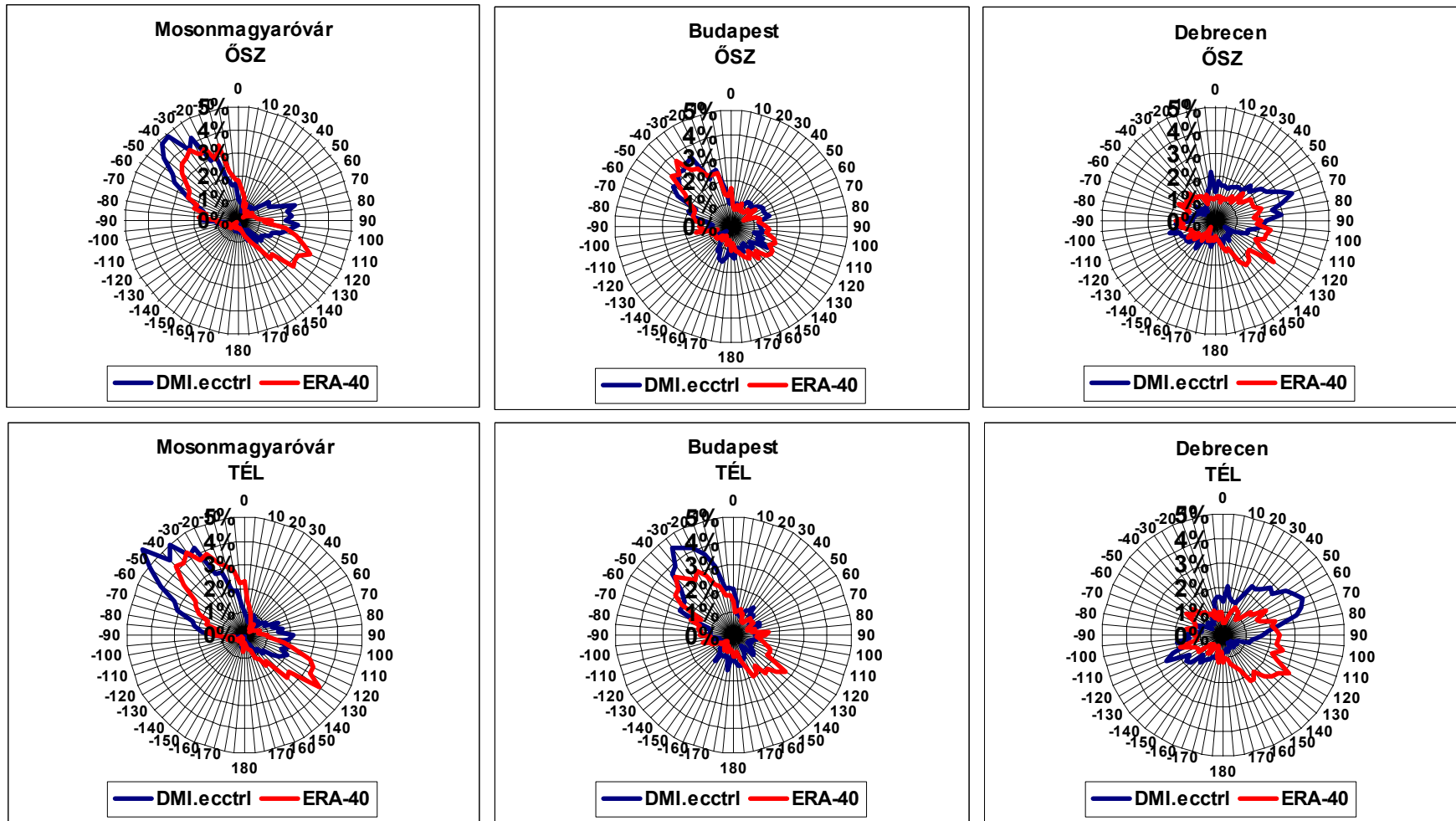
Az összehasonlító vizsgálat során az ERA-40 adatbázisra, minden modellre és minden rácspontra évszakonként meghatároztuk, hogy a szimulált adatsorok értékei közül hány esik az általunk meghatározott, 5° -os felbontású intervallumokba, majd a relatív gyakoriságokat szélrózsákon ábrázoltuk. A szélirány szimulációjának validálását egy, a referencia időszakra (1961-1990) futtatott modell példáján mutatjuk be. A 4. és az 5. ábrán bemutatott szélrózsákon a Dán Meteorológiai Intézet referencia időszakra futtatott adatsorának az eloszlását vetjük össze az ERA-40 adatbázis értékeinek az eloszlásával. Terjedelmi okok miatt a továbbiakban a tíz rácspont közül csupán három reprezentatív várost vizsgálunk: Budapestet, Mosonmagyaróvárt és Debrecent, azaz a fővárost, egy dunántúli és egy alföldi várost.

Budapest esetén a tél kivételével minden évszakban viszonylag jól követi a referencia időszakra vonatkozó adatsor az ERA-40 adatbázis eloszlását. Télen az északnyugati szélirányok gyakoriságát kissé felülbecsüli, míg a délkeleti irányok relatív gyakorisága kisebb. Mosonmagyaróvár esetén a második leggyakoribb széliránynak mind a négy évszakban keleties irányt szimulál a Dán Meteorológiai Intézet modellje, míg az ERA-40 adatbá-

zisban ez inkább délkeleties. A leggyakoribb szélirány a téli hónapokat kivéve kisebb szög és gyakoriság eltérésekkel megegyezik az év során a két adatbázis eloszlásában. Debrecen esetén az uralkodó szélirány relatív gyakorisága nem haladja meg a 3-4%-ot egyik évszakban sem. Összességében a Dán Meteorológiai Intézet leginkább keleties, északkeleties és nyugatias, délnyugatias szeleket becsül 1961-1990 közötti időszakra, míg ősszel és télen az ERA-40 adatbázisban keleties, délkeleties uralkodó szélirány szerepel. Mind a három város esetén tavasszal és nyáron a legkisebb a különbség a referencia időszakra futtatott adatok és az ERA-40 értékei között. Mosonmagyaróváron és Budapesten a tél kivételével egész évben jól illeszkedik a Dán Meteorológiai Intézet adatsora az ERA-40 adatbázisban szereplő markáns uralkodó szélirányokra.



4. ábra: A Dán Meteorológiai Intézet (DMI) referencia időszakra (1961-1990) szimulált szélirány gyakoriságainak összehasonlítása az ERA-40 reanalízis adatbázissal tavasz és nyár esetén, három kiválasztott rácspontra.



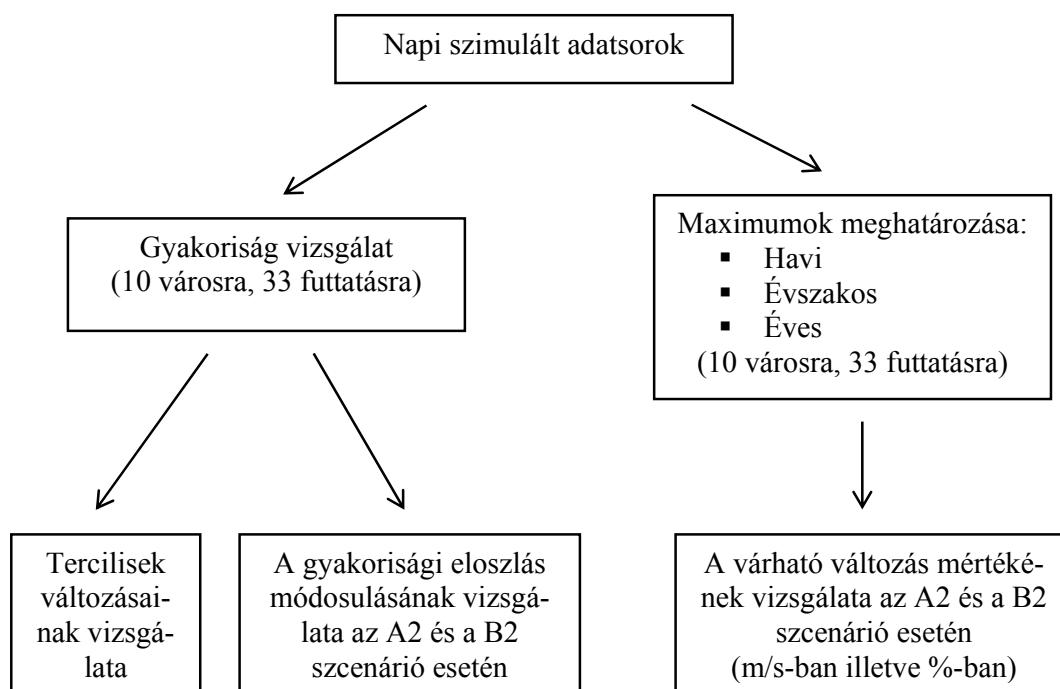
5. ábra: : A Dán Meteorológiai Intézet (DMI) referencia időszakra (1961-1990) szimulált szélirány gyakoriságainak összehasonlítása az ERA-40 reanalízis adatbázissal őszi és téli esetén, három kiválasztott rácspontra.

4. A várható maximum szélsőesség elemzése

A napi bontású szimulált adatsorok letöltése után kiválasztottuk a vizsgálni kívánt 10 rácspontot, amelyek az ország területén közel egyenletesen helyezkednek el. Az adatsorokat két intervallumra töltöttük le, a referencia időszakra (1961-1990) és a jövőbeni időszakra (2071-2100) mindkét scenárióra (A2 és B2). Ezen dolgozat célja a jövőre vonatkozó különböző emisszió scenáriók alapján készült becslések összehasonlítása a referencia időszak futtatásaival.

4.1. Vizsgálati módszerek

A napi adatokból havi és évszakos maximumokat képezve bemutatjuk a széllökésesség havi és évszakos várható változásait, a 10 várost reprezentáló rácspontokra és átlagosan az ország egészére (6. ábra). Elemezzük a kontroll időszakhoz képest a maximumok, a minimumok és a kvartilisek eltolódását mind az A2, mind a B2 scenárió esetén. Megvizsgáljuk továbbá, hogy az egyes évszakokban a modellek hány százaléka ad szélsőesség-növekedést, illetve -csökkenést.



6. ábra: A maximális szélsőességek szimulált adatsoraira végzett vizsgálatok folyamatábrája.

4.2. A várható változás mértéke és területi eloszlása

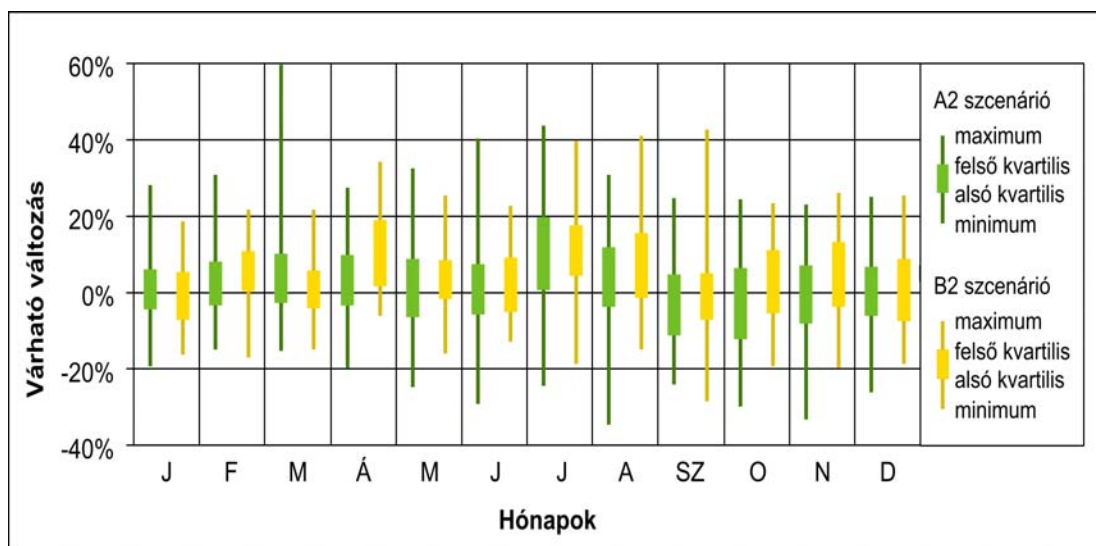
A szimulált napi szélesebbesség adatokból számolt várható havi átlagos változások kompozitjait vizsgálva januárban és a szeptemberben mindkét scenárió esetén számíthatunk kis mértékű csökkenésre a referencia időszakhoz képest. A legnagyobb mértékű növekedés februárban, áprilisban és júliusban valószínűsíthető. Április esetén a B2, július esetén az A2 scenáriót figyelembe vevő modellfuttatások átlagai prognosztizálnak nagyobb, kb. 1-1,5 m/s-os széllökésesség növekedést. A maximum szélesebbesség évszakos várható változásait tekintve, nyáron, tavasszal és kis mértékben télen növekedésre számíthatunk, mely nyáron a legnagyobb mértékű. Elemzéseink alapján ősszel csupán az A2 scenárió esetén feltételezhető csökkenés. A 4. táblázatban azt vizsgáljuk, hogy évszakonként az egyes forgatókönyveket érintő összes modellszimulációs eredmény közül (A2 scenárió: 450 db, B2 scenárió: 150 db) hány esetben várható szélesebbesség növekedés, illetve csökkenés a referencia időszakhoz képest (CTRL). A 450 A2-re vonatkozó szimulációs érték, és a 150 B2-re vonatkozó érték mind a 10 várost reprezentáló rácspont összes havi várható változását foglalja magába. A 4. táblázat első két oszlopa alapján az A2 scenárió esetén ősszel várhatóan nagyrészt csökkenni fog a széllökésesség a referencia időszakhoz viszonyítva, míg a másik három évszakban inkább növekedni. A második két oszlop alapján a B2 scenárió esetén mind a négy évszakban túlnyomóan szelerősödéssel számíthatunk. Mindkét scenárióra legnagyobb százalékban nyárra várható növekedés.

4. táblázat: A vizsgált modellek (A2 scenárió: 450 db, B2 scenárió: 150 db) által 2071-2100-ra prognosztizált évszakos tendenciák a széllökésességre hazánk területén.

	A2 > CTRL	A2 < CTRL	B2 > CTRL	B2 < CTRL
Tavaszi	259 (58%)	191 (42%)	108 (72%)	42 (28%)
Nyár	283 (63%)	167 (37%)	111 (74%)	39 (26%)
Ősz	184 (41%)	266 (59%)	79 (53%)	71 (47%)
Tél	262 (58%)	188 (42%)	90 (60%)	60 (40%)

Térjünk át az egyes scenáriók referencia időszakhoz vett eltéréseinek százalékos vizsgálatára. Először minden modellre képeztük a jövőre és a múltira szimulált havi átlag széllökésesség értékek különbségét, majd ennek relatív mértékét határoztuk meg a referencia időszakhoz viszonyítva. Az így kapott havi várható változásokból számítottuk ki a jel-

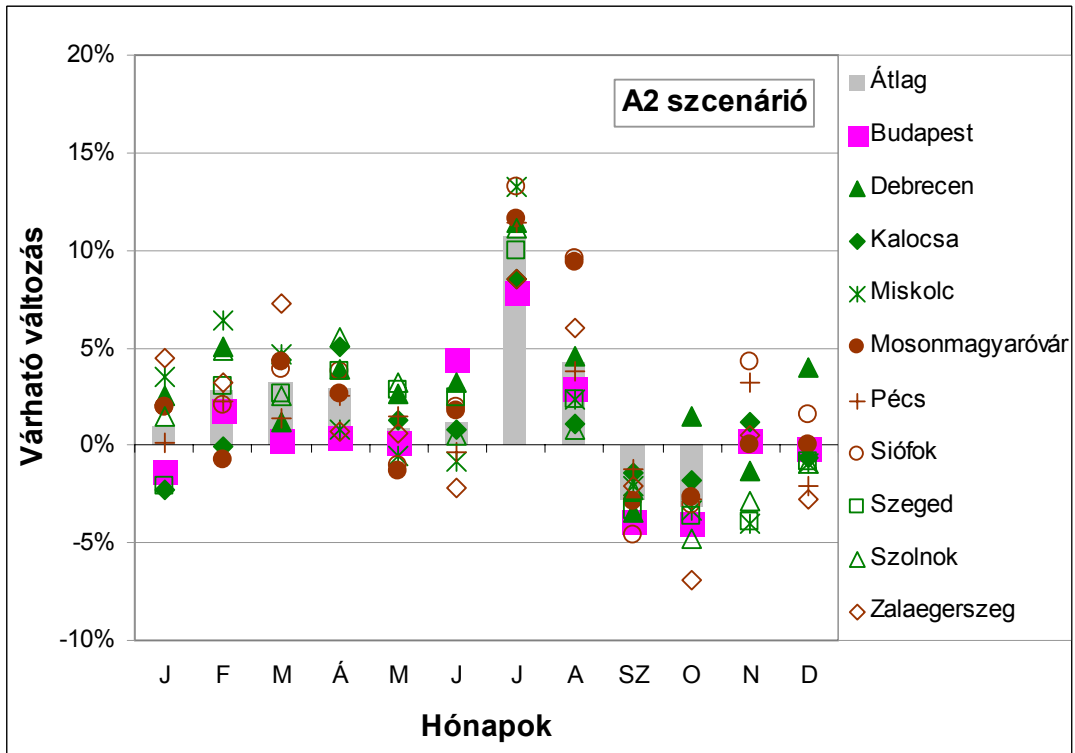
lemző statisztikai karakterisztikákat: a maximumot, a minimumot, valamint a felső és az alsó kvartilist. Eredményeinket a 7. ábrán jelenítjük meg.



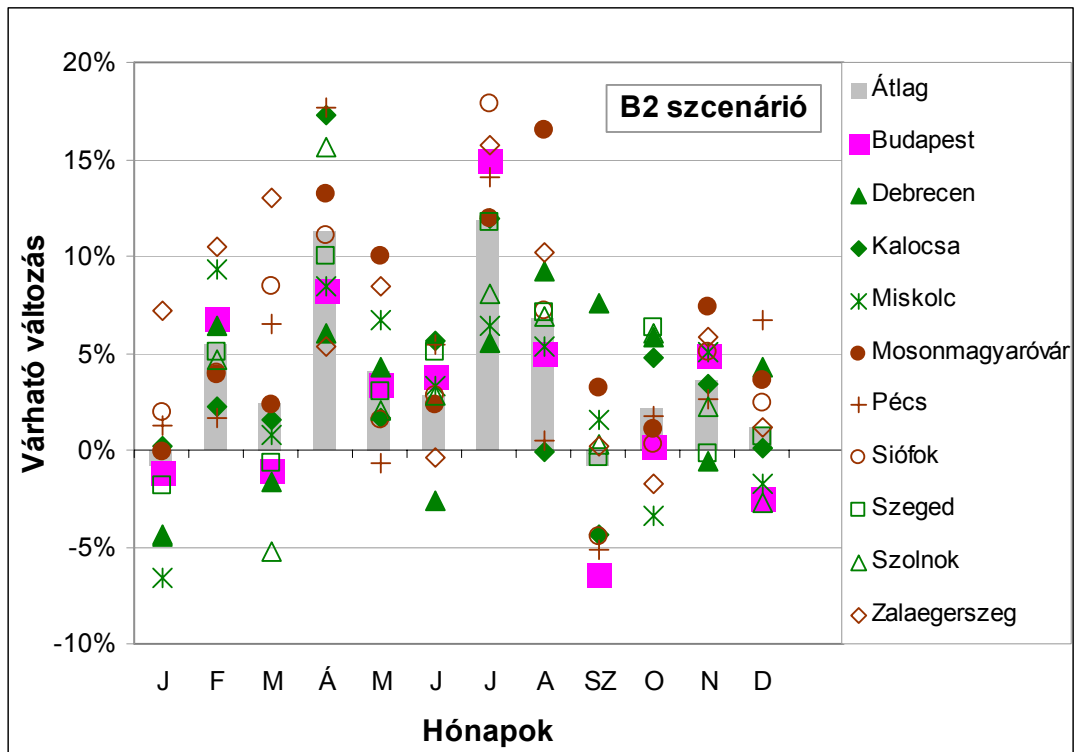
7. ábra: Az A2 és a B2 scenáriók referencia időszakhoz viszonyított változásai.

A vastag függőleges vonalak vége jelenti az adott hónapra jellemző maximális és minimális várható változást. Az egyes téglalapok alsó és felső lapja pedig rendre az alsó és felső kvartiliseket jelöli, azaz a téglalap által kijelölt változási intervallumba esik a modellszimulációk fele. Ha a kis téglalap a 0%-nál egyértelműen feljebb vagy lejjebb helyezkedik el, akkor a várható csökkenés illetve növekedés nagyobb valószínűségűnek tekinthető. Például februárban, áprilisban és júliusban a B2 scenárió esetén többnyire a szélső növekedésre számíthatunk, mely júliusban a legnagyobb. Az A2 scenárió esetén csak júliusban valószínűsíthető túlnyomóan növekedés. Márciusban a referencia időszakhoz viszonyított legnagyobb várható változás akár a 60%-ot is elérheti.

Következő lépésben a várható változások területi eloszlásával foglalkozunk. A 8. és a 9. ábra az általunk vizsgált két emisszió scenárióra vonatkozó várható változásokat mutatja be a tíz kiválasztott városra. Az országos átlag szürke oszlopokkal szerepel a háttérben, a zöld jelek hazánk keleti felét (Kalocsa, Szeged, Szolnok, Miskolc, Debrecen), a barna jelek pedig a nyugati felét (Mosonmagyaróvár, Zalaegerszeg, Siófok, Pécs) reprezentálják. Budapestet rózsaszínnel emeltük ki, mivel az ország közepén található és nem soroltuk be az előbbi csoportosítások egyikébe sem.



8. ábra: A maximum szélesség 2071-2100-ra várható havi változása, a 10 vizsgált városra az A2 szcenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990).



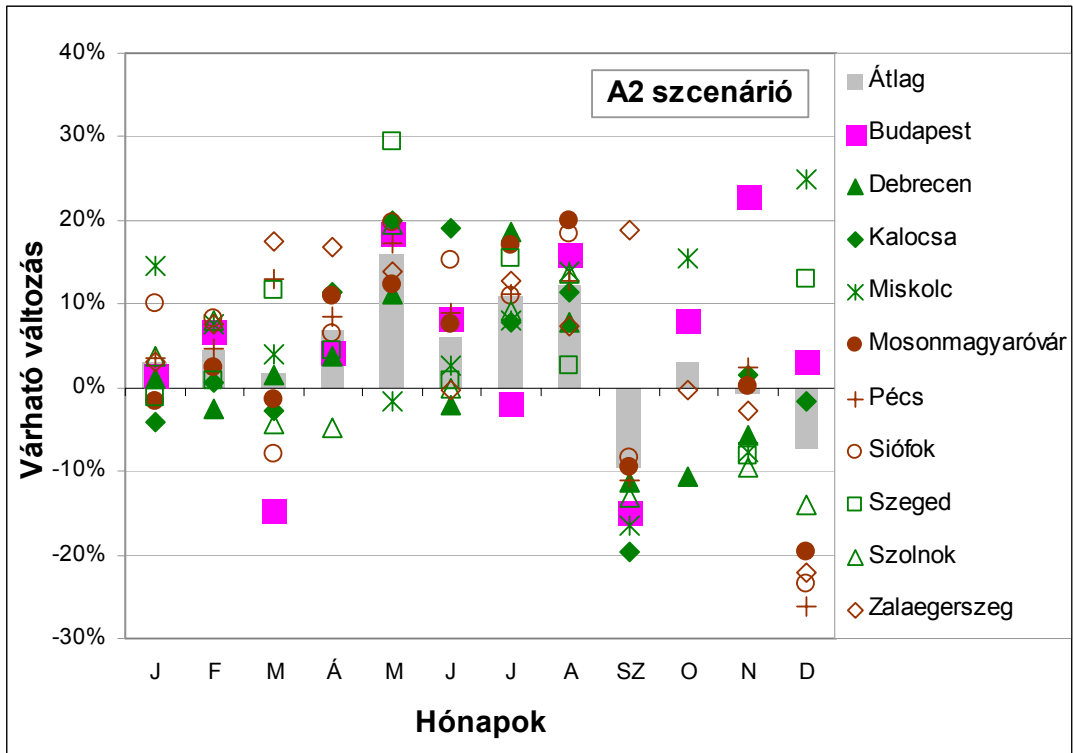
9. ábra: A maximum szélesség 2071-2100-ra várható havi változása, a 10 vizsgált városra a B2 szcenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990).

Az A2 scenáriót vizsgálva (8. ábra), megállapíthatjuk, hogy a tavaszi és nyári hónapokban (leginkább júliusban) várhatóan növekszik a széllökésség mértéke, szeptemberben és októberben viszont néhány százalékos csökkenés valószínűsíthető. A szélsőbesség várható csökkenése inkább a nyugat-magyarországi városokra jellemző, tehát keleten számíthatunk inkább a növekedésre. Debrecenben például szeptember kivételével várhatóan egész évben nő a szélsőbesség. Budapest általában nem a szélsőértékek közelében helyezkedik el, a tavaszi és téli hónapokban szinte semmilyen változás nem prognosztizálható.

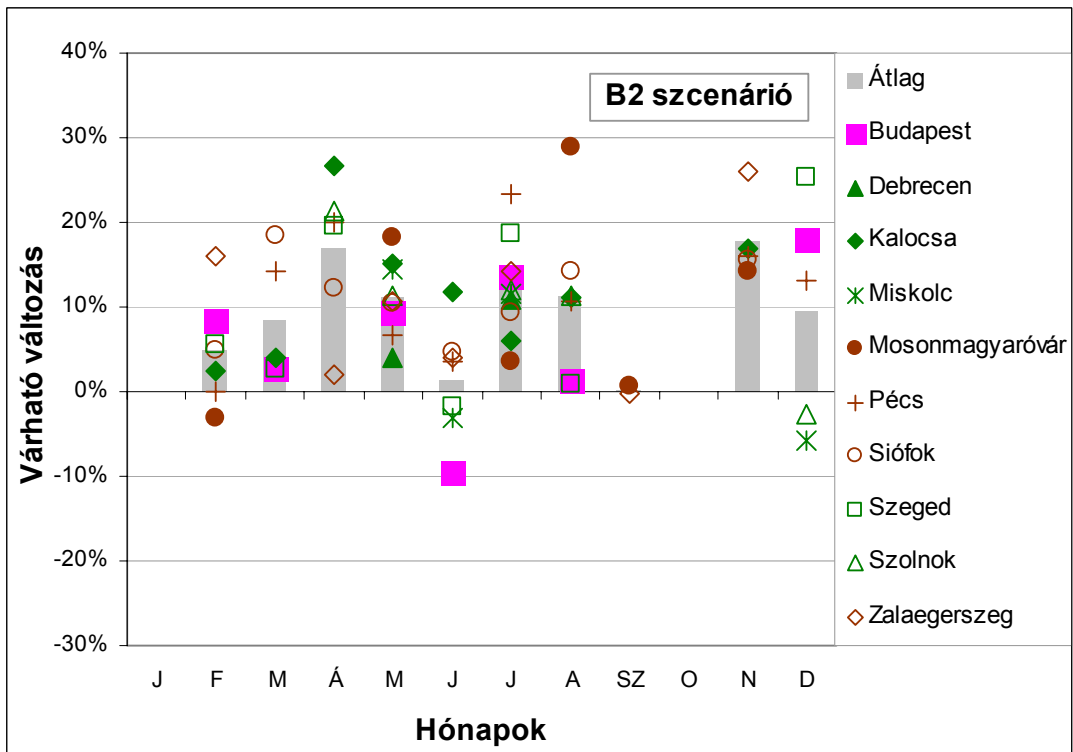
A B2 scenárió esetén (9. ábra), észrevehetjük, hogy nagyobb különbségek adódnak a városok között, illetve a becsült változás maximuma már nem 5-13% körüli, mint az A2 esetén, hanem 10-18%. Ez azt jelenti, hogy a B2 scenárió nagyobb mértékű változást mutat a maximum szélsőbességben. Átlagosan majdnem minden hónapban növekedést feltételezhetünk, de az A2-vel ellentétben, egyáltalán nincs olyan hónap, ahol jelentős mértékű csökkenéssel számolhatnánk. A Budapestre várható átlagos havi változások a B2 scenárió esetén nagyobb változékonyságúak, mint az A2 esetében. Várhatóan júliusban lesz a legnagyobb a növekedés, és szeptemberben a legnagyobb a csökkenés. A területi változékonyság itt is nagy, január, február és március hónapokban keleten szélsőbesség-növekedésre, nyugaton szélsőbesség-csökkenésre számíthatunk. Mosonmagyaróvárt és Siófokot kiemelve láthatjuk, hogy ezekben a rácsponatokban minden hónapban növekedés prognosztizálható.

Mindezek után Welsh-próba alkalmazásával szignifikancia vizsgálatot végeztünk. A 10. és 11. ábra kizárólag csak a 95%-os szinten szignifikáns várható változások figyelembevételével készült. A várható relatív változások értékei mindkét scenárió esetén nagyobbak lettek, mivel a diagramok a nem szignifikáns értékeket már nem tartalmazzák.

Az A2 scenárió esetében megállapíthatjuk, hogy az országos átlagot figyelembe véve januárban, februárban, májusban, októberben és a nyári hónapokban a maximum szélsőbesség szignifikáns növekedésére számíthatunk a XXI. század végére. Ennek mértéke várhatóan májusban, júliusban és augusztusban lesz a legnagyobb, kb. 12-20%. Szeptemberben Zalaegerszeg kivételével az összes város esetén 10-20%-os szignifikáns csökkenésre kell számítani. Decemberben rendkívül nagy a területi változékonyság, az ország nyugati részén 20-21%-os csökkenés várható, míg a keleti területekre eső városok közül van olyan, ahol 10-20%-os növekedésre számíthatunk.



10. ábra: A maximum szélesség 2071-2100-ra 95%-os szinten szignifikáns várható havi változása a 10 vizsgált városra, az A2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990).



11. ábra: A maximum szélesség 2071-2100-ra 95%-os szinten szignifikáns várható havi változása a 10 vizsgált városra, a B2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)

Áttérve a B2 scenárió alapján készült modellfuttatások szignifikáns várható változásaira (11. ábra), megállapíthatjuk, hogy januárban és októberben egyik modell sem prognosztizált egyik városra sem szignifikáns változást. Szeptemberre is csak két, az ország nyugati felében elhelyezkedő városra becsült változások tekinthetők 95%-os szinten szignifikánsnak, s az országos átlagos változás ez esetben sem szignifikáns. Az országos átlagokat figyelembe véve az év során egyik hónapban sem számíthatunk a maximális szélsőség csökkenésére. A legnagyobb növekedés várhatóan április, május, július és november hónapokban következik be. November hónapban figyelembe kell venni, hogy csupán négy város esetén prognosztizálnak a modellek szignifikáns növekedést. Májusban és júliusban viszont az összes város esetén 5-20%-os maximális szélsőség növekedés várható 2071-2100-ra a referencia időszakhoz képest.

4.3. A gyakorisági eloszlás módosulásának vizsgálata

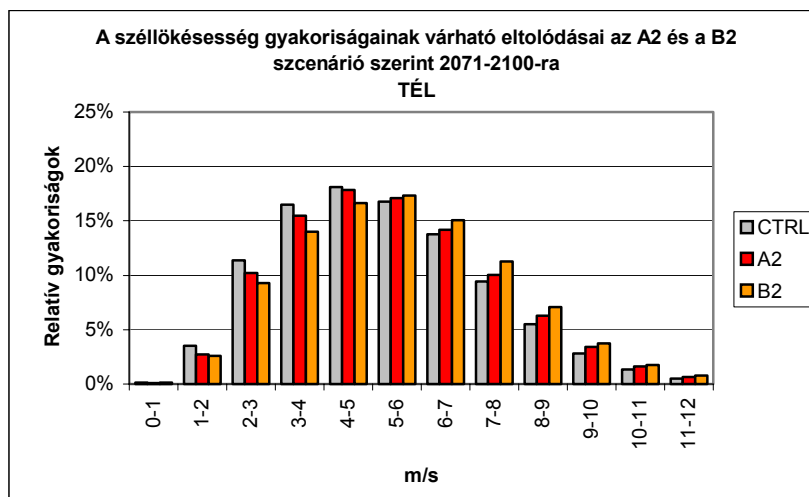
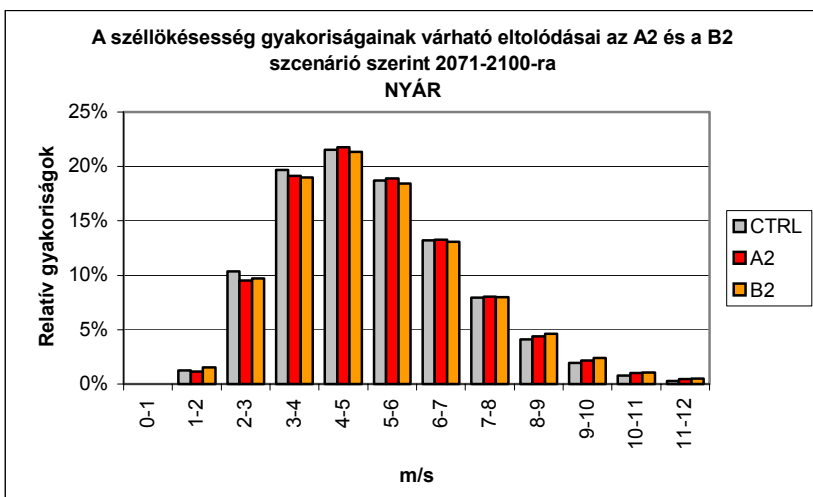
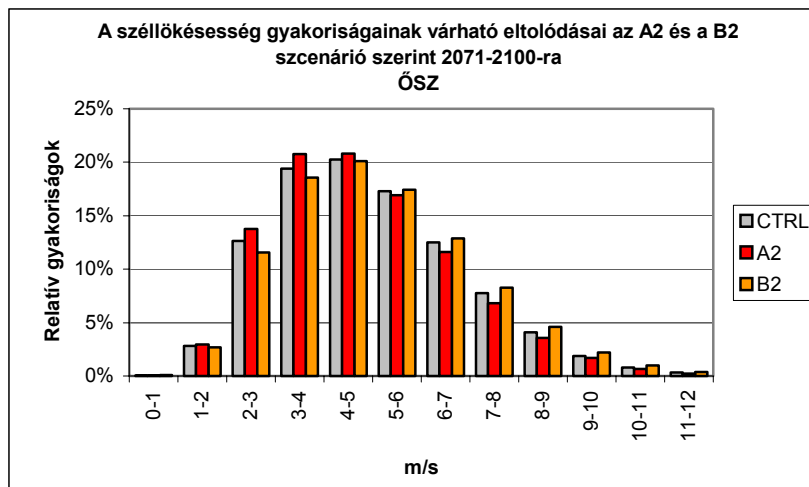
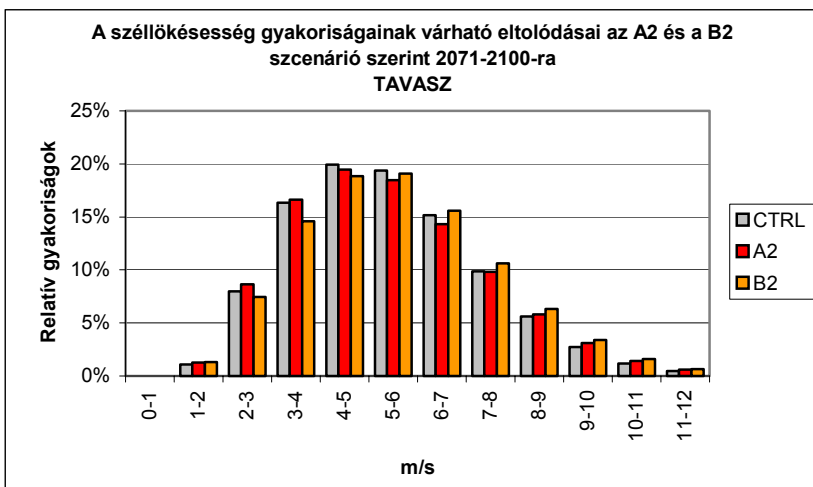
A gyakoriság vizsgálatok során először minden modell esetében, illetve mind a 10 városra meghatároztuk évszakonként, hogy a szimulált adatsorok értékei közül hány esik az 1 m/s felbontású intervallumokba. Majd a relatív gyakoriságokat évszakonként ábrázoltuk oszlopdiaqramon és összevetettük mind az A2, mind a B2 scenárió alapján készített előrejelzéseket a referencia időszak relatív gyakoriság eloszlásával. Minden modellre országos átlagot számoltuk, majd kiátlagoltuk külön a 15 A2 és az 5 B2 scenárióra végzett, illetve a hozzájuk tartozó, referencia időszakra vonatkozó modellfuttatások évszakai relatív gyakoriságait is. A 12. ábra négy diagramján a fentiek szerint előállított átlagos relatív gyakoriságokat ábrázoltuk, amely alapján megállapítható, hogy 2071-2100-ra a hazai szél-
lökésségben milyen évszakai változások valószínűsíthetőek az 1961-1990-es referencia időszakhoz viszonyítva.

Először a maximum szélsőség évszakai eloszlásait összevetve egymással, megállapítható, hogy nyáron és ősszel a kisebb szélsőségek gyakorisága nagyobb, tehát ritkábban fordul elő 6-12 m/s erősségű széllelés. Ellenben télen és tavasszal 3-6 m/s közötti intervallumokban a relatív gyakoriság sehol nem éri el a 20%-ot, viszont a 6-12 m/s-os erősebb széllelésségek gyakorisága nagyobb. Tehát télen és tavasszal erősebb széllelések fordulnak elő, mint nyáron és ősszel; ez az éves eloszlás 2071-2100-ra is várhatóan hasonló marad a hisztogramok alapján.

A következőkben évszakonként megvizsgáljuk, hogy az A2 és a B2 scenárió szerint készült modellfuttatások alapján milyen változásokra számíthatunk a referencia idő-

szakhoz képest. Tavasszal mindkét scenárió az erősebb szélökések (7-12 m/s) gyakoriságának növekedését jelzi előre, míg a gyengébb szélebségek gyakoriságát illetően a B2 scenárió szerint kb. 3%-os csökkenésre, az A2 scenárió szerint kis mértékű (kb. 1%-os) növekedésre számíthatunk. A nyári hónapokban a 2-4 m/s-os maximum szélebségek gyakorisága várhatóan csökkenni, míg a 8-10 m/s-os szélebségek száma kis mértékben növekedni fog 2071-2100-ra (a B2 scenárió szerint nagyobb mértékben, mint az A2 scenárió szerint) a referencia időszakhoz képest. Ebben az évszakban számíthatunk a legkisebb mértékű változásra a gyakoriságok eloszlásában. Mind a referencia időszakban, mind a várható jövőben a szélebségek kb. 60%-a esik 3-6 m/s-os intervallumba, kisebb a gyakorisága az erősebb szélökéseknek, mint a többi évszakban. Az őszi negyedévre a két scenárió eltérő változásokat jelez előre a gyakoriságok eloszlásában. A B2 scenárió szerint a maximum szélebség gyakoriságai várhatóan a nagyobb sebességek irányába tolnak el. Tehát a referencia időszakhoz képest 2071-2100-ra az 1-5 m/s-os sebességekre kisebb valószínűséggel, míg 5-12 m/s sebességekre nagyobb valószínűséggel számíthatunk. Ennek az eltolódásnak a mértéke a B2 scenárió esetén összesen kb. 2%-os. Az A2 scenárió alapján készült modellfuttatások szerint viszont a maximum szélebségek valamivel jelentősebb, összesen kb. 3%-os csökkenésére kell számítanunk. A téli hónapokban mutatkozik meg a leghatározottabban a gyakoriság eloszlásának eltolódása az erősebb szélökésességek felé. Ebben az évszakban várhatóan az 1-5 m/s-os szélebségek gyakorisága az A2 scenárió szerint 3%-kal, míg a B2 scenárió szerint 7%-kal csökken. Ezzel együtt az 5-12 m/s-os, erősebb szélebségek gyakoriságának ugyanekkora mértékű csökkenésére számíthatunk.

Összefoglalva a fenti részletes elemzést megállapíthatjuk, hogy 2071-2100-ra tavasszal, nyáron és télen a szélökésesség gyakoriságának eloszlása várhatóan az erősebb szélebségek irányába tolik el mind az A2, mind a B2 scenáriókat tekintő modellfuttatások szerint. Ősszel a B2 scenárió szerint valószínűleg szintén a magasabb értékek felé tolik el az eloszlás, viszont az A2 scenárió szerint a kisebb szélebségek gyakoriságának növekedésére kell számítani a XXI. század végére. A téli hónapokban várható a szélökésesség legnagyobb mértékű erősödése a referencia időszakhoz képest.



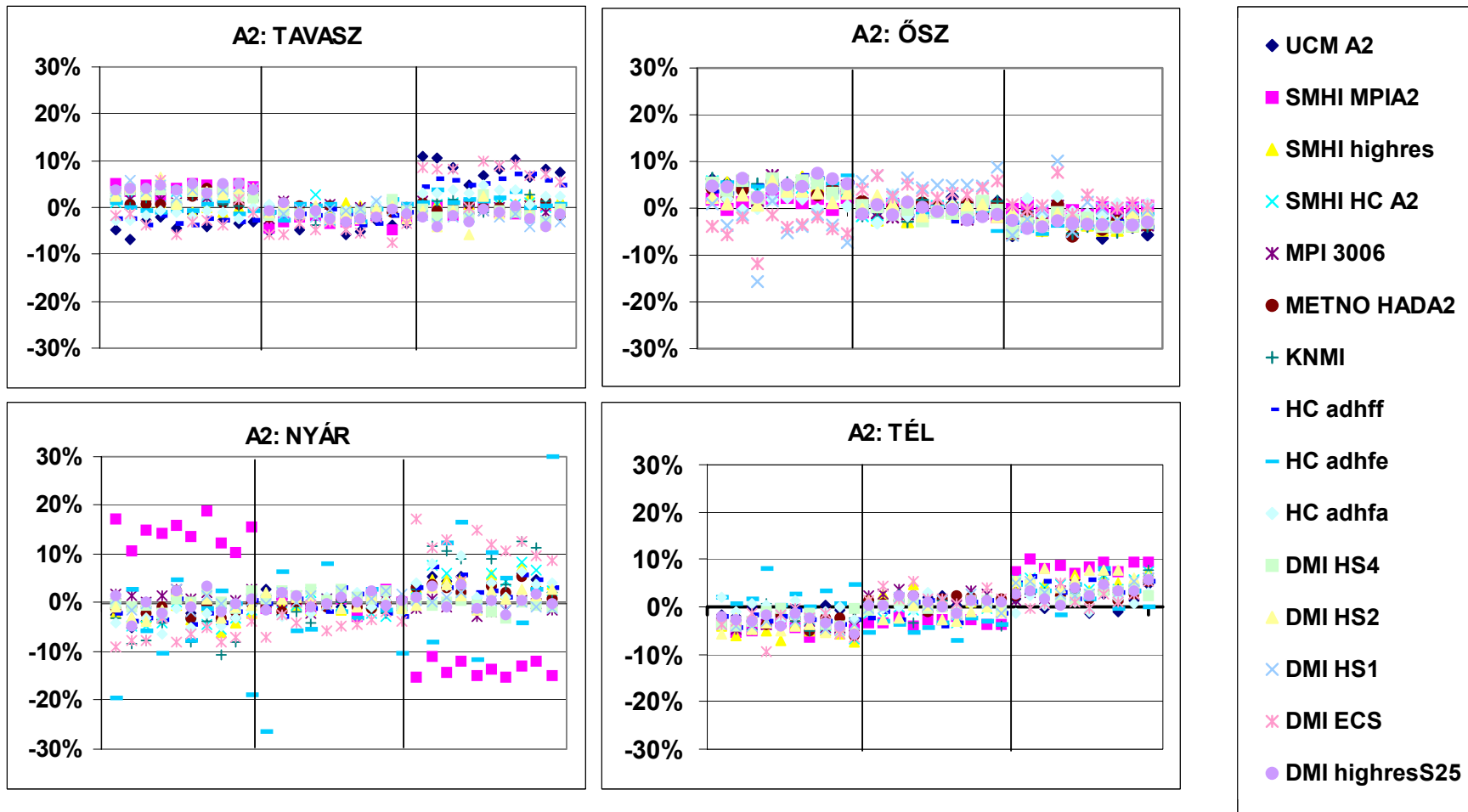
12. ábra: A szellőkésesség évszakos gyakoriság eloszlásainak várható eltolódásai 2071-2100-ra a referencia időszakhoz (CTRL: 1961-1990) viszonyítva.

4.4. Tercilisek vizsgálata

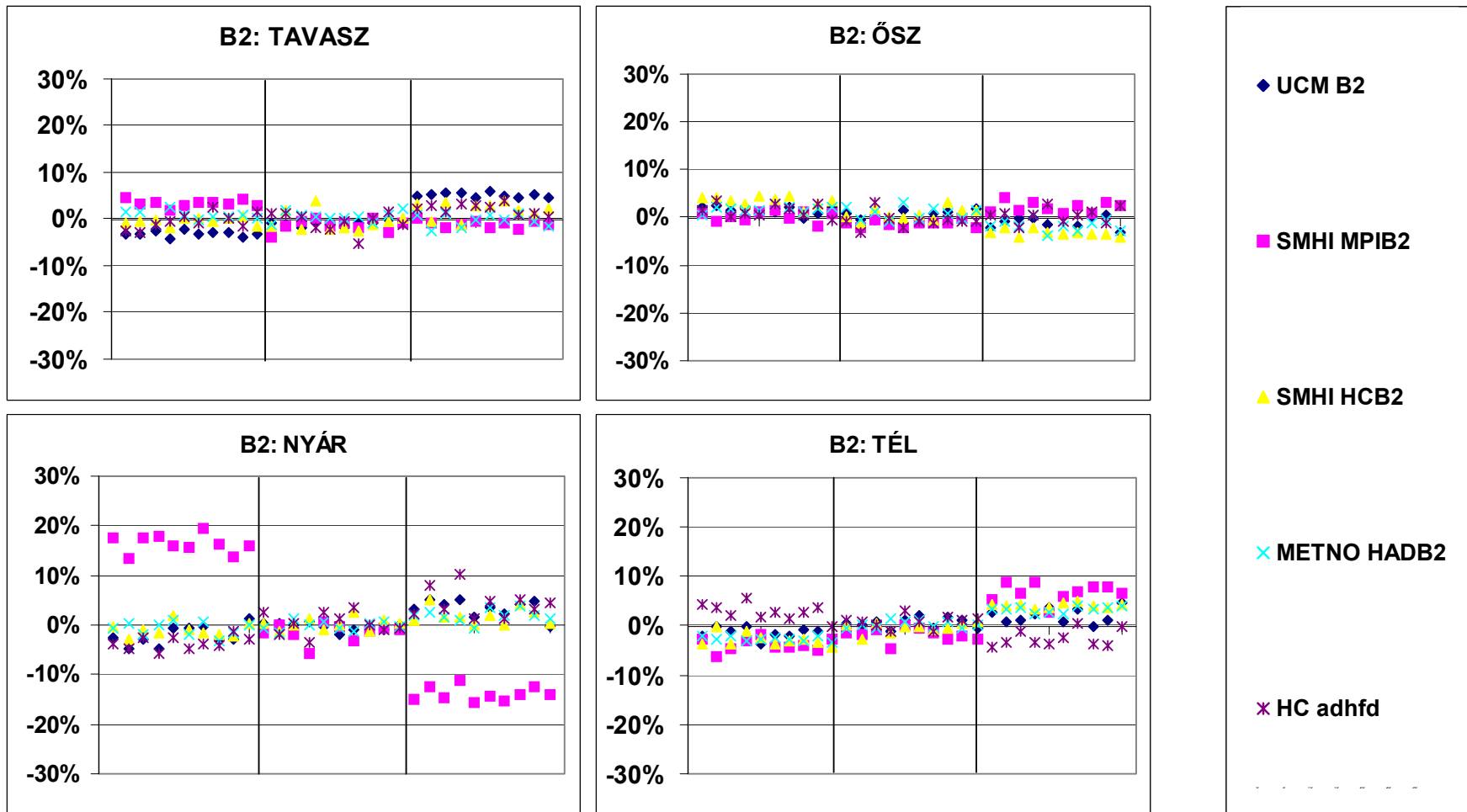
A tercilisek vizsgálatából meg lehet állapítani, hogy a szimulált adatbázis rendezett adatsorainak harmadoló pontjai várhatóan merre tolnának el 2071-2100-ra a referencia időszakhoz képest. Első lépésben kiszámoltuk a referencia idősakra, illetve a jövőre vonatkozó adatsorok terciliseit. Megvizsgáltuk a referencia időszak és az A2, illetve a B2 scenárió alapján készült modellfuttatások terciliseinek abszolút különbségeit. Majd a referencia időszak terciliseit felhasználva határoztuk meg mindkét scenárióra az egyes intervallumokba eső gyakoriságokat. Az ebből számított relatív gyakoriságokból megállapítható a tercilisek százalékos eltolódása a referencia időszakhoz képest. Ezeket évszakonként minden egyes városra és modellfuttatásra elvégeztük.

A 13. és a 14. ábrán az egyes harmadokba eső szélsőségek valószínűségeinek százalékos eltolódásait láthatjuk a referencia időszakhoz képest évszakonként és modellenként mind a tíz városra. Az A2 scenárióra készült modellfuttatások alapján tavasszal, nyáron és télen várhatóan kb. 5%-kal növekedni fog a felső harmadba eső maximum szélsőségek relatív gyakorisága. Ami azt jelenti, hogy a széllökésesség erősségének a nagyobb sebességek irányába való eltolódására lehet számítani ezekben az évszakokban. A téli szélsőség növekedés valószínűsége a legnagyobb, itt egy kivétellel az összes modell összes rácspontjában a felső tercilis értékek növekedése várható. A nyárra vonatkozó diagramon rózsaszínnel jelölt SMHI MPIA2 és az SMHI MPIB2 futtatások GCM-je az ECHAM volt, míg a többi futtatás a Hadley Központ HadAM3H, illetve HadAM3P GCM-jére épült. Ez lehet az oka a többitől nagyban eltérő eredménynek az SMHI esetében. Az őszi hónapokban viszont az első harmadba eső széllökésességek gyakoriságának 4-5%-os növekedése valószínűsíthető, azaz a kisebb sebességek felé történő eltolódásra számíthatunk.

A B2 scenárióra végzett futtatások szerint a várható változások nagysága kisebb, viszont az éves eloszlása az A2 scenárióhoz hasonló. A tavaszi, nyári és téli hónapokra egy-egy modell kivételével a felső harmadba eső szélsőségek relatív gyakoriságának várható növekedését valószínűsíthetjük. Ellenben ősszel – az A2 scenárióhoz hasonlóan – a kisebb szélsőségek gyakoriságának növekedésére kell számítanunk 2071-2100-ra az 1961-1990 referencia időszakhoz képest.



13. ábra: A szélökésesség eloszlásának várható változása 2071-2100-ra az A2 scenárió esetén a kontroll-futtatás (1961-1990) tercilisei által meghatározott három harmadban, a kiválasztott 10 rácspontban



14. ábra: A szélökésesség eloszlásának várható változása 2071-2100-ra a B2 scenárió esetén a kontroll-futtatás (1961-1990) tercilisei által meghatározott három harmadban, a kiválasztott 10 rácspontban.

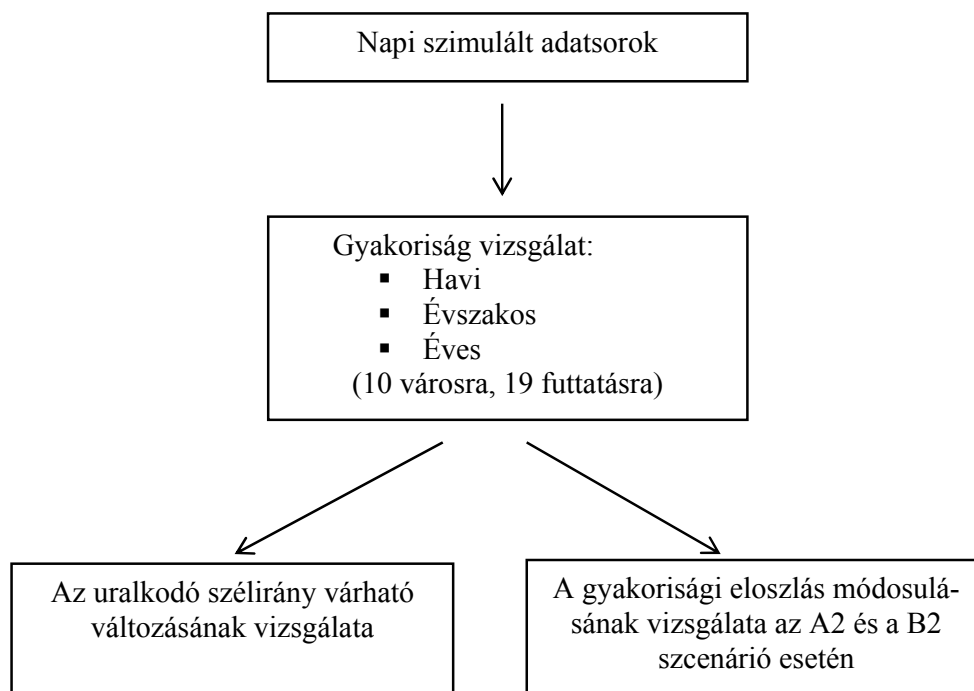
5. A várható szélirány vizsgálata

Ebben a fejezetben a maximális szélesség várható változásáról áttérünk a szélirány várható változásának vizsgálatára. Az uralkodó szélirány változásának becslése szintén nagy segítséget adhat a jövőbeli szélenergia parkok tervezéséhez és létesítéséhez.

A maximum szélességhez hasonlóan a szélirány esetén is letöltöttük a napi bontású szimulált adatsorokat a tíz kiválasztott rácspontra, illetve mind a múltbeli (1961-1990), mind a jövőbeli (2071-2100) időszakokra.

5.1. Vizsgálati módszerek

A napi adatokból havi és évszakos átlagokat képezve bemutatjuk a szélirány havi és évszakos várható változásait, a 10 várost reprezentáló rácspontokra és átlagosan az ország egészére. Elemezzük a kontroll időszakhoz képest az évszakos uralkodó szélirány várható változását a XXI. század végére mind az A2, mind a B2 scenárió esetén. Vizsgálatainkat a 14. ábra sematikus vázlatja foglalja össze.

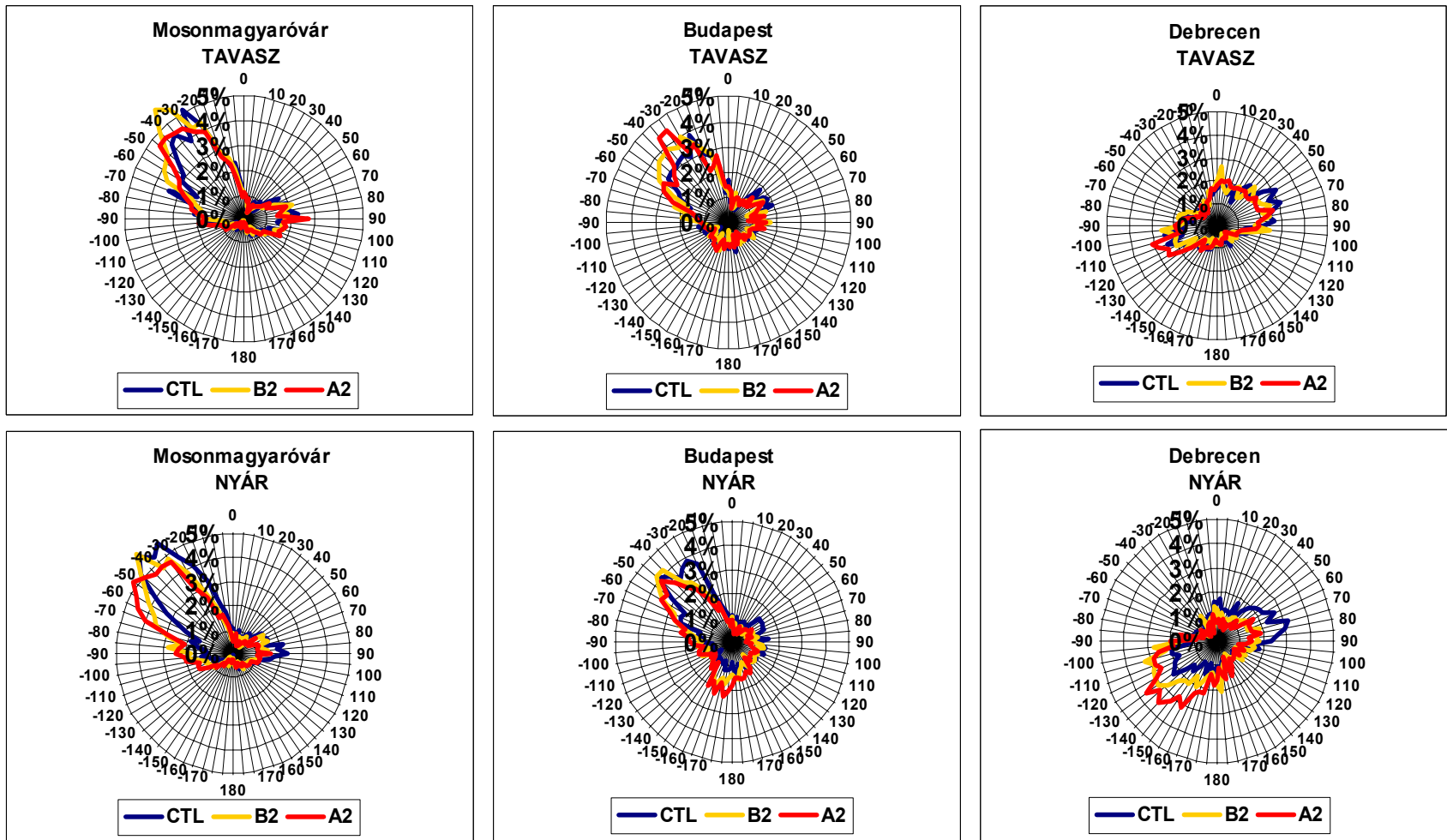


4. ábra: A szélirányra vonatkozó szimulált adatsorokon elvégzett vizsgálatok összefoglalása.

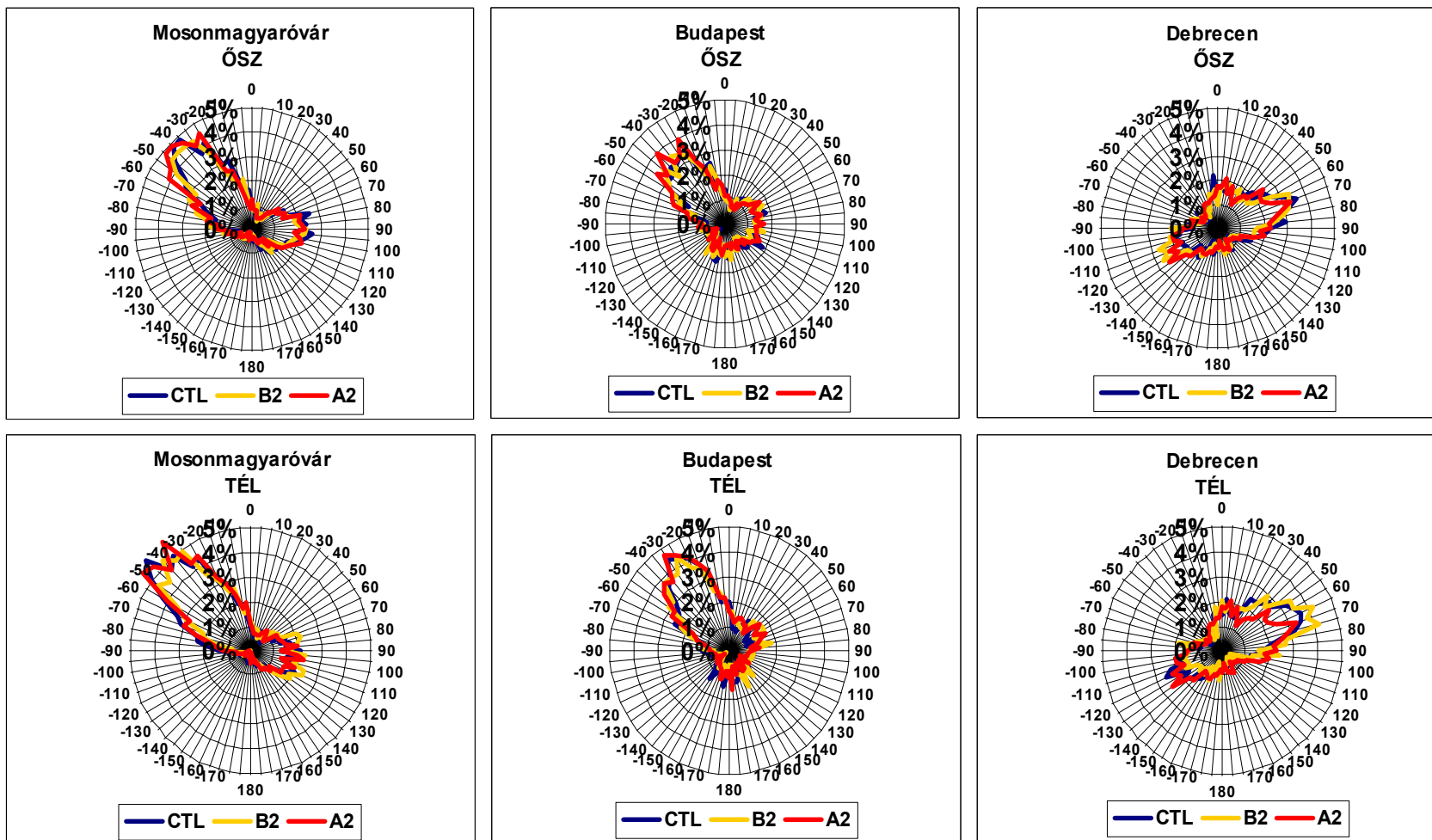
5.2. A szélirány gyakoriságának várható módosulása

A gyakoriság vizsgálatok során először minden modell esetében, illetve mind a 10 városra meghatároztuk évszakonként, hogy a szimulált adatsorok értékei közül hány esik az 5°-os felbontású intervallumokba. Ezután a relatív gyakoriságokat évszakonként ábrázoltuk szélrózsákon és összevetettük mind az A2, mind a B2 scenárió alapján készített előrejelzéseket a referencia időszakra vonatkozó értékek eloszlásával. A nyolc A2 és a három B2 scenárióra futtatott modell közül, terjedelmi okok miatt a Dán Meteorológiai Intézet becsléseit választottuk ki, mivel mindkét scenárió alapján készítettek szimulációkat a 2071-2100 közötti időszakra. A 15. és a 16. ábrán a XXI. századra valószínűsíthető évszakai szélirány változások becsléseit láthatjuk a Dán Meteorológiai Intézet futtatásai alapján, három kiválasztott rácspont esetén, mivel szélirány esetén nincs elég információ tartalma az országos átlag szélirány fogalmának. Ugyanazt a három várost mutatjuk be, mint a referencia időszak verifikációjának vizsgálatokor: egy dunántúli várost (Mosonmagyaróvár), egy alföldi várost (Debrecen) és a fővárost.

A 15. ábrán látható, hogy a nyugatias szélirány gyakorisága a tavaszi hónapokban várhatóan növekszik Mosonmagyaróvár és Budapest esetén. Mivel mind az A2, mind a B2 scenárió alapján egyrészt az északnyugatias szélirányok gyakorisága várhatóan növekszik, másrészt a leggyakoribb szélirány egyre inkább nyugatias: (-20°) - (-25°) helyett (-30°) - (-40°) körüli domináns szélirányokra számíthatunk. Debrecen esetén az északkeleti szélirány gyakorisága várhatóan csökken, míg a B2 scenárió alapján az északias illetve mindkét scenárió szerint a délnyugati szélirányok gyakoriságának növekedésére számíthatunk. A nyári hónapokban hasonló irányúak a becsült változások, mint a tavaszi hónapokban, csak nagyobb mértékűek. Mosonmagyaróvár és Budapest esetén az észak-északkeleties és a keleties szélirányok gyakoriságának csökkenésére számíthatunk, míg az északnyugatias szelek relatív gyakorisága várhatóan növekszik 2071-2100-ra. Budapest esetén ezen kívül a dél-délnyugatias szélirányok (kb. (-160°) - (-170°)) gyakoriságának növekedését becsli a Dán Meteorológiai Intézet. Debrecen esetén mindkét scenárió szerint a délnyugati szélsébségek gyakoriságának nagy mértékű növekedésére számíthatunk, míg az északkeleti szélirányok valószínűleg kisebb hányadban fordulnak majd elő a nyári hónapokban.



15. ábra: A szélirány tavaszi és nyári várható változása 2071-2100-ra a Dán Meteorológiai Intézet modellfuttatásai alapján, az A2 és a B2 scenárió esetén.
(CTL: 1961-1990)



16. ábra: A szélirány őszi és téli várható változása 2071-2100-ra a Dán Meteorológiai Intézet modellfuttatásai alapján, az A2 és a B2 szcenárió esetén.

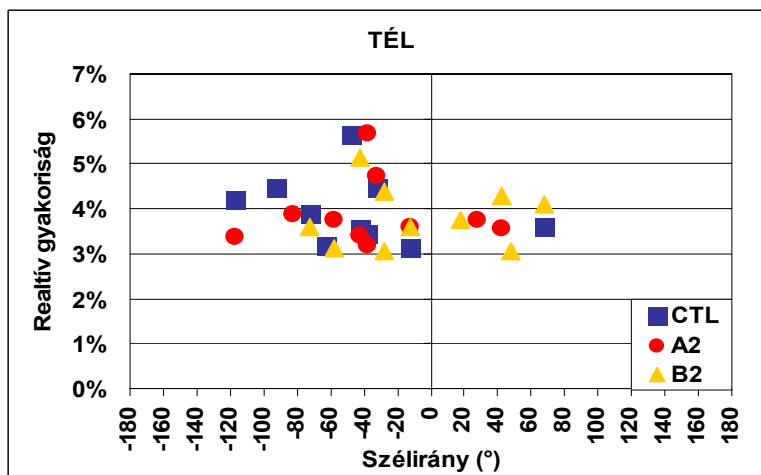
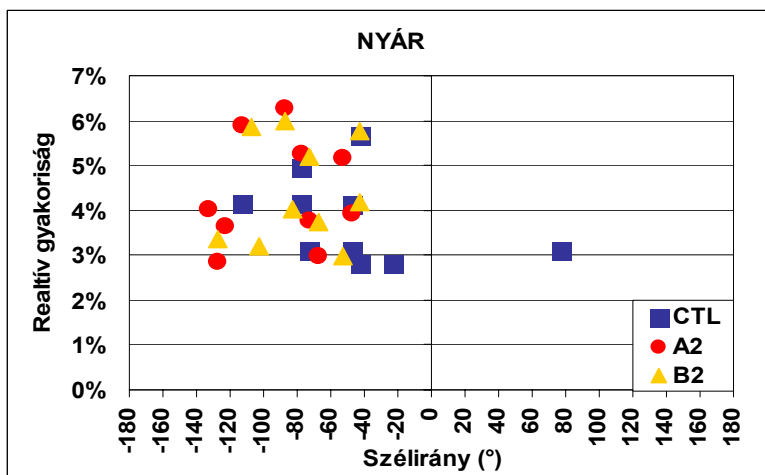
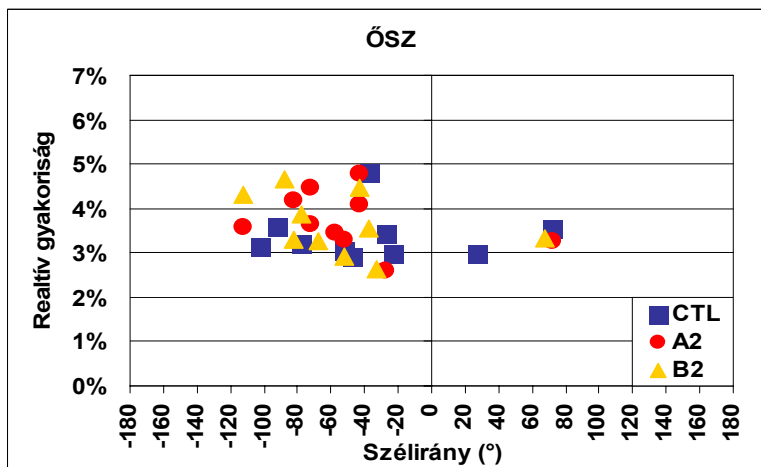
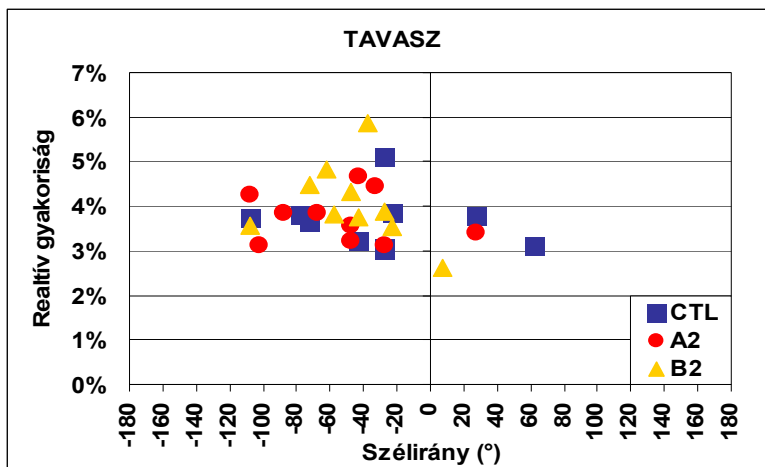
(CTL: 1961-1990)

Az 1961-1990 közötti időszakhoz képest ősszel mind a három városban várhatóan csökkenek a keleties szélirányok (16. ábra), míg Mosonmagyaróváron és Budapesten az északnyugatias szelek növekedése, addig Debrecenben a nyugat-délnyugatias szélirányok gyakoriságának növekedése valószínűsíthető a XXI. század végére. Télen Mosonmagyaróváron és Budapesten várhatóan növekszik a keleties és délkeleties szelek gyakorisága a B2 scenárió alapján. Az A2 scenárió szerint Mosonmagyaróváron a nyugatias és keleties szélirányok, Budapesten a déli és az északkeleti szélirányok gyakoriságának növekedésére számíthatunk. Debrecen esetén a B2 scenárió alapján az északkeleties szelek hányadának növekedése, s a délnyugatias szeleknek a csökkenése várható, míg az A2 scenárió szerint az északkeleties szelek gyakorisága várhatóan csökken, a délnyugatiasaké pedig növekszik. Összességében a szélirányok nyugatias jellege várhatóan fokozódik Budapest és Mosonmagyaróvár esetén. Az őszi és téli hónapokban kisebb mértékű változásokra számíthatunk, mint tavasszal és nyáron.

5.3. Az uralkodó szélirány várható változása

Mindkét scenárió alapján az összes kiválasztott rácspontra meghatároztuk az évszakos domináns szélirányokat minden modell esetén, majd összehasonlítottuk a referencia időszakra (1961-1990) vonatkozó uralkodó szélirányokat a XXI. század végére várható értékekkel. A vizsgált modellek közül ez esetben is a Dán Meteorológiai Intézet modellfutatait választottuk ki bemutatásra. A 17. ábrán a tíz rácspontra mind a három modellszimuláció uralkodó szélirányait láthatjuk, és annak relatív gyakoriságait évszakos bontásban. A -180° és $+180^\circ$ a déli, a -90° a nyugati, a 0° az északi és a $+90^\circ$ a keleti irányt reprezentálja.

Tavasszal az uralkodó szélirányok nagy része várhatóan mindkét scenárió esetén északnyugatias marad (vagy azzá válik) és nagyobb relatív gyakorisággal fordul elő, mint az 1961-1990 közötti időszakban. Tehát a Dán Meteorológiai Intézet becslései szerint tavasszal még inkább uralkodóvá válnak a nyugatias szelek. A nyári hónapokban szintén a nyugatias szelek gyakoriságnövekedésére számíthatunk, mindkét scenárió esetén. Az északias és keleties domináns szélirányok mindkét forgatókönyv figyelembevételkor várhatóan nyugatiassá válnak.



17.ábra: Az évszakos uralkodó szélirány várható változása a Dán Meteorológiai Intézet modellfuttatásai alapján, az A2 és a B2 scenárió szerint (CTL: 1961-1990)

Ősszel még számíthatunk keleties uralkodó szélirányokra, de a relatív gyakoriságuk várhatóan csökken, s a nyugatias szélirányok gyakoriságának 1-2%-os növekedését jelzi mindkét scenárió. A téli hónapokban a többi évszakhoz képest eltérő jellegű változásokra számíthatunk. A nyugatias szelek gyakoriság-növekedése kevésbé valószínűsíthető, mint a többi évszakban. Télen alapvetően az északkeleti uralkodó szélirányok száma várhatóan nő, s az A2 scenárió alapján a nyugatias domináns szélirányok is megmaradnak, csak a gyakoriságuk csökkenésére kell számítanunk. A B2 scenárió szerint várhatóan 2071-2100-ra szűkebb intervallumon fognak elhelyezkedni az uralkodó szélirányok.

6. Összefoglalás

Jelen dolgozatban a PRUDENCE projekt keretében elvégzett 50 km-es felbontású regionális klímaszimulációkat vizsgáltuk. Ezek felhasználásával 10 hazai várost reprezentáló rácspontra elemeztük a napi maximális szélesség irányának és nagyságának 2071-2100-ra valószínűsíthető változásait. A rendelkezésre álló szimulációs idősorok az A2 és a B2 scenárióra vonatkoznak, s az alkalmazott referencia időszak 1961-1990 volt.

A bemutatott vizsgálatok alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le a szélviszonyok várható változására vonatkozóan:

- Általánosságban elmondhatjuk, hogy a Kárpát-medence térségében mind az A2, mind a B2 scenárió esetén a szélesség várhatóan az egész év során növekedni fog. (Kivéve az A2 scenárió esetén ősszel.)
- A legnagyobb mértékű növekedésre a nyári hónapokban számíthatunk (elsősorban júliusban) mindkét scenárió esetén.
- A prognosztizált havi szignifikáns szélesség változások átlagosan kb. 5-10%-os nagyságrendűek. Az A2 scenáriót tekintő szimulációk nagyobb, míg a B2 scenáriót figyelembe vevő modellfuttatások kisebb mértékű szignifikáns változást jeleznek 2071-2100-ra.
- A várható gyakoriságváltozások elemzése alapján a széllekehesség erőssége várhatóan mindkét scenárió szerint a nagyobb sebességek felé tolódik el az egész év során, leginkább nyáron és télen.
- Hazánk területén várhatóan egész évben (a téli hónapok kivételével) a nyugatias szélirányok gyakoriságának növekedésére számíthatunk a XXI. század végére. Ez a gyakoriságnövekedés legnagyobb mértékben nyáron valószínűsíthető.
- Az uralkodó szélirányok várhatóan nagyobb gyakorisággal lesznek nyugatiasak és még inkább dominánssá válnak.

A szélhőkésesség várható változásainak elemzése lehetőséget teremt a jövőben telepítendő szélenergia-termelő helyének pontosabb kijelölésére. Az extrém szélviszonyok XXI. század végére vonatkozó előrejelzéseit alkalmazni tudjuk az épített környezet méretezésének gyakorlati tervezése során is. Az uralkodó szélirányokra megadott becslések meghatározóak lehetnek a szélenergia-termelő beállításainak elvégzésekor. A Kárpát-medence szélviszonyaival kapcsolatos klímaváltozási elemzést az átlagos szélesség paraméterek bevonásával szeretnénk a jövőben kiterjeszteni.

Irodalomjegyzék

- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., (2007a): A 21. század végén várható regionális éghajlatváltozás Magyarországon. Földrajzi Értesítő. LVI., 3-4. szám, pp. 147-168.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., (2007b): Regional climate change expected in Hungary for 2071-2100. Applied Ecology and Environmental Research, 5, pp. 1-17.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., Szabó P. (2007c): A hőmérsékleti extrémumok várható alakulása a Kárpát-medence térségében a XXI. század végén. „Klíma-21” Füzetek. 51. szám. pp. 3-17.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy. (2008a): Milyen mértékű éghajlatváltozás várható a Kárpát-medencében? Légkör, 53/2., pp. 19-24.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., Szabó P. (2008b): Analysis of expected climate change in the Carpathian basin using the PRUDENCE results. Időjárás, 112, pp. 249-264.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., Szabó P. (2008c): Milyen mértékű változás várható a Kárpát-medence éghajlati szélsőségeiben a XXI. század végére? Légkör, 53/3. pp. 19-23.
- Bartholy J., Radics K. (2001): Selected characteristics of wind climate and the potential use of wind energy in Hungary, Part I. Időjárás, 105, pp. 75-91.
- Bartholy J., Radics K., Bohoczky F. (2003): Present state of wind energy utilisation in Hungary: policy, wind climate, and modelling studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 7, pp. 175-186.
- Beniston M., Stephenson D.B., Christensen O.B., Ferro C.A.T., Frei C., Goyette S., Halsnaes K., Holt T., Jylhä K., Koffi B., Kalutikof J., Schöll R., Semmler T., Woth K. (2007): Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. Climatic Change 81, pp. 71-95. doi: 10.1007/s10584-006-9226-z
- Christensen J.H., Carter T.R., Rummukainen M., Amanatidis G. (2007): Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. Climatic Change, 81 Supl. 1, pp. 1-6, doi:10.1007/s10584-006-9211-6.
- Christensen J.H., Christensen O.B. (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. Climatic Change, doi:10.1007/s10584-006-9210-7

- Déqué M., Gibelin A.L. (2003): Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Clim Dyn* 20, pp. 327-339.
- Gibson J.K., Kallberg P., Uppala S., Nomura A., Hernandez A., Serrano A. (1997): The ERA-40 project plan. ERA40 Project Report Series No. 1, 77 p.
- Giorgi F. (1990): Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. - *Journal of Climate*, 3. pp. 941-963.
- Hajdu M. (2008): A szél-, napenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest (diplomamunka). 88p.
- IPCC (2008): IPCC scoping meeting on renewable energy sources – Proceedings. A special reports of IPCC. Edited by O.Hohmeyer and T. Trittin. Lübeck, Germany. 190 p.
- IPCC (2000): Emissions Scenarios. A special reports of IPCC Working Group III. Edited by N. Nakicenovic and R.Swart. Cambridge University Press, UK. 570 p.
- Jacob D., Bärring L., Christensen O.B., Christensen J.H., de Castro M., Déqué M., Giorgi F., Hagemann S., Hirschi M., Jones R., Kjellström E., Lenderink G., Rockel B., Sánchez E., Schär Ch., Seneviratne S.I., Somot S., van Ulden A., van den Hurk B. (2007): An inter-comparison of regional climate models for Europe: Model performance in Present-Day Climate. *Climatic Change* 81, pp. 21-53. doi:10.1007/s10584-006-9213-4
- Kallberg P., Simmons A., Uppala S., Fuentes M. (2004): The ERA-40 archive. ERA40 Project Report Series No. 17. 31 p.
- Kardos P., Fodor Z. (2006): Civil szakértői tanulmány a Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiához. KvVM, 103p.
- Miklós E. (2008): A rövidhullámú sugárzási egyenleg várható változása hazánkban 2071-2100-ra a PRUDENCE szimulációk alapján. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest (TDK dolgozat). 15p.
- MSZET (2008): Magyarországi szélerőművek. 2008. április 11.-i állapot. <http://www.mszet.hu>
- New M., Hulme M., Jones P. (1999): Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate* 12: pp. 829-856.
- Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L., Christoph M., Claussen M., Dümenil L., Esch M., Giorgetta M., Schlese U., Schulzweida U. (1996): The atmospheric general circulation

model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate. MPI Report 218, p. 90, Max-Planck-Institut für Meteorologie.

Rowell D.P. (2005): A scenario of European climate change for the late 21st century: seasonal means and interannual variability. *Climate Dynamics* 25, pp. 837-849.

Szabó P. (2007): A Kárpát-medence térségében 2071-2100-ra várható regionális klímaváltozás elemzése a PRUDENCE-eredmények felhasználásával. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest (diplomamunka). 56 p.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat támogatta a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, az MTA TKI Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz című, 2006/TKI/246 számú programja, az OTKA T-049824, K-67626, K-69164 és K-78125 számú pályázata, az NKFP-3A/0082/2004 és az NKFP-6/079/2005 pályázat. További segítséget nyújtott az EU VI. keretprogram CECILIA projektje (GOCE-037005). Az éghajlat-változási modellszimulációk adatbázisát az EU EVK2-CT2001-00132 számú szerződésében támogatott PRUDENCE projekt keretében állították elő. Az ERA-40 adatbázist az Európai Középtávú Időjárás-Előrejelző Központ (ECMWF) állította össze és bocsátotta rendelkezésünkre. A letöltésben közreműködött Ihász István, az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársa.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Pongrácz Ritának és Bartholy Juditnak a kitartó munkájukért és töretlen támogatásukért valamint Gelybó Györgyinek az adatok letöltésében és a rácspontri idősorok leválasztásában nyújtott segítségével.