

A sugárzási paraméterek 2071-2100-ra várható változása Magyarországon a PRUDENCE szimulációk alapján

**SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNY ALAPSZAK
METEOROLÓGIA SZAKIRÁNY**



Készítette: Miklós Erika

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	5
2.1. A PRUDENCE projekt.....	5
2.2. A sugárzás.....	8
2.2.1. A rövidhullámú sugárzási egyenleg	10
2.2.2. A hosszúhullámú sugárzási egyenleg.....	11
2.3. A felhőborítottság	11
3. A sugárzási paraméterek várható változásainak elemzése	13
3.1. Vizsgálati módszerek.....	13
3.2. A várható változás mértéke és eloszlása.....	14
3.2.1. Nettó rövidhullámú sugárzás	14
3.2.2. Nettó hosszúhullámú sugárzás	17
3.2.3. Felhőborítottság.....	18
3.3. A gyakoriság értékek eltolódásának vizsgálata.....	21
3.3.1. Nettó rövidhullámú sugárzás	21
3.3.2. Nettó hosszúhullámú sugárzás	24
3.3.3. Felhőborítottság.....	26
3.4. A kvartilisek és a szélsőértékek vizsgálata.....	28
3.4.1. Nettó rövidhullámú sugárzás	28
3.4.2. Nettó hosszúhullámú sugárzás	29
3.4.3. Felhőborítottság.....	30
3.5. A tercilisek vizsgálata.....	31
3.5.1. Nettó rövidhullámú sugárzás	31
3.5.2. Nettó hosszúhullámú sugárzás.....	34
3.5.3. Felhőborítottság.....	37
4. Következtetések.....	40
5. Irodalomjegyzék	41
6. Köszönetnyilvánítás	44

1. Bevezetés

A jövőbeli klíma modellezése napjainkban egyre nagyobb szerephez jut a globális felmelegedés hatására. A modellek fejlesztése, adaptálása, használata majd a kapott adatok értékelése igen körültekintő munkát igényel, hiszen például egy kisebb hiba az adatbevitelnél akár jelentős eltéréshez is vezethet a kapott eredményeinkben. Az éghajlati előrejelzés során az egyik legfontosabb kérdés, amelyre választ kell kapnunk, hogy az alkalmazott modell mekkora hibával dolgozik egy hosszabb időszakra. A hiba egyik fő tényezője az emberi faktor, hiszen az általunk generált változásokat nem tudjuk előre maximális pontossággal betáplálni a modellbe. A Föld éghajlatát és annak változását globális klíma-modellekkel, GCM-ekkel (Global Climate Model) szimulálhatjuk, majd a kisebb területek vizsgálatakor regionális klímadinamikai modellekkel dolgozunk, melyek képesek a mezoskálájú folyamatok és az orografikus hatások leírására is.

Az éghajlati modelleknek három fő típusa van: a globális kapcsolt légkör-óceán általános cirkulációs modell (AOGCM: Coupled Atmospheric-Ocean General Circulation Model), a globális általános légköri modell (GCM: General Circulation Model) és a regionális korlátos tartományú klímamodell (RCM: Regional Climate Model). A különbség a felbontásukban is érzékelhető: míg az AOGCM felbontása 300 km körül van, a GCM felbontása pedig 100 km körül, addig egy regionális modell felbontása mára akár 5-10 km is lehet. A globális modell durvább felbontású outputjait felhasználva dolgozták ki Giorgi (1990) és munkatársai az ún. beágyazott modellekkel való szimulációs technikát. Ennek köszönhetően az RCM-ek már képesek arra, hogy a nagyskálájú folyamatokat területileg finomabb skálára bontsák.

Az elmúlt években mind az amerikai, mind az európai kutatók egyik fő célja volt a regionális éghajlati modellek fejlesztése és felhasználásukkal a várható klímaváltozás minél pontosabb becslése egyre finomabb térskálán. A korábban jellemző nem megfelelően koordinált kutatások helyett megjelentek az Európai Unió V. és VI. keretprogramjában az egész kontinenst átfogó programok mint a PRUDENCE (Predicting of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects, 2001-2004, <http://prudence.dmi.dk>), a MICE (Modelling the Impact of Climate Extremes, 2002-2004, <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/mice>) vagy a STARDEX (Statistical and Regional Dynamical Downscaling of Extremes for European Regions, 2002-2005, <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex>) projekt. Utóbbi kettő, mint azt a címük is mutatja, hangsúlyozottan az extrém éghajlati paramétereket vizsgálta, míg a PRUDENCE a

klímamodell alapján napi, havi, és évszakos átlagai alapján becsülte a várható regionális klímaváltozás mértékét Európa egész térségére, 2071-2100-ra (Christensen és Christensen, 2007). A projekt keretében a résztvevő intézetek az A2 és a B2 scenárióra végezték el a klímamodellelést.

Az A2 scenárió az emberiség számának állandó, de lassú növekedésével számol, a világ sokféleségének megmaradását és a helyi értékek megőrzését feltételezi. A gazdasági fejlődés és a technikai változások várhatóan minden földrajzi régióban érvényesülnek, de az összes forgatókönyv közül ez esetben 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 feltételezésnél lassabban. A gazdasági növekedés közepes gyorsasággal zajlik, a technológiai változások visszafogottabbak, ugyanakkor szerteágzóbbak, mint a másik három alapscenárió esetén (IPCC, 2000). A forgatókönyvek közül az A2 a pesszimistább, ez látható a 2100-ra előrejelzett várható szén-dioxid koncentrációból is, mely az A2 esetén 850 ppm, míg a B2 esetén 600 ppm.

A Kárpát-medencére adaptált RCM szimulációk eredményeinek feldolgozása az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén (Bartholy et al., 2006) és az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (Horányi, 2006) néhány éve már megkezdődött, s a XXI. századra vonatkozó éghajlati becslések értékelése is folyamatban van (Torma et al., 2008; Szépszó és Horányi, 2008; Csima és Horányi, 2008). A PRUDENCE szimulációkból kapott napi csapadékösszegek, a napi minimum-, maximum- és átlaghőmérsékleti adatsorok elemzése már megtörtént a Kárpát-medence térségére (Szabó, 2007; Bartholy et al., 2007a, 2007b, 2007c, 2008a, 2008b, 2008c), és megkezdődött a szélhőmérséklet vizsgálata is (Dobor, 2008). A Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium feladatkörébe tartozó Nemzeti Éghajlati Stratégia rendszeres felülvizsgálatához, s az újabb és újabb fejezeteinek kidolgozásához nagy szükség van a klímaelőrejelző modellek folyamatos fejlesztésére, s az eredmények mind részletesebb elemzésére.

Jelen dolgozat célja a sugárzással kapcsolatos néhány paraméter (rövidhullámú és hosszuhullámú sugárzási egyenleg, felhőborítottság) várható változásának vizsgálata a Kárpát-medence térségére a PRUDENCE projekt eredményei alapján. Először bemutatjuk a projekt legfontosabb céljait, majd a rendelkezésre álló paramétereket, melyet a részletes elemzés követ. A dolgozat végén a főbb következtetéseinket foglaljuk össze.

2. Adatok

A következő két alfejezetben áttekintjük a PRUDENCE projekt céljait, a résztvevőket, a futtatott RCM-eket, és az interneten rendelkezésre bocsátott változókat, melyek közül kutatásaink során a sugárzási paraméterek változását elemeztük. E dolgozatban a nettó rövid- és hosszuhullámú sugárzás, valamint a felhőborítottság várható változását elemezzük.

2.1. A PRUDENCE projekt

A PRUDENCE-projekt az Európai Unió V. Keretprogramjának támogatásával valósult meg 2001 és 2004 között. A végrehajtáshoz létrehozott konzorcium vezetője a Dán Meteorológiai Szolgálat volt (projektvezető: Jens Hesselbjerg Christensen). A projektben összesen 25 intézmény vett részt, melyek közül 11 szolgált modellszimulációs eredményekkel (Christensen et al., 2007). Az 1. táblázatban összefoglaljuk a futtatott RCM-eket, a bemenő adatokat biztosító GCM-eket, valamint az interneten keresztül rendelkezésre bocsátott változókat. A szimulációk nagy többsége a brit Hadley Központ HadAM3H/HadCM3 GCM outputjait (Rowell, 2005) használta bemenő határfeltételként.

A PRUDENCE-projekt céljait az alábbiakban foglalhatjuk össze (Christensen et al., 2007):

- A teljes Európai térségre egyszerre több, 30 éves időszakot felölelő éghajlati projekciót készíteni, melyhez a felhasznált globális modellek határfeltételeit, az üvegházgázok koncentrációváltozását előzetesen egyeztetették.
- Az alkalmazott regionális klímamodelleket összehasonlítani az 1961-1990-es időszakra elvégzett szimulációkból meghatározott hibák alapján.
- Elemezni a finomfelbontású regionális modellekből nyert eredményeket a 2071-2100-as időszakra az A2 és a B2 globális scenáriót alkalmazva.
- Az emberre és a gazdasági helyzetre is súlyos következményeket jelentő időjárási extrém eseményekben (pl. árvíz, hőhullámok, erős vihartevékenységek valószínűsége) várható változás becslése különböző éghajlati indexek felhasználásával.
- Az éghajlatváltozási forgatókönyvek alkalmazhatóságát vizsgálni olyan hatástanulmányok elvégzésével, amelyek az alkalmazkodást és az adaptációt szolgálják.
- A projekt eredményeinek széles körben történő elterjesztése, különös tekintettel a döntéshozókra.

1. táblázat: A PRUDENCE projektben résztvevő intézetek, a felhasznált RCM-ek és GCM-ek, a vizsgált scenáriók és a rendelkezésre álló paraméterek

	Intézet	Regionális modell	Globális modell	Scenárió	Változók (magyarázat: ld. 2. táblázat)
1	Dán Meteorológiai Intézet, DMI	HIRHAM 3 db ensemble tag	HadAM3H	A2, B2	$SW_{net}, SW_{\downarrow}, LW_{net}, LW_{\downarrow}, T, T_{max}, T_{min}, p, v_{10}, v_{10,dir}, v_{10,max}, t_d, R, \omega_n, d_I$
2		HIRHAM	ECHAM4/OPYC	A2, B2	
3		HIRHAM	ECHAM5	A2	
4		HIRHAM finom felbontású	HadAM3H	A2	
5		HIRHAM extra finom felbontású	HadAM3H	A2	
6	Brit Hadley Központ, HC	HadRM3P 3 db ensemble tag	HadAM3P	A2, B2	$SW_{net}, SW_{\downarrow}, LW_{net}, LW_{\downarrow}, T, T_{max}, T_{min}, p, T_d, v_{10}, v_{10,dir}, v_{10,max}, R, \omega_n, d_I$
7	Zürichi Műszaki Főiskola, ETH	CHRM	HadAM3H	A2	$SW_{net}, SW_{\downarrow}, LW_{net}, LW_{\downarrow}, T, T_{max}, T_{min}, p, SLP, v_{10,max}, U_{10}, v_{10}, T_d, CLC, E, R, \omega_n, S$
8	Kieli Atomenergia hasznosító Hajóépítési Társaság, GKSS	CLM	HadAM3H	A2	$SW_{net}, SW_{\downarrow}, LW_{net}, LW_{\downarrow}, T, T_{max}, T_{min}, P, p, SLP, v_{10}, v_{10,max}, T_d, CLC, E, R, \omega_n, S$
9		CLM továbbfejlesztett	HadAM3H	A2	
10	Hamburgi Max Planck Intézet, MPI	REMO	HadAM3H	A2	$SW_{net}, SW_{\downarrow}, LW_{net}, LW_{\downarrow}, T, T_{max}, T_{min}, P, p, SLP, v_{10}, v_{10,max}, T_d, q, CLC, E, R, \omega_n, S$
11	Svéd Hidrometeorológiai Intézet, SMHI	RCAO	HadAM3H	A2, B2	$SW_{net}, SW_{\downarrow}, LW_{net}, LW_{\downarrow}, T, T_{max}, T_{min}, P, p, SLP, v_{10}, v_{10,dir}, v_{10,max}, T_d, q, CLC, E, R, \omega_n, S$
12		RCAO	ECHAM4/OPYC	A2, B2	
13		RCAO finom felbontású	HadAM3H	A2	
14	Madridi Egyetem, UCM	PROMES	HadAM3H	A2, B2	$SW_{net}, SW_{\downarrow}, LW_{net}, LW_{\downarrow}, T, T_{max}, T_{min}, P, p, SLP, v_{10}, v_{10,max}, q, CLC, E, \omega_n, S$
15	Trieszti Nemzetközi Elméleti Fizikai Központ, ICTP	RegCM	HadAM3H	A2,B2	$SW_{net}, SW_{\downarrow}, LW_{net}, LW_{\downarrow}, T, T_{max}, T_{min}, P, SLP, q, CLC, E, R, \omega_n, S$
16	Norvég Meteorológiai Intézet, METNO	HIRHAM	HadAM3H	A2	$SW_{net}, SW_{\downarrow}, LW_{net}, LW_{\downarrow}, T, T_{max}, T_{min}, P, p, SLP, v_{10}, v_{10,dir}, v_{10,max}, T_d, q, CLC, E, R, \omega_n$
17	Holland Meteorológiai Intézet, KNMI	RACMO	HadAM3H	A2	$SW_{net}, SW_{\downarrow}, LW_{net}, LW_{\downarrow}, T, T_{max}, T_{min}, P, p, SLP, v_{10}, v_{10,dir}, v_{10,max}, T_d, q, CLC, E, R, \omega_n, S$
18	Francia Meteorológiai Szolgálat, CNRM	ARPEGE 3 db ensemble tag	HadCM3	A2, B2	$T, T_{max}, T_{min}, p, SLP$
19		ARPEGE 3 db ensemble tag	ARPEGE/OPA	A2, B2	

2. táblázat: A PRUDENCE projekt által az interneten keresztül rendelkezésre bocsátott változók elnevezése, rövidített betűjele, illetve mértékegysége

SW_{net}	Nettó rövidhullámú sugárzás (W/m^2)
SW_{\downarrow}	Lefelé irányuló rövidhullámú sugárzás (W/m^2)
LW_{net}	Nettó hosszuhullámú sugárzás (W/m^2)
LW_{\downarrow}	Lefelé irányuló hosszuhullámú sugárzás (W/m^2)
T	Léghőmérséklet 2 méter magasságban (K)
T_{max}	Napi maximum hőmérséklet (K)
T_{min}	Napi minimum hőmérséklet (K)
P	Csapadék (mm/nap)
p	Felszíni légnyomás (hPa)
SLP	Tengerszinti légnyomás (hPa)
v_{10}	Átlagos szél 10 méteres magasságban (m/s)
$v_{10,dir}$	Átlagos szélirány 10 méteres magasságban ($^{\circ}$)
$v_{10,max}$	Napi maximális szél 10 méteren (m/s)
U_{10}	Átlagos szél horizontális komponense 10 méteres magasságban (m/s)
V_{10}	Átlagos szél meridionális komponense 10 méteres magasságban (m/s)
T_d	Harmatpont (K)
q	Specifikus légnedvesség 2 méteren (kg/kg)
f	Relatív nedvesség (%)
CLC	Teljes felhőfedettség (%)
E	Párolgás (mm/nap)
R	Teljes lefolyás (mm/nap)
ω_n	Hó-vízegyenérték (mm)
d_i	A tengerjég vastagsága (mm)
S	Talajnedvesség (mm)

Az alkalmazott regionális éghajlati modelleket 50 km-es horizontális rácsfelbontással két 30 éves időszakra futtatták. A várható klímaváltozást az 1961-1990 referencia időszak és a 2071-2100 jövőbeli időszakra vonatkozó szimulációk különbségeiből számították. A PRUDENCE futtatások elsődleges célja az A2 scenárió vizsgálata volt, de sok résztvevő intézet a kevésbé pesszimista B2 scenáriókat is elemezte (lásd 1. táblázat). A regionális modellek a számításokhoz az eredeti kivágatot az Egyenlítői területre transzformálták, így

kerülték ki a hosszúsági és szélességi fokháló szerinti torzításokat. A napi mezők az eredeti futtatási terület rácspontjai szerint vannak tárolva, a havi és évszakos mezőket azonban már a Kelet-Angliai Egyetem Éghajlatkutató Osztályán (CRU: Climatic Research Unit) létrehozott referencia adatbázis (New et al., 1999, 2000) szabványos területére alakították át.

A PRUDENCE szimulációk hőmérséklet és csapadék idősorainak elemzése már nagyrészt lezajlott, a kapott eredmények a Climatic Change című folyóirat egy különszámában jelentek meg. Ezek az összesített vizsgálatok az egész európai régióra folytak, témái közt szerepelt a referencia időszakra vonatkozó szimulációk verifikálása (Jacob et al., 2007), a jövőbeli időszakra vonatkozó egyes éghajlatbecslések összehasonlítása (Déqué et al., 2007), a hőmérséklet és a csapadék várható változásainak elemzése a referencia időszakhoz képest (Christensen et al., 2007), valamint az extrém éghajlati indexek várható változásának vizsgálata (Beniston et al., 2007). A Kárpát-medencére vonatkozó eredmények megjelentek az Időjárás és a Légkör című folyóiratban is (Bartholy et al., 2007b, 2008c).

2.2. A sugárzás

A Napból érkező sugárzás vizsgálata a legfontosabb meteorológiai feladatok közé tartozik, hiszen ez az állapotjelző van a legnagyobb hatással a többi meteorológiai és éghajlati változóra. A Föld felszínét elérő sugárzás mennyisége több tényezőtől is függ, ezek közé tartozik a földrajzi szélesség és a felhőborítottság.

A sugárzás erősségét a fluxussal jellemezhetjük, mely az egységnyi felületre, egységnyi idő alatt érkező energia mennyiségét adja meg W/m^2 -ben kifejezve. Megkülönböztetünk rövid-, és hosszuhullámú sugárzást a hullámhossz alapján (Czelnai, 1980). Rövidhullámú sugárzásnak nevezzük a $0,3 \mu m$ és $4 \mu m$ közötti spektrumban történő sugárzást, míg a hosszuhullámú sugárzás a $4 \mu m$ és $100 \mu m$ közti hullámhossztartománnyal jellemezhető.

Vizsgálatainkhoz tíz hazai várost (Budapest, Debrecen, Kalocsa, Miskolc, Mosonmagyaróvár, Pécs, Siófok, Szeged, Szolnok, Zalaegerszeg) választottunk ki, melyek földrajzilag egyenletesen oszlanak el az országon belül (1. ábra), s így lehetővé teszik az átfogó elemzést. A városok koordinátáit a 3. táblázat mutatja. A szimulált adatbázisokból leválasztottuk a tíz városhoz legközelebb eső rácspontok sugárzási és felhőborítottsági idősorait mind az 1961-1990, mind a 2071-2100 időszakra vonatkozóan.



1. ábra: A tíz hazai város földrajzi elhelyezkedése

3. táblázat: A kiválasztott 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

2.2.1. A rövidhullámú sugárzási egyenleg

A rövidhullámú sugárzási egyenleg jól mérhető, a Földre beérkező és a visszavert sugárzás különbségét jelenti. Ha az értéke növekszik a jövőben, akkor célszerű megfontolni a napsugárzás, mint megújuló energiahordozó mind nagyobb mértékű bevonását a teljes energia ágazatba. A napenergia felhasználása már az ókorban megkezdődött, azóta elterjedése és népszerűsége csak növekedett. A hazai elterjedést nehezítik a magas beruházási költségek, melyek elriasztják a döntéshozókat a megújuló energiaforrások alkalmazásától (Hajdú, 2008). Napjainkban az építkezésben egyre gyakrabban használjuk ki a napenergiát. Az új családi- és irodaházakban napkollektorok, napelemek felhelyezésével, valamint erőteljes hőszigeteléssel oldják meg az energiaigény részbeli kielégítését, illetve csökkentését. Dunaújvárosban valósult meg a SOLANOVA panelépület-felújítási mintaprojekt (Hermelink, 2006), ahol napkollektorokat alkalmaztak, külső hőszigetelést vezettek be, a nyílászárókat kicserélték és egyedien szabályozhatóvá tették a fűtési rendszert. A projekt 85%-os fűtési energia megtakarítással végződött.

Egy másik nagyobb projekt 2009-ben Budapesten, Gazdagréten valósult meg, ahol egy társasházra 36 darab vákuumcsöves napkollektort szereltek fel és kicserélték az összes nyílászárót és a teljes külső hőszigetelést. Ez az új rendszer nyáron és tavasszal 90%-kal, télen és ősszel pedig 20%-kal segít csökkenteni a távhő számlát (Janka és Helgert, 2009a).

Szerencsére egyre több ötlet van, s a lezárult projektek száma is nő. Például az egyik Budaörsön levő hipermarket tetején már megépült egy 1030 négyzetméteres napkollektor, mely a legnagyobb az országban (Janka és Helgert, 2009b). Több terv készült szerte az országban a napenergia közvetlen hasznosítására az elmúlt években például ezek közé tartozik a, hogy Dombóvár-i napelemekkel működő közvilágítás (Janka és Helgert, 2009c). Mint azt láthatjuk, a projektek nem csak az ország egy adott területére összpontosulnak. Ez nem is csoda, hiszen nehéz lenne megmondani, hogy mely területekre érdemesebb napkollektort telepíteni: egy viszonylag kis területen, mint hazánk, a beérkező rövidhullámú sugárzás nagyjából egyenletesen oszlik el. Azt azonban mindenképpen érdemes vizsgálni, hogy a beérkező energia várhatóan mekkora mértékben fog növekedni avagy csökkenni a jövőben az ország teljes területén, hogy ennek figyelembevételével alakítsuk terveinket.

A rövidhullámú sugárzási egyenleg összesen 29 futtatás esetén állt rendelkezésre, melyek közül 13 a referencia időszakra, 13 és 3 pedig 2071-2100-ra az A2, illetve B2 scenárióra vonatkozik. Vizsgálatainkban ezt a paramétert elemeztük a legrészletesebben, mert a napenergia szempontjából a legfontosabb.

2.2.2. A hosszuhullámú sugárzási egyenleg

A hosszuhullámú, vagyis a teresztrialis sugárzáson a földfelszín és a légkör által kibocsátott sugárzások összességét értjük (Czelnai, 1980). A nettó hosszuhullámú sugárzás a felszín kisugárzásának és a légkör kisugárzásának a különbségeként számolható, azonban meghatározása nehezebb, pontatlanabb mint a rövidhullámú sugárzásé, mivel csak tapasztalati alapú, empirikus képletek állnak rendelkezésre.

A vizsgálatainkhoz összesen 39 futtatást használtunk fel, melyből 17 a referencia időszakra, 15 és 7 pedig rendre az A2 és a B2 scenárióra vonatkozik.

2.3. A felhőborítottság

A felhőborítottság paramétere nagy szerepet játszik a sugárzásról készült vizsgálataink eredményeinek elemzésénél. Ha a felhőborítottság nő, akkor kevesebb sugárzás jut le a felszínre, ha pedig csökken, akkor több. A vízgőztartalom miatt a felszín hosszuhullámú kisugárzásából több nyelődik el a légkörben, s több sugárzódik vissza a felszín felé nagyobb mértékű felhőzet jelenléte esetén. Tehát mind a rövid-, mind a hosszuhullámú sugárzási egyenleget jelentősen befolyásolja ez a meteorológiai paraméter. Ahogy az

1. fejezetben már említettük, a PRUDENCE keretében futtatott modellek eredményei közül a hőmérsékleti, és csapadékmező Kárpát-medencében várható változásának részletes elemzése már megtörtént az Eötvös Loránd Tudományegyetemen (pl. Bartholy et al., 2008b). Ezen vizsgálatok alapján a nyári hónapokban várhatóan csökkenni fog a csapadék hazánk területén, télen pedig várhatóan növekedni. Ennek fényében vizsgálatainktól azt várjuk, hogy a felhőborítottság nyáron várhatóan csökkenni fog, télen pedig növekedni, míg a rövidhullámú sugárzás ezzel ellentétes alakulására számítunk.

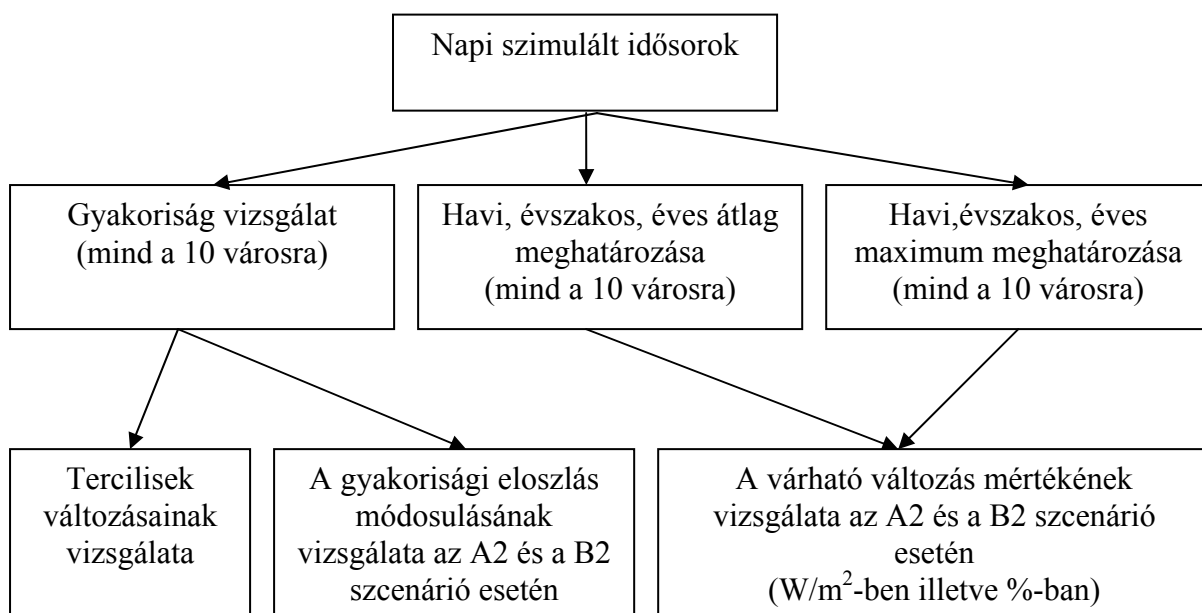
A felhőborítottságot a meteorológiai gyakorlatban ugyan oktában (nyolcadokban) adjuk meg, de a PRUDENCE adatbázisban százalékos formában vannak tárolva. A vizsgálatainkhoz 39 futtatást vettünk figyelembe, melyek közül 17 a referencia időszakra, 15, illetve 7 pedig rendre az A2 és a B2 scenárióra vonatkozik.

3. A sugárzás várható változásának elemzése

A napi szimulált adatok letöltése után a kiválasztott tíz rácspont értékeit három 30 éves időszakra vizsgáltuk: az A2 és a B2 jövőbeni időszakra (2071-2100) és a referencia időszakra (1961-1990). Dolgozatunk tárgya a három időszak szimulált idősorainak összehasonlító elemzése a három kiválasztott paraméterre.

3.1. Vizsgálati módszerek

A különböző időszakokra vonatkozó adatsorokat havi, évszakos és éves bontásban is összehasonlítottuk. Elemzéseink során vizsgáltuk a napi adatok gyakoriságának várható eltolódását a referencia időszakhoz képest, a maximumok, a tercilisek és a kvartilisek várható változásait az A2 és a B2 scenárió esetén, valamint az egyes modellek szimulációi alapján valószínűsíthető havi, évszakos és évi átlagos és maximális változásokat (2. ábra).



2. ábra: A három paraméterre vonatkozó szimulált adatsorokra elvégzett vizsgálatok

3.2. A várható változások mértéke és eloszlása

Minden városra és minden modellre meghatároztuk a napi sugárzási adatok havi átlagát, majd az évszakos átlagokat. Az A2, illetve B2 scenárióra vonatkozó értékeket összehasonlítottuk a referencia időszakra kapott értékekkel.

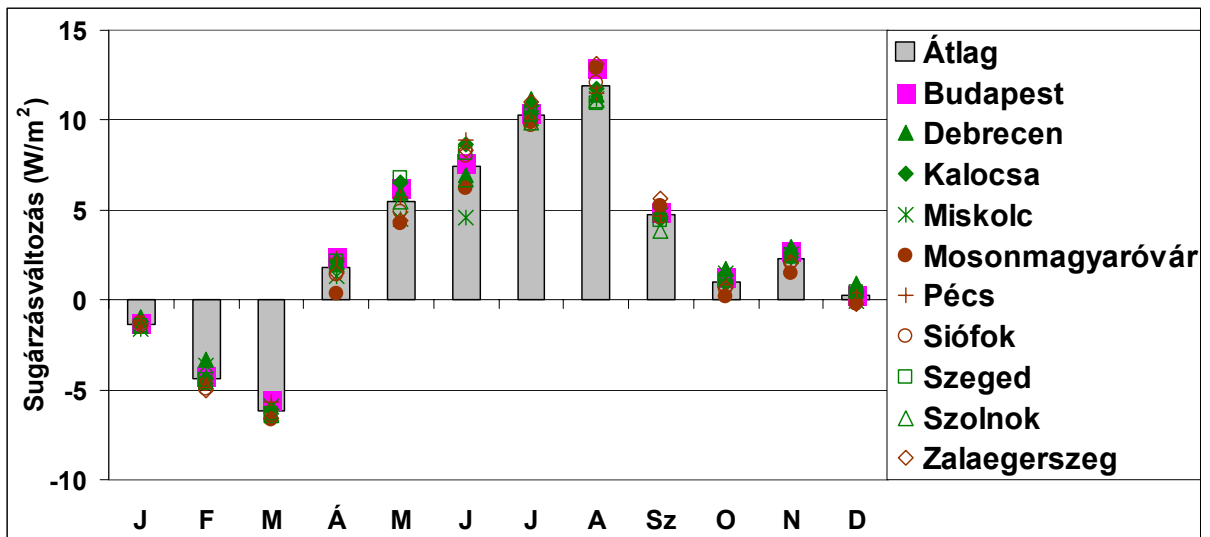
3.2.1. Nettó rövidhullámú sugárzás

A vizsgálataink fő eredményét a 4. táblázatban összegezzük, melyben az látszik, hogy éves szinten, mind az A2, mind a B2 scenárió esetén a nettó rövidhullámú sugárzás növekedése várható 2071-2100-ra. A B2 scenárió minden évszakban, míg az A2 scenárió csak tavasz és nyár esetén valószínűsít növekedést. A legnagyobb mértékű várható növekedést egyöntetűen tavaszra becslik a scenáriók.

4. táblázat: A vizsgált modellek által 2071-2100-ra prognosztizált évszakos tendenciák a sugárzásra hazánk területén

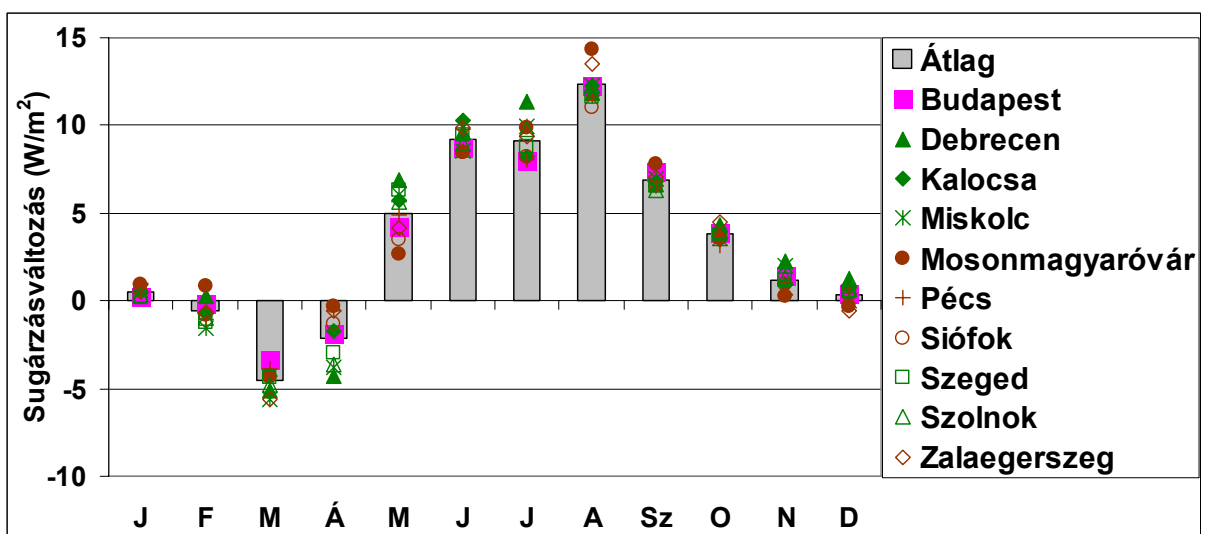
	A2>CTL	A2<CTL	B2>CTL	B2<CTL
tél	48%	52%	51%	49%
tavasz	93%	7%	91%	9%
nyár	74%	26%	82%	18%
ősz	26%	74%	64%	36%
év	60%	40%	72%	28%

Ezt követően a tíz városra külön-külön vizsgáltuk a szimulált adatsorokat, és így következtettünk a sugárzás változásának területi és időbeli eloszlására az A2 és a B2 scenárió esetén. A várható nettó rövidhullámú sugárzás városenkénti átlagos változását és az ezekből meghatározott országos átlagos változást láthatjuk havi bontásban a 3. és a 4. ábrán. Az A2 scenárióra vonatkozó szimulációk esetében (3. ábra) az összes városban, kisebb-nagyobb mértékű pozitív havi változásra számíthatunk a XXI. század végére, csökkenés csak a téli, tavasz eleji hónapokban várható. A legnagyobb sugárzáscsökkenés márciusban, a legnagyobb sugárzásnövekedés pedig augusztusban valószínűsíthető. A zölddel jelölt városok mutatják az ország keleti felében fekvő városokat, míg a barnával jelölt városok a nyugatiakat. E jelölés segítségével észrevehetjük, hogy a keleti városokban nagyobb a várható változások mértéke, mégha csak kis mértékben is, mint a nyugatiakban.



3. ábra: A rövidhullámú sugárzási egyenleg várható átlagos havi változása 2071-2100-ra az A2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)

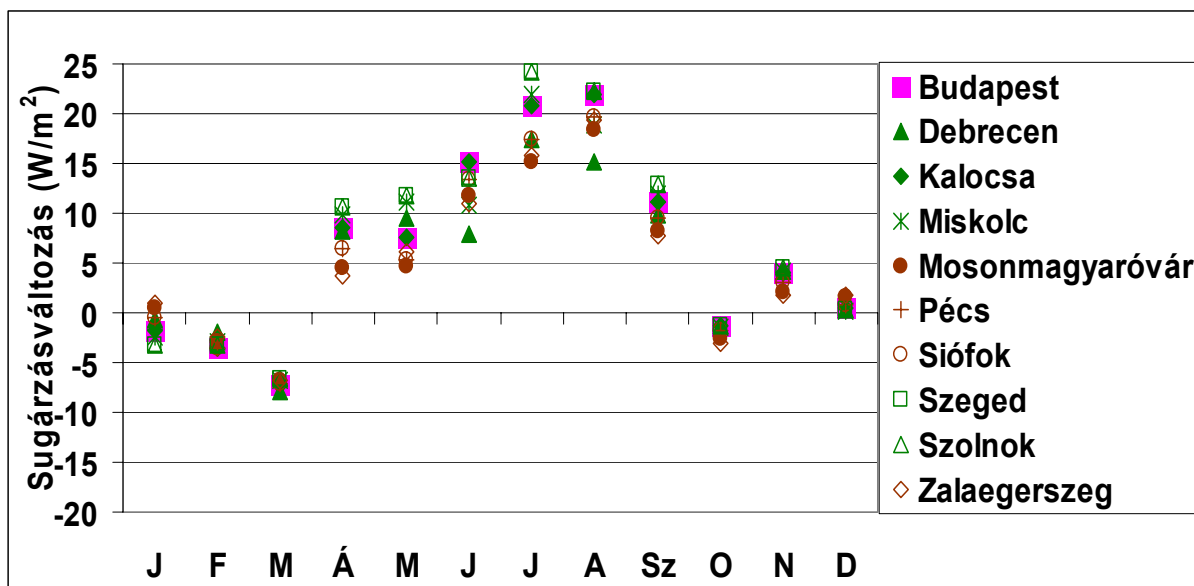
A B2 scenárióra vonatkozó átlagos havi várható változás hasonló jellegű, mint az A2 scenárió esetén (4. ábra). A legnagyobb mértékű sugárzásnövekedés itt is augusztusra várható, és a legnagyobb mértékű sugárzáscsökkenés pedig márciusra. A diagramról leolvasható, hogy a téli hónapokban nem számíthatunk jelentős mértékű sugárzásváltozásra, a szimulált változások értéke közel nulla. A területi eloszlást figyelve ismét észrevehetjük, hogy az ország keleti részén elhelyezkedő városok esetén várható nagyobb mértékű sugárzásváltozás.



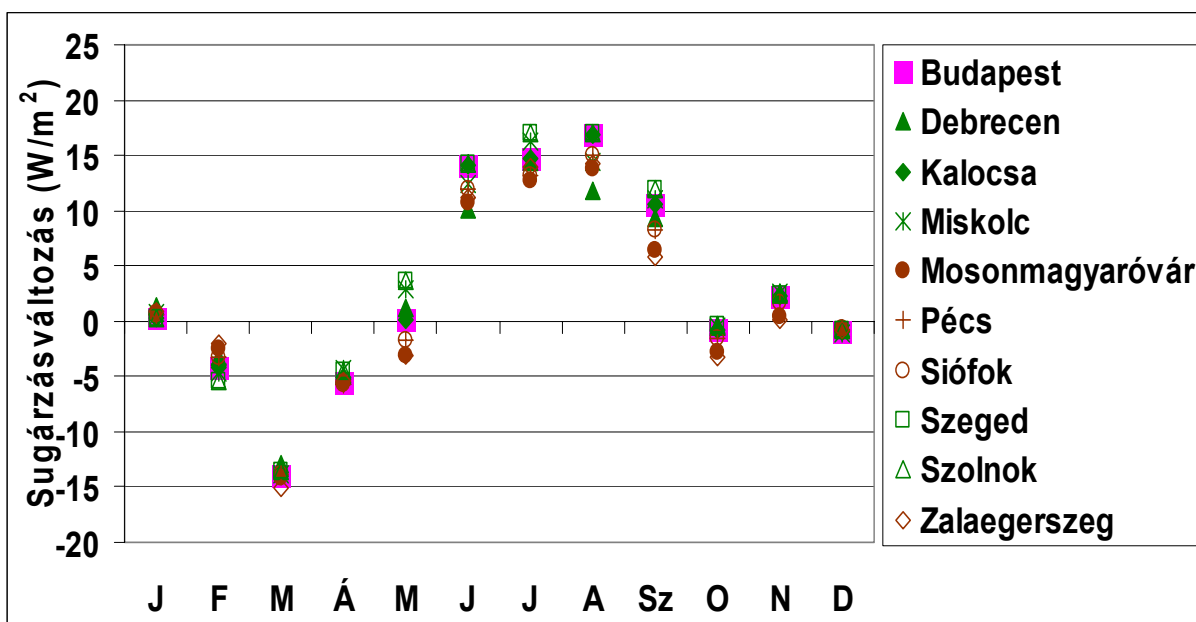
4. ábra: A rövidhullámú sugárzási egyenleg várható átlagos havi változása 2071-2100-ra a B2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)

Az összes modell átlagának együttes vizsgálata után példaként az 5. és 6. ábrán egy konkrét modellfuttatás eredményeit is bemutatjuk. A Svéd Hidrometeorológiai Intézet SMHI.HC-vel jelölt modellszimulációját mind az A2, mind a B2 scenárióra elvégezték. Az A2 scenárióra vonatkozó szimulációk esetében (5. ábra) júliusra és augusztusra várható a nettó rövidhullámú sugárzás legnagyobb mértékű növekedése, melynek értéke elérheti akár a 25 W/m^2 -t is. Csökkenés a téli, tavasz eleji hónapokban figyelhető meg, ennek mértéke azonban sosem nagyobb 4 W/m^2 -nél. A területi eloszlást figyelve azt láthatjuk, hogy a keletre fekvő városok esetében nagyobb sugárzásváltozásra lehet számítani a referencia időszakhoz képest, mint a nyugati városok esetében.

A B2 scenárió (6. ábra) is július és augusztus hónapra becsli a legnagyobb várható nettó rövidhullámú sugárzást, ám itt a nagysága még a 20 W/m^2 -t sem éri el. Az értékek több hónapban mutatnak sugárzáscsökkenést, mint az A2 scenárió esetében. A legnagyobb várható csökkenés márciusban jelentkezik, ekkor elérheti a 16 W/m^2 -t is. A területi eloszlás hasonlóan alakul, mint az A2 scenárió esetében: tehát a keleti területeken intenzívebb a változás. A több modellszimuláció átlagolásával kapott eredményeink is hasonló jellegűek (3. és 4. ábra), csupán a várható változások mértéke valamelyest kisebb, mely az átlagolásból adódik.



5. ábra: A rövidhullámú sugárzási egyenleg várható átlagos havi változása 2071-2100-ra az SMHI.HC modellfuttatás alapján az A2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)

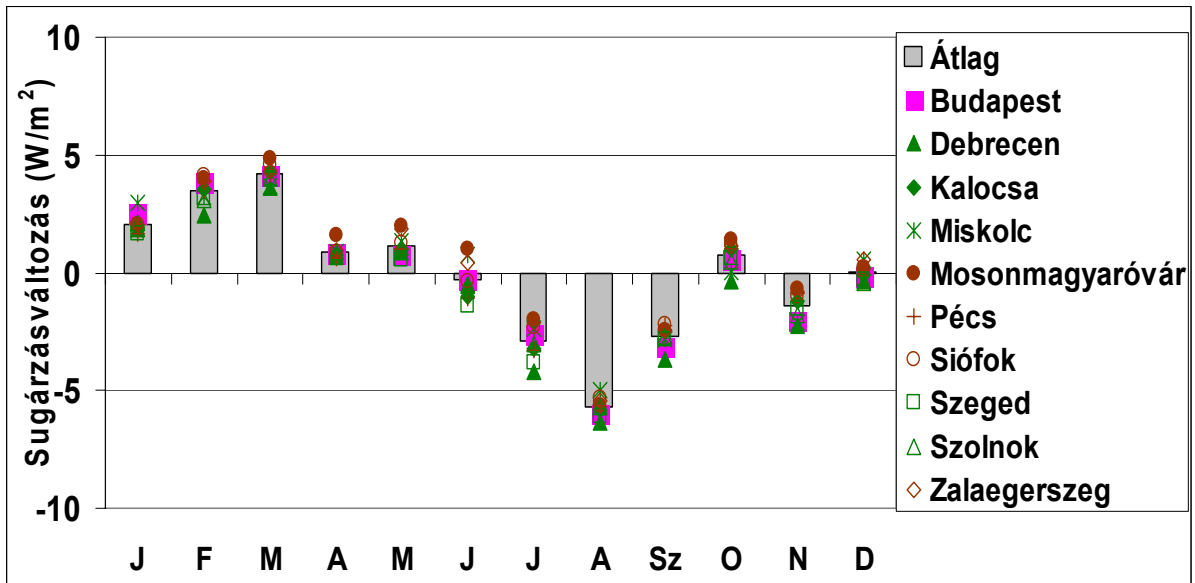


6. ábra: A rövidhullámú sugárzási egyenleg várható átlagos havi változása 2071-2100-ra az SMHI.HC modellfuttatás alapján a B2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)

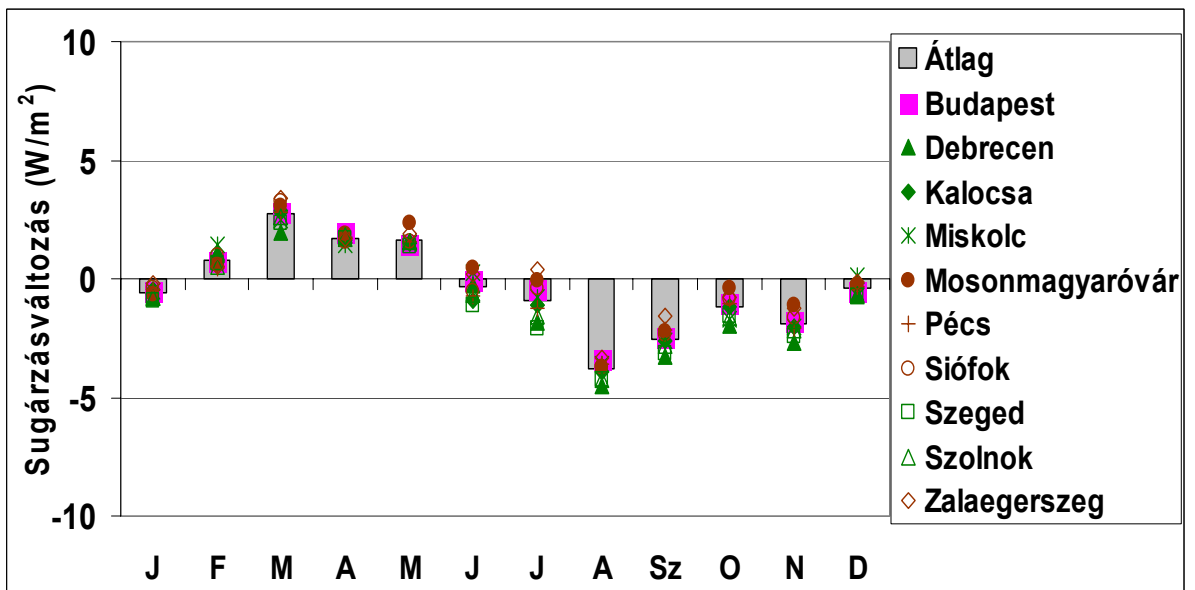
3.2.2. Nettó hosszúhullámú sugárzás

A 7. és 8. ábrán a hosszúhullámú sugárzási egyenleg havi átlagos változásait figyelhetjük meg a 10 városra külön-külön, valamint országos átlagban. Szembetűnő, hogy az A2 scenárió esetén (7. ábra) a várható pozitív változások a nyugati városok, míg a várható negatív változások az ország keleti részében intenzívebbek. Júniustól szeptemberig a nettó hosszúhullámú sugárzás csökkenése várható, míg decembertől májusig a csökkenése. A legnagyobb várható növekedést márciusra és a legnagyobb várható csökkenést augusztusra valószínűsíti az A2 scenárió. Áprilistól júniusig és októbertől decemberig a várható változások kisebb mértékűek.

A B2 scenárió esetén várható változások (8. ábra) hasonló jellegűek, mint az A2 esetén várható változások. Kisebb előjelbeli eltéréseket csupán januárra és októberre kaptunk.



7. ábra: A hosszuhullámú sugárzási egyenleg várható havi változása 2071-2100-ra az A2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)



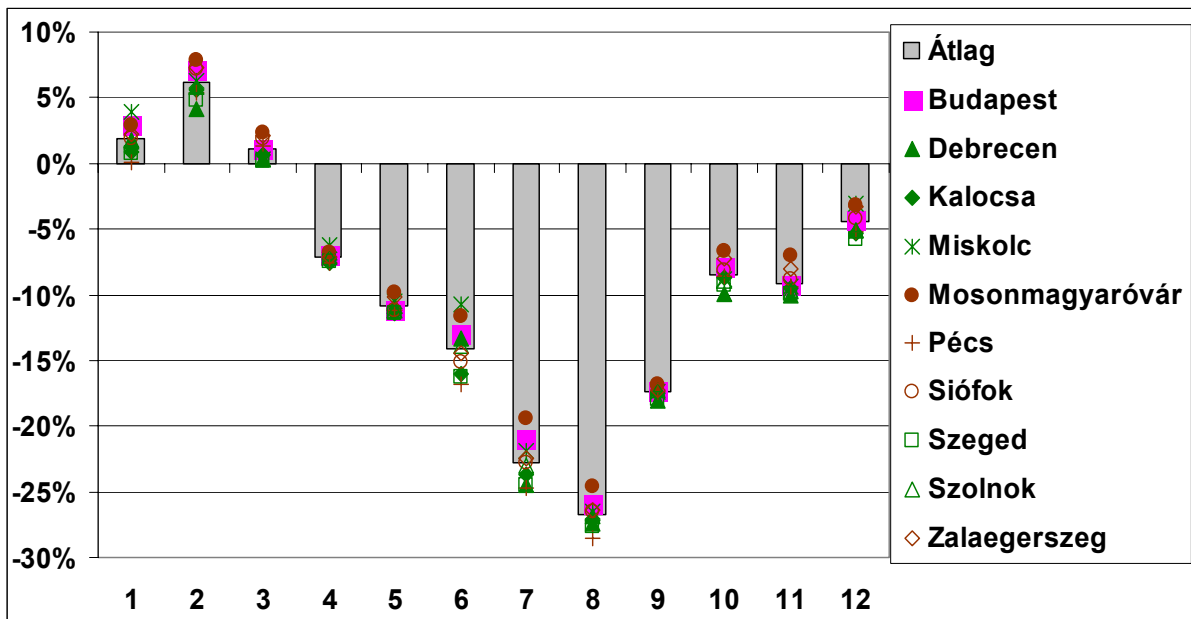
8. ábra: A hosszuhullámú sugárzási egyenleg várható havi változása 2071-2100-ra a B2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)

3.2.3. Felhőborítottság

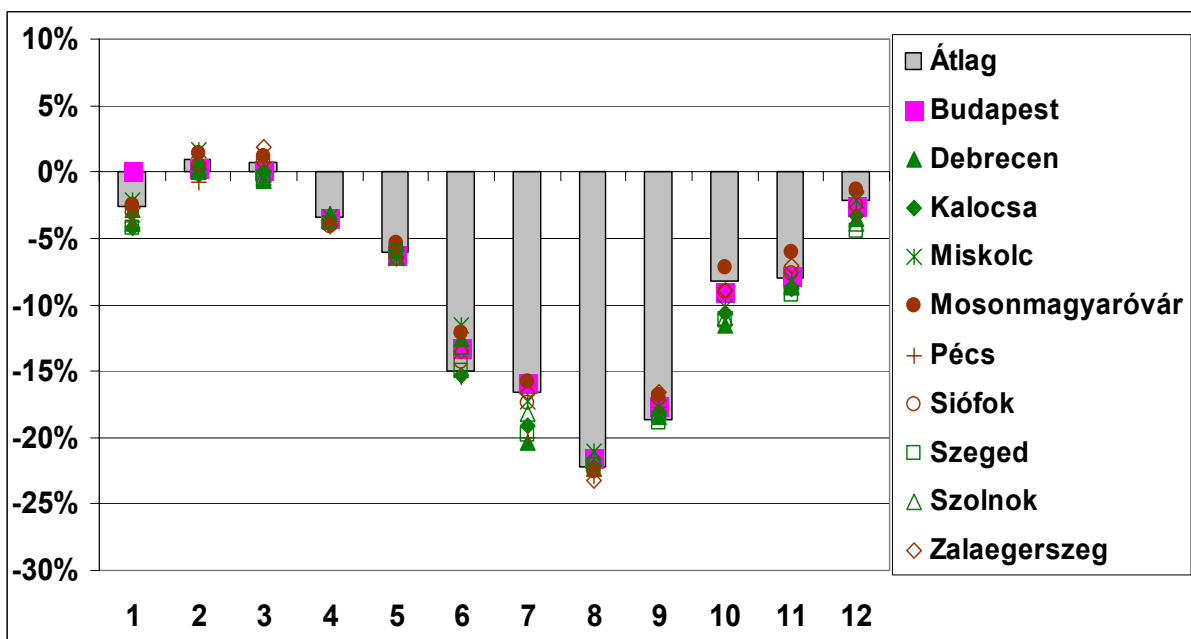
A 9. ábrán láthatjuk, hogy a PRUDENCE projekt modellszimulációi a hazai felhőborítottság csökkenését valószínűsítik az év nagyobb részében: áprilistól decemberig, majd kisebb mértékű (átlag néhány százalékos) növekedésre számíthatunk januártól márciusig. A legnagyobb mértékű csökkenés augusztusban várható, ekkor a csökkenés

mértéke akár a 25%-ot is meghaladhatja az egyes vizsgált rácspontokban. A B2 scenárió (10. ábra) hasonlóan az A2-höz, az év nagy részében a felhőborítottság várható csökkenését jelzi. A várható változások a B2 esetén valamelyest kisebb mértékűek, mint az A2 esetén; a februárra és márciusra jelzett növekedés például nem éri el a 2%-ot országos átlagban (februárban az A2 scenárió mintegy 6%-os növekedést valószínűsít). Januárban ellenkező előjelű az egyes modellszimulációkból adódó átlagos felhőborítottság-változás az A2 és B2 scenárió esetén bár abszolút értékben egyik sem éri el az 5%-ot. A területi eloszlást figyelve észrevehetjük, hogy a növekedés a nyugati, míg a csökkenés a keleti területeken intenzívebb habár ez utóbbi csak igen kis mértékű.

A kapott eredmények alátámasztják a csapadékra, a rövidhullámú sugárzási egyenlegre, illetve a hosszúhullámú nettó sugárzásra adódó várható változások éven belüli menetét. Az eddigi vizsgálatok azt mutatták, hogy télen várhatóan nő, nyáron pedig nagy valószínűség szerint csökken a csapadék mennyisége Magyarország területén (Bartholy et al., 2007d, 2008a). Ehhez jól illeszkedik a felhőborítottság nyári félévbeli várható csökkenése, s a február körüli növekedés. A rövidhullámú sugárzási egyenleg várhatóan nyáron növekedni fog, s ezzel összecsengenek a felhőborítottságra jelzett várható változások, hiszen mindkét scenárió a nyári félévre jelentős csökkenést valószínűsít. A hosszúhullámú nettó sugárzásban várható téli növekedés és nyári csökkenés ugyancsak összhangban van a felhőborítottság hasonló jellegű várható változásaival hiszen ha a felhőzet mennyisége nő, akkor több infravörös tartományú sugárzás érkezik az alsó légkör hőmérsékleti kisugárzása nyomán a felszínre, ezzel növelve a hosszúhullámú sugárzási egyenleget. Amikor pedig kisebb a felhőborítottság, akkor kisebb lesz a nettó hosszúhullámú sugárzás is.



9. ábra: A felhőborítottság várható havi változása
2071-2100-ra az A2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)



10. ábra: A felhőborítottság várható havi változása
2071-2100-ra a B2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)

3.3. A gyakoriság értékek eltolódásának vizsgálata

Statisztikai vizsgálataink során elemeztük a napi sugárzási és felhőborítottsági értékek empirikus eloszlásának várható eltolódását. Ehhez az összes városra és az összes modellszimulációra évszakonként meghatároztuk a vizsgált paraméterek relatív gyakoriságait. Az A2 és a B2 scenárió, valamint a referencia időszak szimulált idősorára kapott hisztogramokat ábrázoltuk és összevetettük. Az itt bemutatott elemzésekben mind a tíz városra, s az összes modellre átlagolt eloszlásokat tekintjük, a nettó rövid, és hosszúhullámú sugárzásra, illetve a felhőborítottságra Magyarország egész területére 2071-2100-ra az 1961-1990-es referencia időszakhoz viszonyítva.

3.3.1. Nettó rövidhullámú sugárzás

A 11. ábra diagramjain szembetűnő, hogy a rövidhullámú sugárzási egyenlegnek erőteljes éves menete van, tehát a nyári hónapokban 3-4-szer magasabb értékek is megfigyelhetők, mint a téli hónapokban.

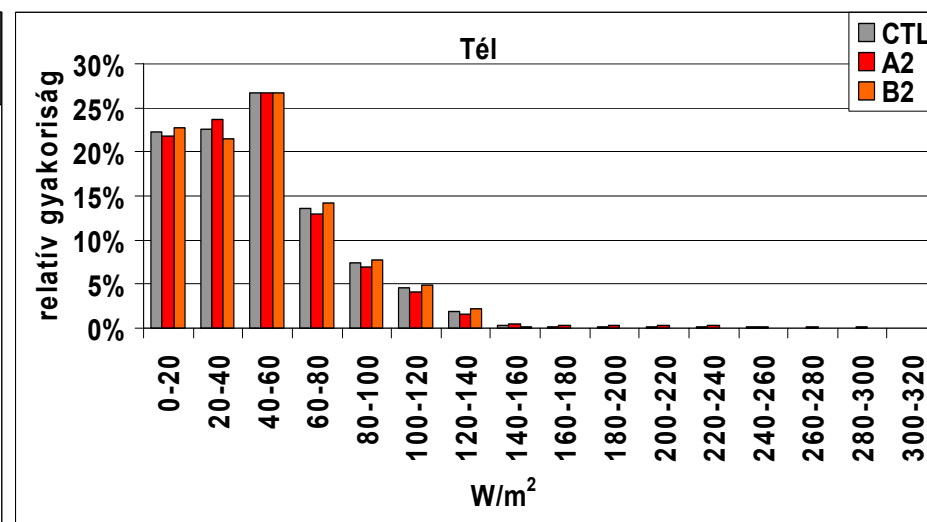
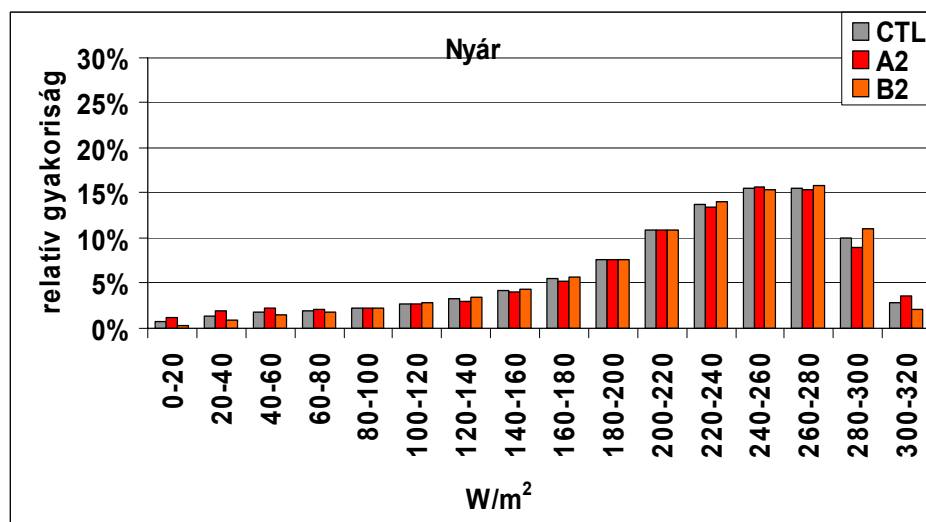
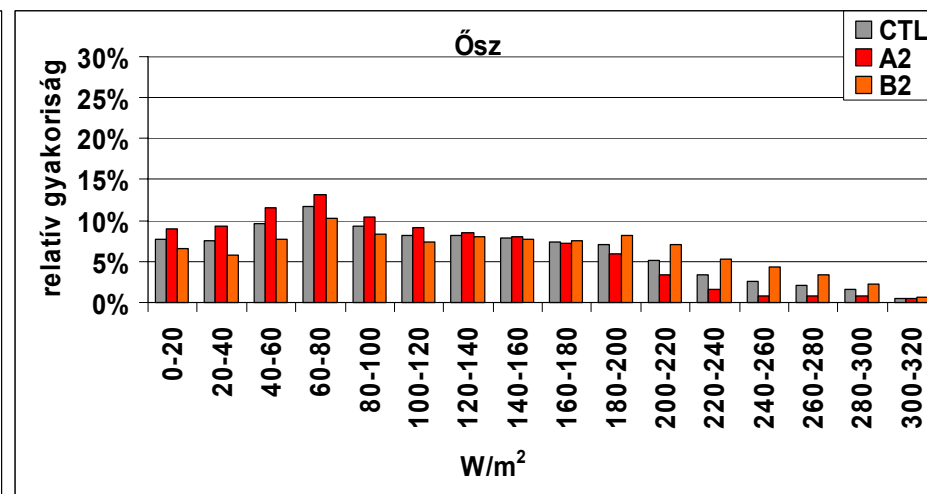
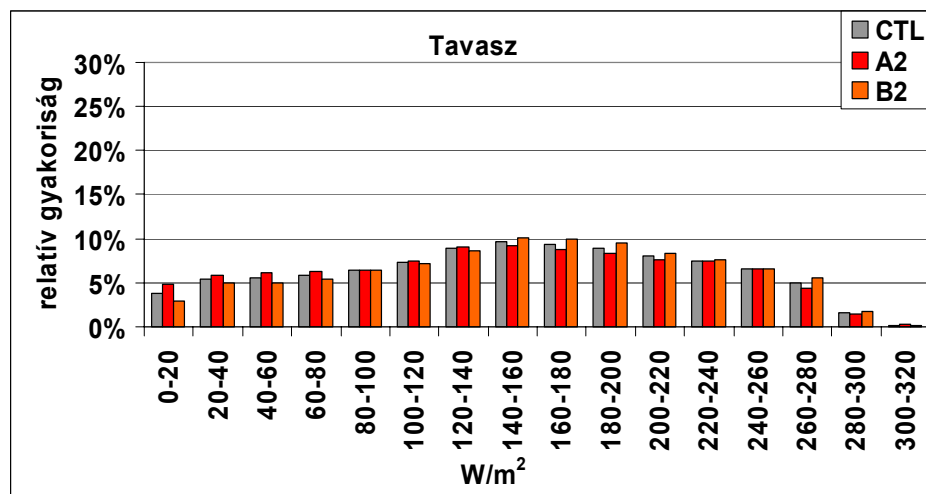
Tavasszal a beérkező sugárzás több mint fele esik a 100 és 240 W/m²-es értékek közötti intervallumba. Ősszel a 0 és 220 W/m² közötti intervallumokban a gyakoriságok hasonlóak, 5-10% között mozognak. Nyáron a 200-300 W/m² fluxus a legvalószínűbb, ide esik a nettó rövidhullámú sugárzás 65%-a, míg télen a 80 W/m² fluxus alatti sugárzási tartomány a legvalószínűbb, a nettó sugárzás mintegy 85%-a tartozik ide. Tél esetén a gyakoriság az egyes intervallumokban is nagyon magas, akár a 25%-ot is elérheti, ami jelzi a téli időszak egyenletesen alacsony rövidhullámú sugárzási egyenlegét.

Ezek után nézzük meg, hogy a PRUDENCE projekt szimuláció alapján, hogyan tolódik el a nettó rövidhullámú sugárzás eloszlása 2071-2100-ra a különböző évszakokban a referencia időszakhoz viszonyítva.

Tavasszal nyáron és ősszel az A2 scenárió szerint az alacsonyabb sugárzási fluxusok esetében a gyakoriság növekedésére, míg a magasabbak esetén a csökkenésére számíthatunk, a B2 scenárió szerint ennek az ellenkezőjét valószínűsítik a modellek. A gyakoriság eltolódása ősszel a legjelentősebb (a 200 W/m²-nél nagyobb sugárzási egyenleg aránya összességébe 10%-kal megnövekedhet a XXI. század végére), tavasszal és nyáron csak 1-2%-os relatív gyakoriság változásra számíthatunk a referencia időszakhoz képest. A téli negyedévben a 140 W/m²-nél magasabb fluxus értékek szinte nem is fordulnak elő, s ez a jövőben is nagy valószínűséggel így marad. A 40 és 60 W/m² közötti intervallumban mind a scenáriók, mind a referencia időszak nagyon hasonló relatív gyakoriságot jelez, az

ennél magasabb értékeknél, a múltbeli időszak idősorai kisebb gyakoriságot mutatnak, mint a B2 scenárió, de nagyobbat, mint az A2 scenárió.

Mind a négy évszokról elmondható, hogy míg az alacsonyabb sugárzási fluxus értékeknél a gyakoriság csökkenését jelzi a B2 scenárió, addig a magasabbaknál annak növekedését valószínűsíti, vagyis a nettó rövidhullámú sugárzás várhatóan növekedni fog a XXI. század utolsó évtizedeire. Az A2 scenárió ennek az ellenkezőjét prognosztizálja, tehát az alacsonyabb értékek növekedését és a magasabbak csökkenését, ami a nettó rövidhullámú sugárzás csökkenését valószínűsíti 2071-2100-ra az 1961-1990 időszakhoz viszonyítva.



11. ábra: A nettó rövidhullámú sugárzás gyakoriságának évszakos eltolódása a referencia időszakhoz (1961-1990) képest

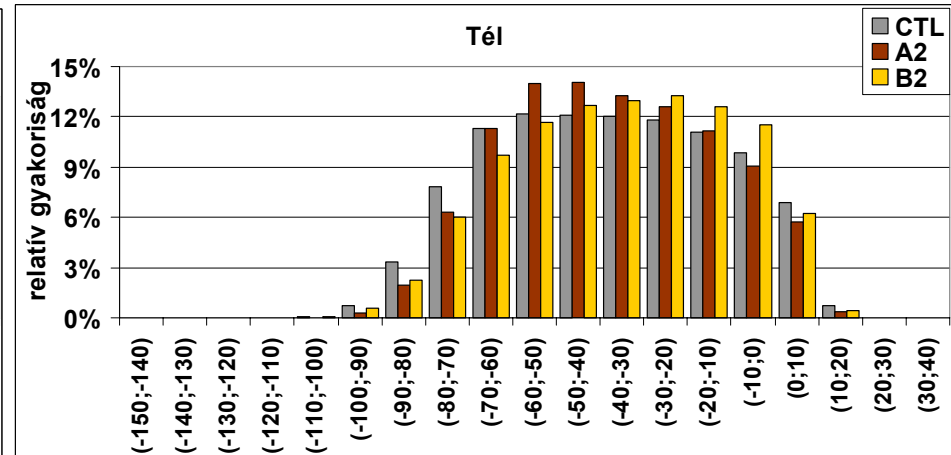
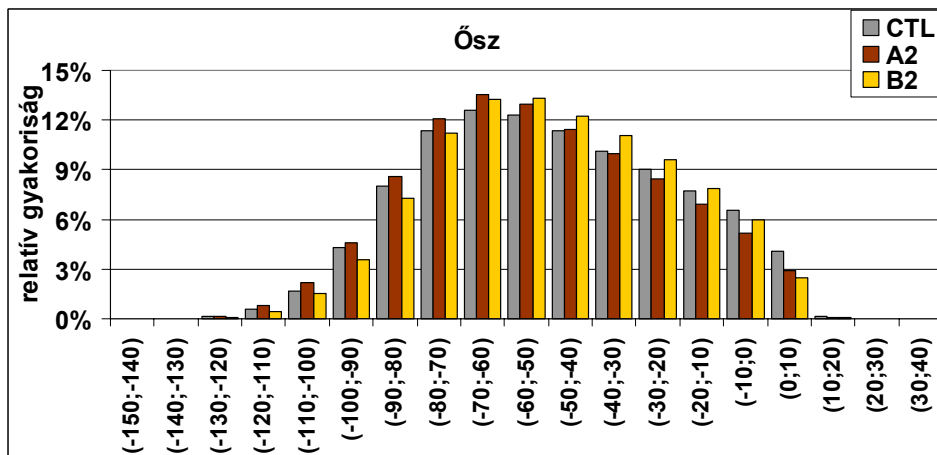
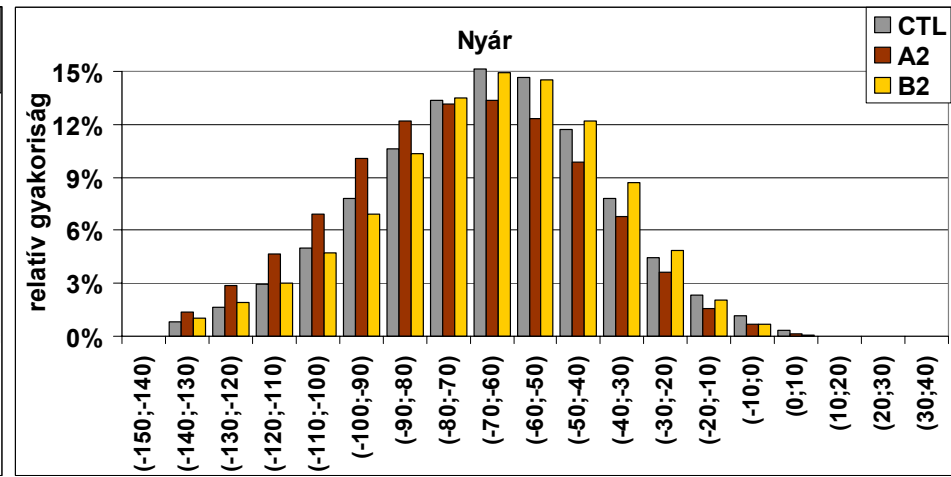
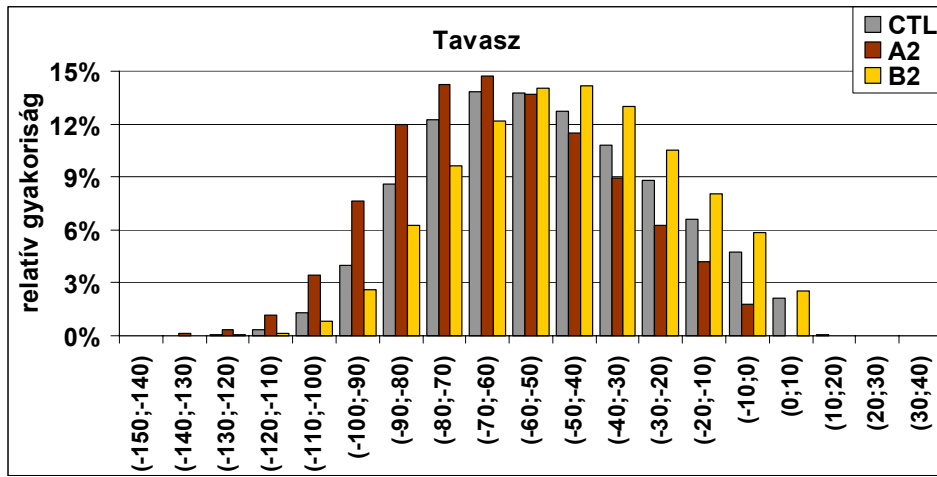
3.3.2. Nettó hosszúhullámú sugárzás

A 12. ábrán a nettó hosszúhullámú sugárzás évszakos eloszlásait mutatjuk be a referencia időszakban és a XXI. század utolsó három évtizedében az A2 és a B2 scenárióra vonatkozóan. A hosszúhullámú sugárzási egyenleg esetén is megfigyelhető éves menet, de jóval kisebb mértékű, mint a rövidhullámú sugárzási egyenleg esetén.

Tavasszal és ősszel a hosszúhullámú sugárzási egyenleg több, mint 70%-a esik a -90 és -20 W/m^2 közötti tartományba. Télen kevésbé negatív az egyenleg, az értékek nagyrészt a -80 és 0 W/m^2 közötti intervallumba esnek. A nyári hónapokban a nagyobb mértékű felszíni kisugárzás miatt a hosszúhullámú sugárzási egyenleg negatív irányba tolódik el, nagyrészt a -100 W/m^2 és -30 W/m^2 közötti tartományba.

A B2 scenárió esetén mind a négy évszakban elsődlegesen a nettó hosszúhullámú sugárzás növekedésére számíthatunk, hiszen a nagyobb sugárzási értékek gyakorisága várhatóan növekedni fog, a kisebbeké pedig csökkenni.

Az A2 scenárió esetén a PRUDENCE projekt modellszimulációi tavasszal, nyáron és ősszel a sugárzási egyenleg várható csökkenését valószínűsítik, hiszen a hisztogramok alapján a kisebb értékek gyakorisága várhatóan jelentősen nő, a nagyobbaké pedig csökken. Télen a nettó hosszúhullámú sugárzás gyakorisági eloszlása a többi évszakkal ellentétben nem egyirányba tolódik el, hanem úgy módosul, hogy a -60 W/m^2 és -20 W/m^2 közötti tartomány relatív gyakorisága megnövekszik, s az ennél kisebb és nagyobb sugárzási értékek relatív gyakorisága egyaránt várhatóan csökkenni fog.



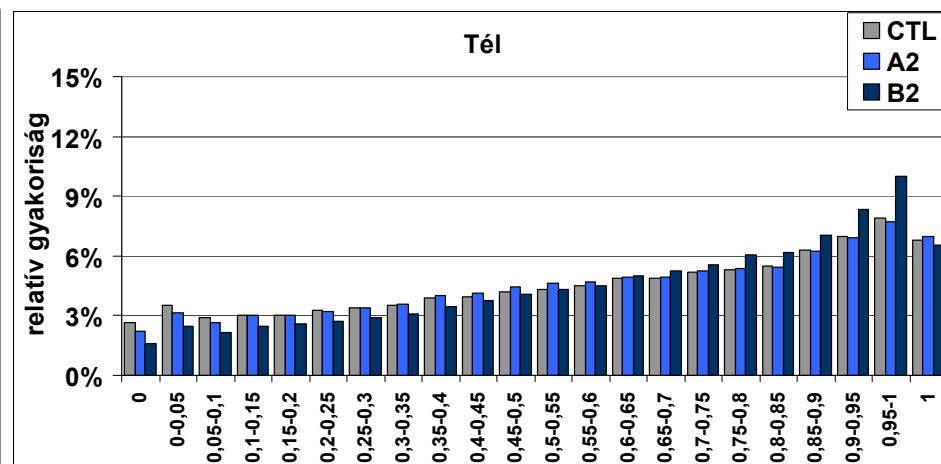
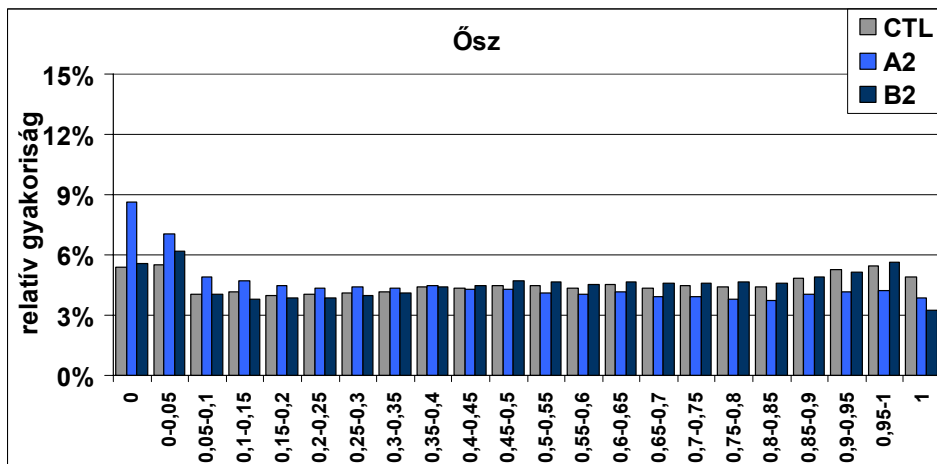
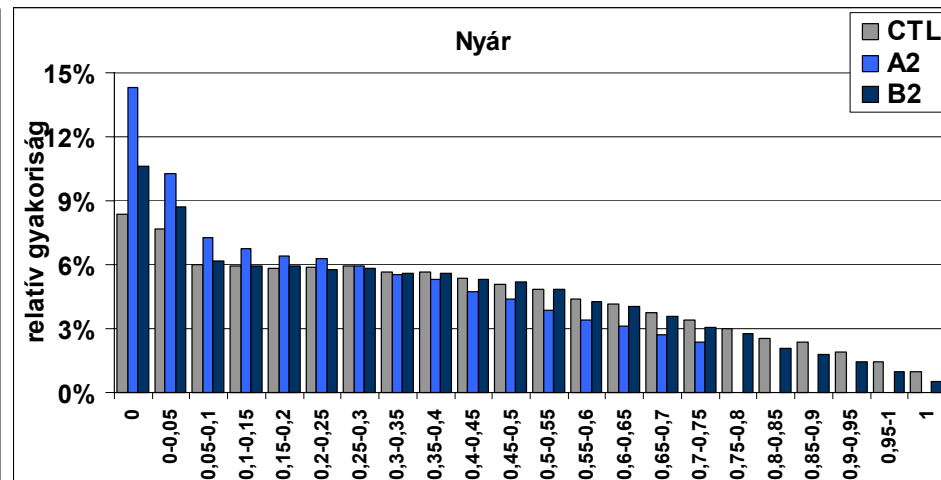
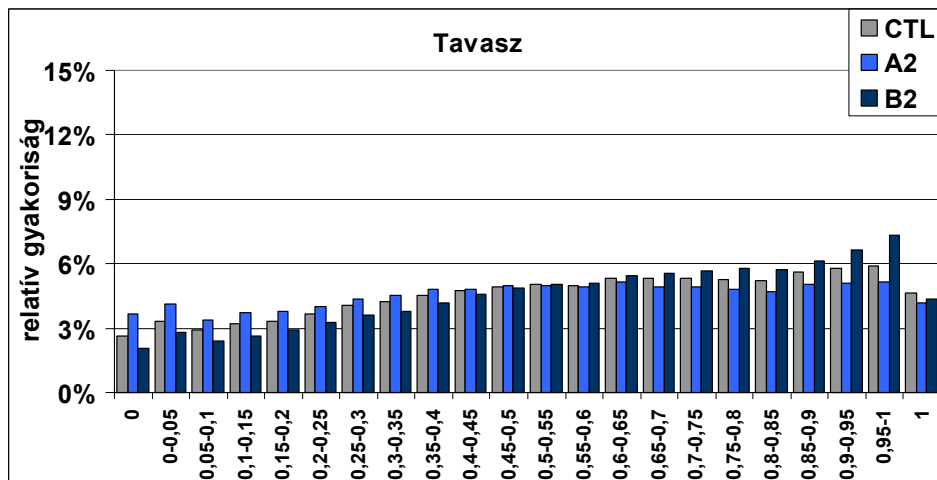
12. ábra: A nettó hosszuhullámú sugárzás gyakoriságának évszakos eltolódása a referencia időszakhoz (1961-1990) képest

3.3.3. Felhőborítottság

A 13. ábrán a felhőborítottságra vonatkozó szimulációk évszakos eloszlásait vetjük össze az 1961-1990 referencia időszakra és a 2071-2100 jövőbeli időszakra az A2 és a B2 scenárió esetén.

Az előző két paraméterhez hasonlóan itt is megfigyelhető markáns éves menet. Nyáron inkább derült az égbolt, ekkor azon esetek száma amikor az ég több mint háromnegyede felhővel borított, nagyon alacsony számban fordul elő, mind összesen csak 15%-ban. A teljesen tiszta ég és az alig borult azonban az esetek több, mint 30%-ában jelenik meg. Télen (és kisebb mértékben tavasszal) a nyárral ellentétes alakú gyakorisági eloszlás jellemző. Ekkor a borult ég előfordulásának valószínűsége 24% körüli, míg a tiszta ég előfordulása alig éri el a 6%-ot. Ősszel nagyjából egyenletes eloszlás jellemző, a tiszta égbolt, a felhős idő és a teljesen borult ég közel azonos (4-5%-os) relatív gyakoriságban fordul elő.

A gyakorisági eloszlás eltolódásának vizsgálatokor össze kell hasonlítanunk, hogy milyen mértékű és irányú eltolódást figyelhetünk meg a referencia időszak és a különböző scenáriók között. A nyári és őszi hónapokat vizsgálva láthatjuk, hogy a tiszta ég előfordulásának gyakorisága várhatóan nő, a borult égé pedig csökken. A várható változások mind a két scenárió esetén hasonló jellegűek, ám az A2 scenárió esetén jóval nagyobbak. A nyári időszak várható derültebbé válása nagyobb mértékű, mint az őszi időszaké az A2 és a B2 scenárió esetén egyaránt. A téli hónapokban a derült és kevésbé felhős ég előfordulásának valószínűsége várhatóan csökken mindkét scenárió esetén (a B2-re jelentősebb mértékben, mint az A2-re), s a felhőborítottság növekvő mértékére számíthatunk, elsősorban a B2 scenárió esetén. A tavaszi hónapokban a két scenárió eltérő jellegű változást jelez 2071-2100-ra. Míg az A2 a borult és erősen felhős időszakok előfordulásának csökkenését és a derült, kevésbé felhős időszakok növekedését prognosztizálja, addig a B2 scenárió éppen ellenkezőleg, a borultabb időszakok gyakoribbá válását, s a derültebb időszakok ritkábbá válását jelzi.



13. ábra: A felhőborítottság gyakoriságának évszakos eltolódása a referencia időszakhoz (1961-1990) képest

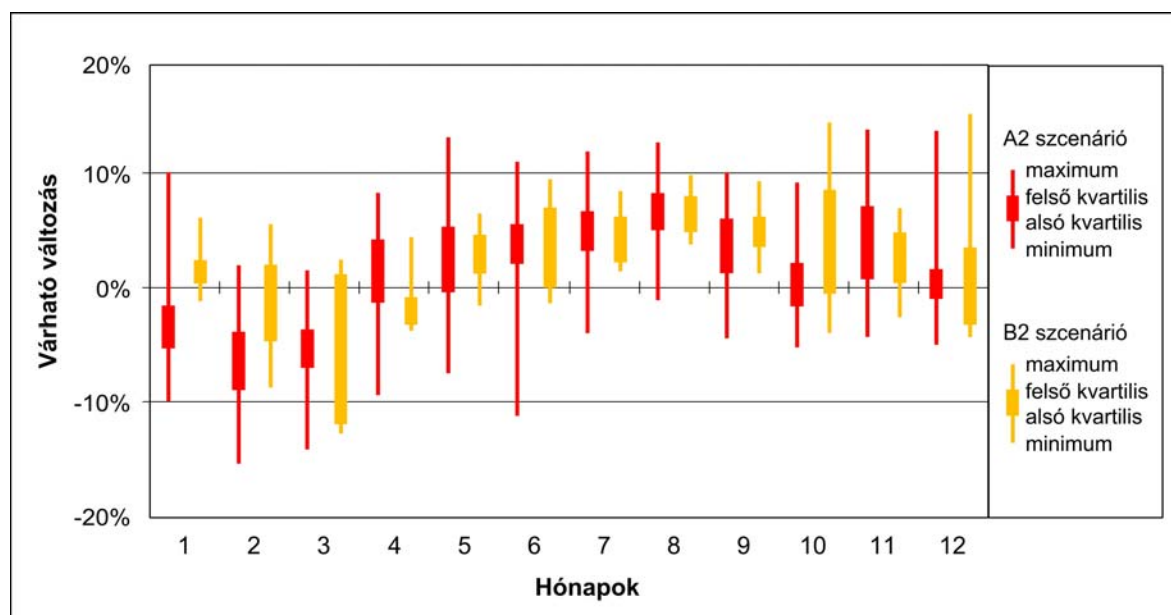
3.4. A kvartilisek és a szélsőértékek vizsgálata

Ebben a fejezetben a sugárzási egyenleg és a felhőborítottság várható havi átlagos változásainak statisztikai jellemzőit (a kvartiliseket és a szélsőértékeket) vizsgáljuk. Eredményeinket úgynevezett Box-Whisker diagramokon ábrázoljuk relatív mértékben (százalékos formában) kifejezve. A grafikonokon látható kis téglalapok szélei az alsó és a felső kvartilist jelölik és a várható változások középső 50%-át reprezentálják, a vékonyabb vonalak pedig a maximális és a minimális várható változás között húzódnak.

3.4.1. Nettó rövidhullámú sugárzás

A 14. ábrán jól látható, hogy a havi átlagos sugárzásváltozási értékek kvartilisei a nyári félévben jellemzően pozitívak, míg a téli félévben döntő többségben negatívak. Tehát májustól szeptemberig a nettó rövidhullámú sugárzás növekedése valószínűsíthető, míg a téli hónapokban (elsősorban februárban és márciusban) csökkenésre számíthatunk. A legnagyobb várható növekedést mind a két scenárió augusztusra jelzi. A legnagyobb várható csökkenést az A2 scenárió esetén februárra, míg a B2 scenárió márciusra várható.

Az A2 scenárió esetén a változások szélesebb intervallumba esnek, mint a B2 scenárió esetén. Ez főként abból adódik, hogy több szimuláció állt rendelkezésre az A2 scenárióra, mint a B2-re.



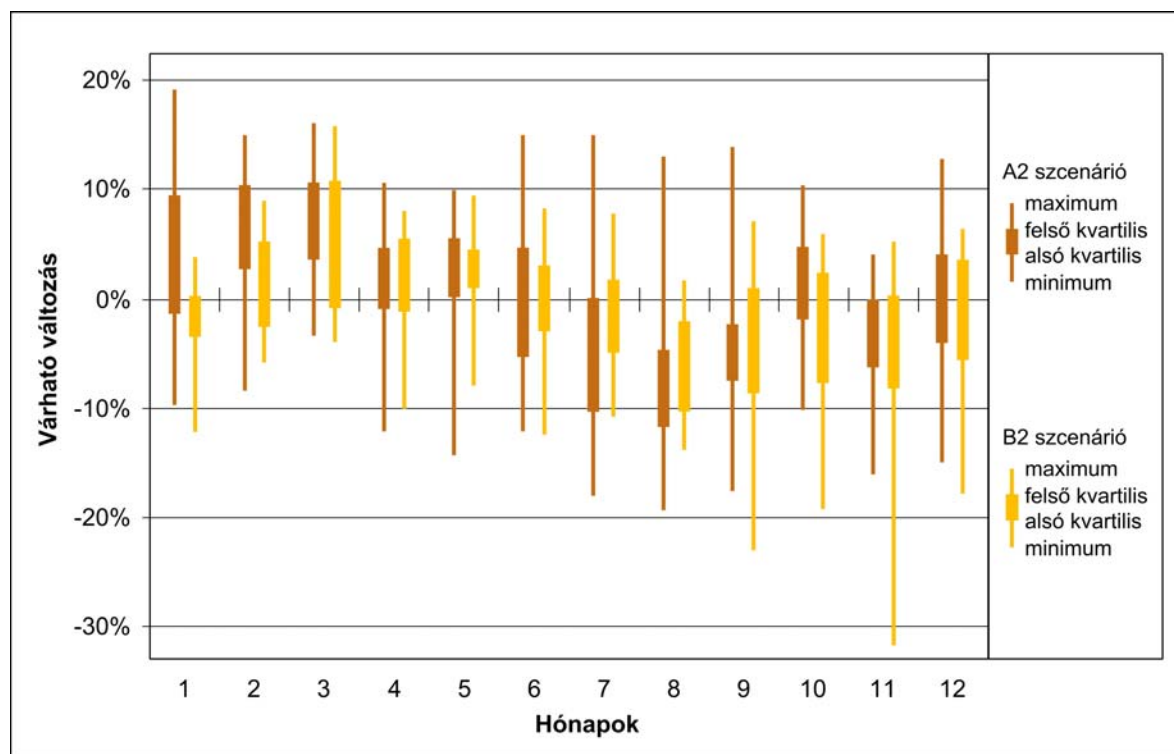
14. ábra: Az átlagos havi nettó rövidhullámú sugárzás 2071-2100-ra várható relatív változásainak összehasonlítása az A2 és a B2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)

3.4.2. Nettó hosszúhullámú sugárzás

A 15. ábrán a hosszúhullámú sugárzási egyenleg 2071-2100-ra várható változásaiból meghatározott szélsőértékek és kvartilisek láthatók.

Az A2 és a B2 scenárióra adódó várható változások nagyrészt hasonló éven belüli menetet követnek. Az év nagy részében az A2 forgatókönyv becslései ölelnek fel szélesebb intervallumot (kivéve novemberben). Mind az A2, mind a B2 scenárió esetén megállapíthatjuk, hogy az év nagy részében a PRUDENCE projekt modellszimulációi a hosszúhullámú sugárzási egyenleg csökkenését nagyobb arányban prognosztizálják, mint a növekedést. A tél végi, tavasz eleji hónapokban várhatóan kis mértékű sugárzás növekedésre számíthatunk.

A legnagyobb várható átlagos csökkenés augusztusban, a legnagyobb várható növekedés pedig márciusban valószínűsített, melyek mértéke mintegy 5-10%-os.



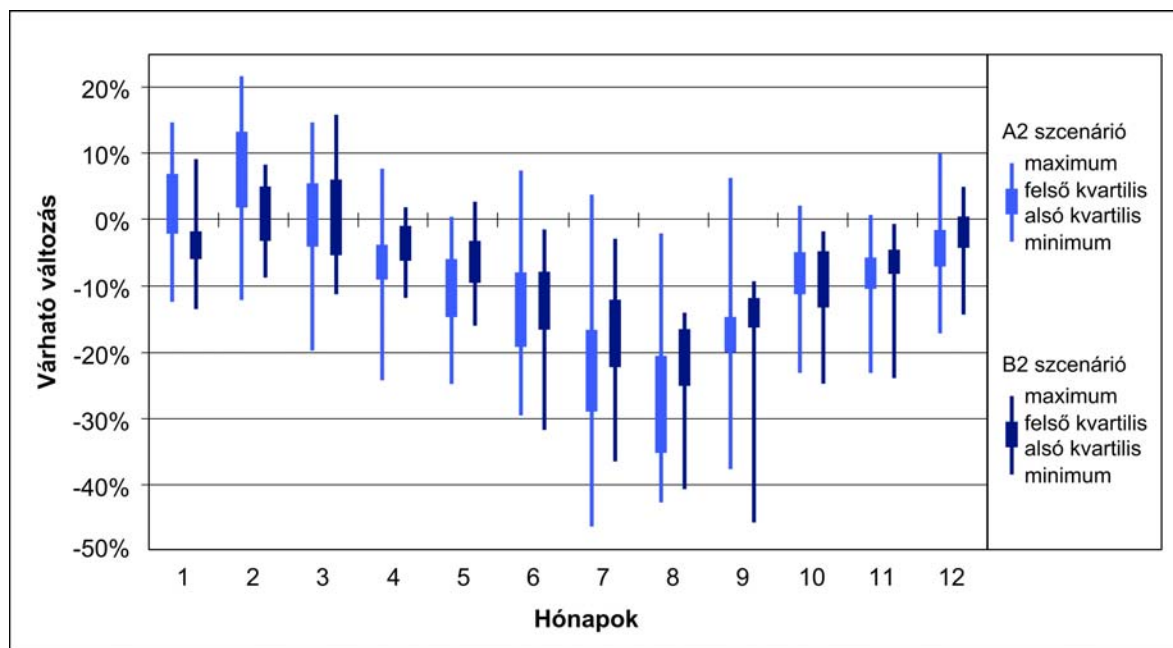
15. ábra: Az átlagos havi nettó hosszúhullámú sugárzás 2071-2100-ra várható relatív változásainak összehasonlítása az A2 és a B2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)

3.4.3. Felhőborítottság

A 16. ábrán láthatjuk, hogy a felhőborítottság havi átlagos várható változásainak kvartilisei a tél végi és tavasz eleji hónapok kivételével negatívak. Az A2 scenárió esetében kismértékű növekedés várható januártól márciusig, a B2 scenárió esetében pedig csak februárban és márciusban. A téli hónapokban mind a két scenárió szimulációi csak igen kis mértékű negatív változást jeleznek 2071-2100-ra.

A modellszimulációkból adódó várható változások minimum és maximum értékei közti különbség az A2 forgatókönyv esetén szélesebb intervallumot ölel fel, mint a B2 esetén, mely főként abból adódik, hogy az A2 scenárióra kétszer annyi modellszimuláció állt rendelkezésre, mint a B2 scenárióra.

Mind a két scenárió esetén az eddigi eredményeinkkel összhangban nyáron és ősszel a felhőborítottság csökkenése, tél végén és tavasz elején pedig kisebb mértékű növekedése várható. A legnagyobb várható csökkenést mind a két scenárió augusztusra jelzi, melynek mértéke az A2 esetén meghaladhatja a 30%-ot.



16. ábra: Az átlagos havi felhőborítottság 2071-2100-ra várható relatív változásainak összehasonlítása az A2 és a B2 scenárió esetén (referencia időszak: 1961-1990)

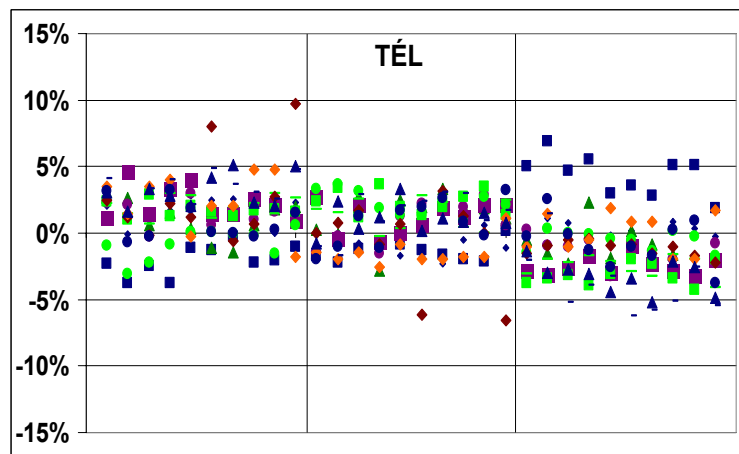
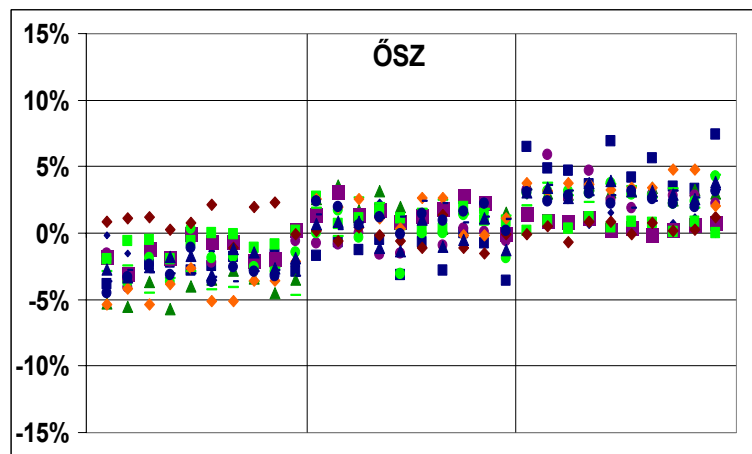
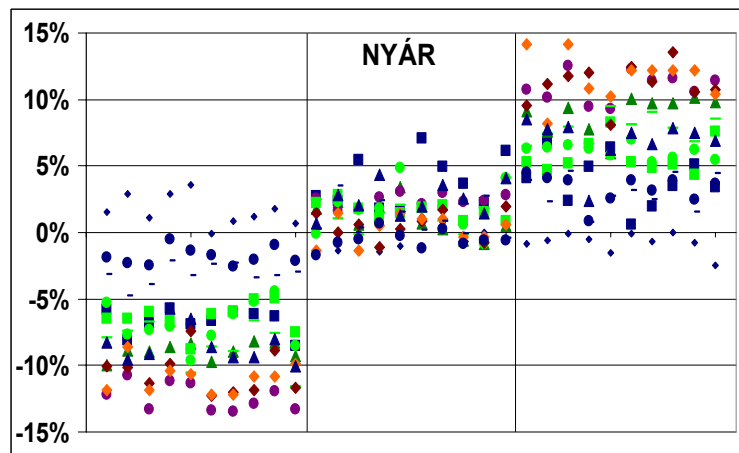
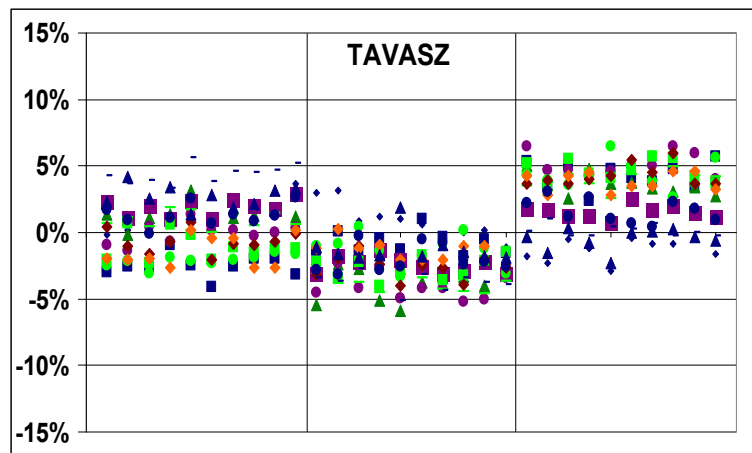
3.5. A tercilisek vizsgálata

A tercilisek vizsgálatánál, a referencia időszak szimulált adatsoraiból képzett rendezett minták harmadoló pontjainak várható eltolódását elemezzük. A vizsgálat elvégzéséhez meghatároztuk az 1961-1990 referencia idősakra és a 2071-2100 jövőbeli idősakra, az A2 és a B2 scenárióra vonatkozó szimulált adatsorok terciliseit, majd kiszámítottuk ezek különbségeit minden egyes vizsgált rácspontra, s minden modellre. Ezután a múltbéli időszak terciliseinek felhasználásával három intervallumot definiáltunk: az alsó tercilis alatti, a felső tercilis feletti, valamint az alsó és a felső tercilis közötti tartomány. Az A2 és a B2 scenárióra vonatkozó szimulációs idősorok alapján meghatároztuk az így kialakított három harmad szerinti megoszlást, mindhárom sugárzással kapcsolatos vizsgált paraméter esetén. Mivel a referencia időszakban definíció szerint az eloszlás 1/3-1/3-1/3 arányú, így a jövőbeli idősokra kapott arány ismeretében az eloszlás várható eltolódására következtethetünk.

3.5.1. Nettó rövidhullámú sugárzás

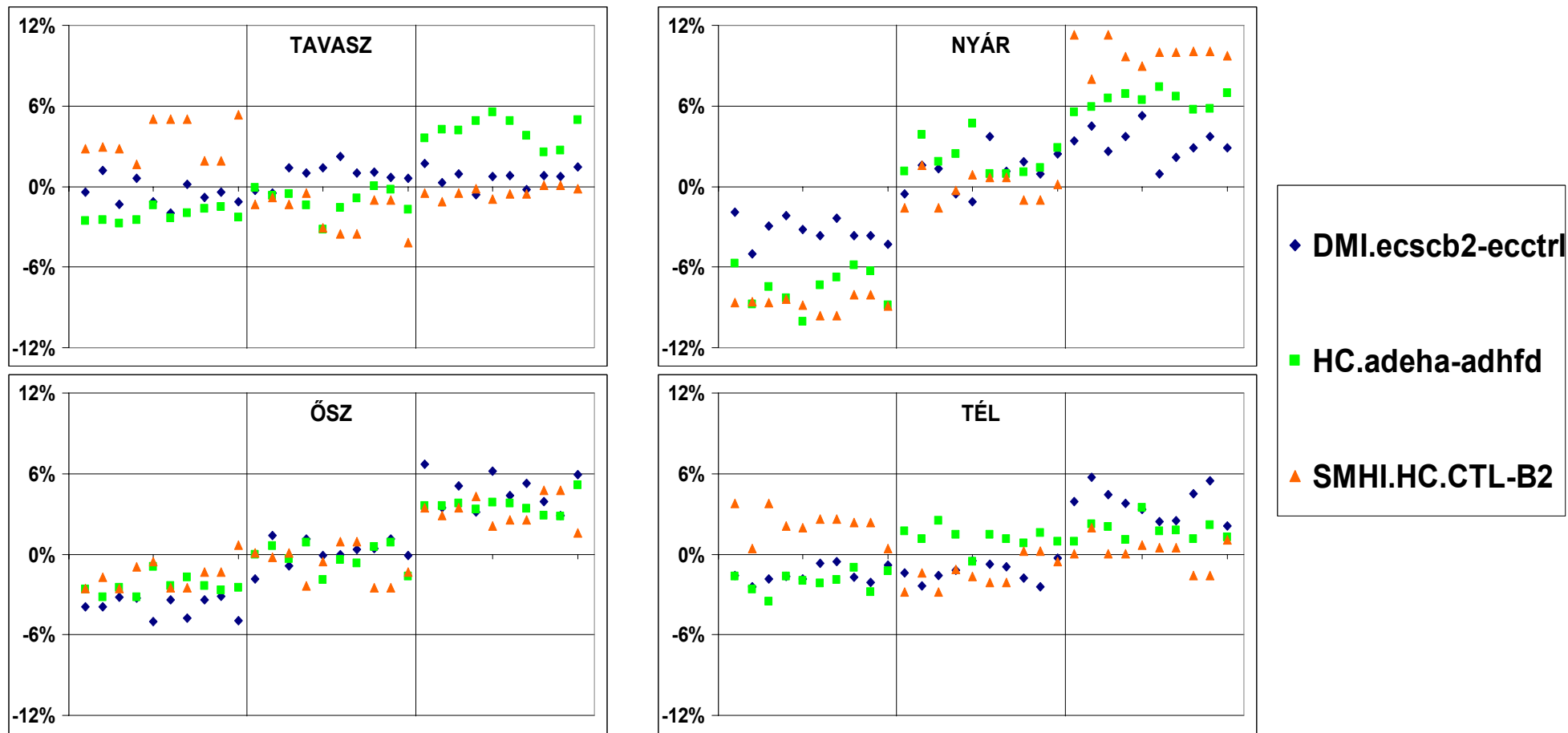
Az A2 scenárió esetén (17. ábra) tavasszal, nyáron és ősszel várhatóan növekszik a felső harmadba eső nettó rövidhullámú sugárzás aránya. A növekedés nyáron a legjelentősebb, ekkor a várható változások mértéke meghaladhatja a 10%-ot. A téli hónapokra a modellek döntő többsége szerint a nettó rövidhullámú sugárzás csökkenése prognosztizálható.

A B2 scenárióra a szimulált adatsorok alapján (18. ábra) mind a négy évszakban átlagosan növekedésre számíthatunk 2071-2100-ra. A várható növekedés nyáron a legjelentősebb, ekkor akár 12%-os is lehet. A három futtatott modell közül csak a Svéd Hidrometeorológiai Intézet (SMHI) modellfuttatása valószínűsíti a rövidhullámú sugárzási egyenleg csökkenését tavasszal és télen.



- ◆ DMI.ECC-ECS
- DMI.ecsca2-ecctrl
- ▲ ETH.HC-A2-CTL
- GKSS.CTL-SA2
- GKSS.CTL-SA2sn
- HC.adeha-adhfa
- HC.adehb-adehfe
- HC.adehc-adehff
- ◆ KNMI.HC1-A2
- ◆ SMHI.HC.CTL-A2
- DMI.HC1-S1
- ▲ DMI.HC2-S2
- DMI.HC3-S4

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

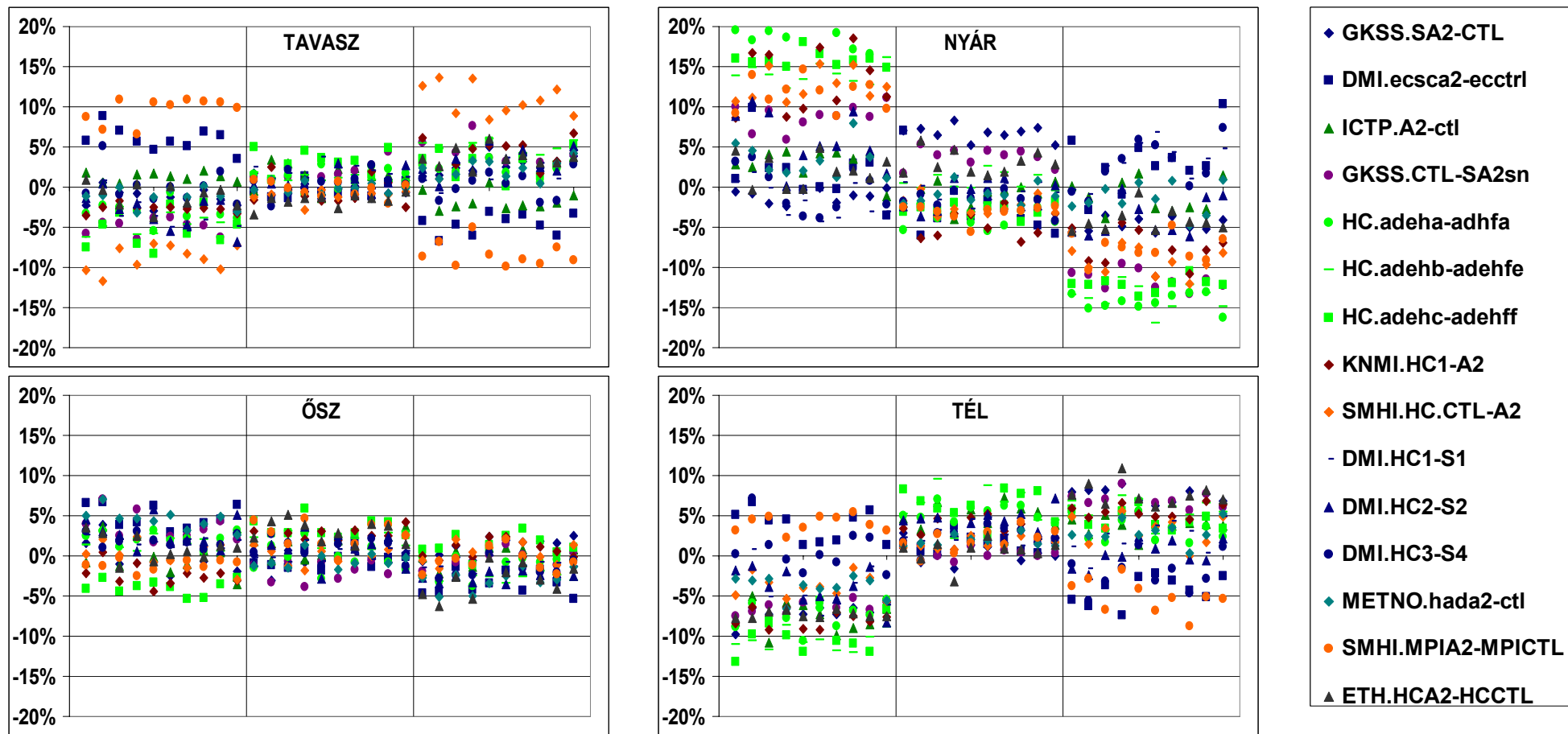


18. ábra: A nettó rövidhullámú sugárzás eloszlásának várható változása 2071-2100-ra a B2 scenárió esetén a kontroll futtatás (1961-1990) tercilisei által meghatározott három harmadban, a kiválasztott 10 rácspontban

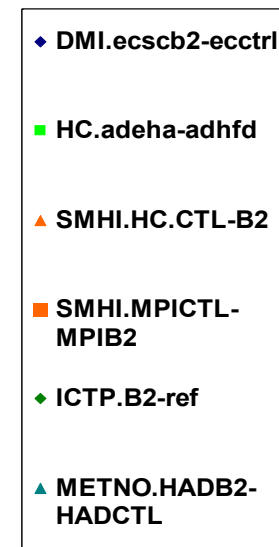
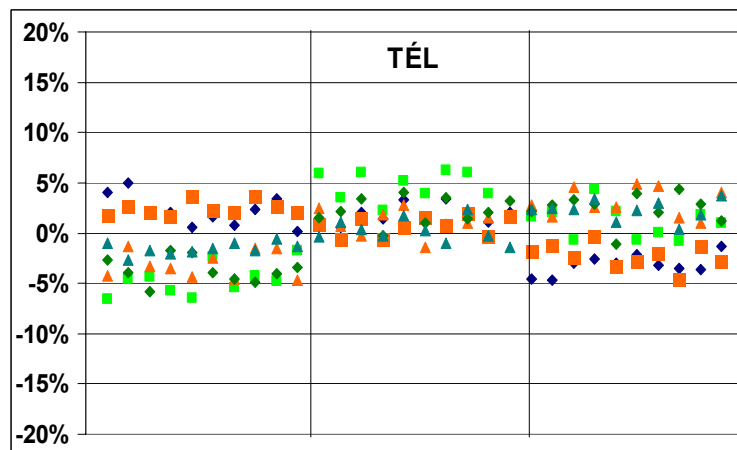
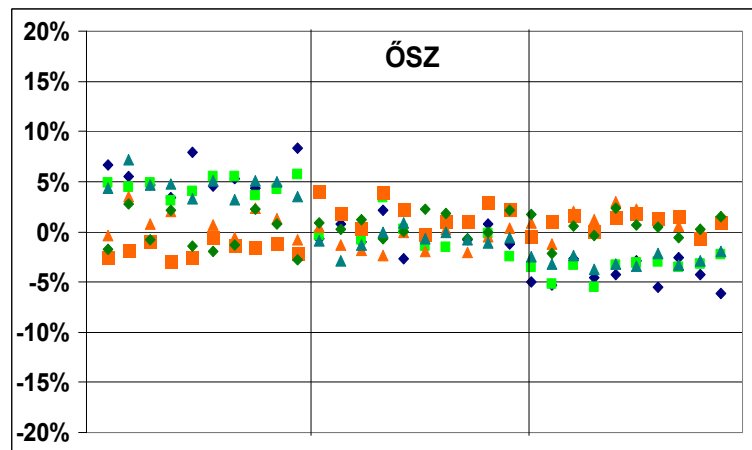
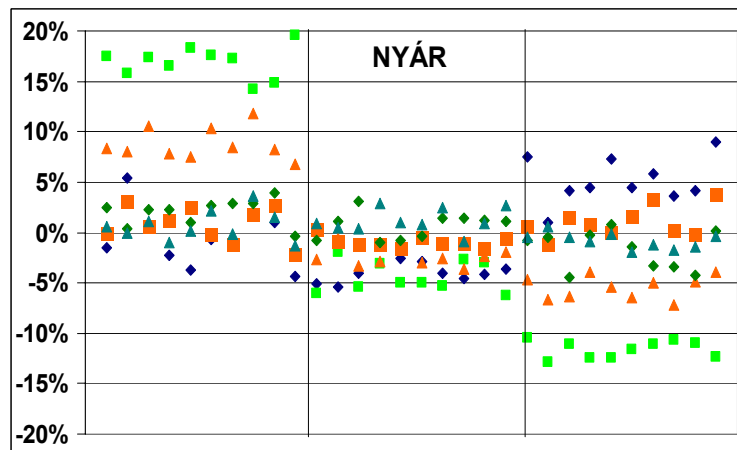
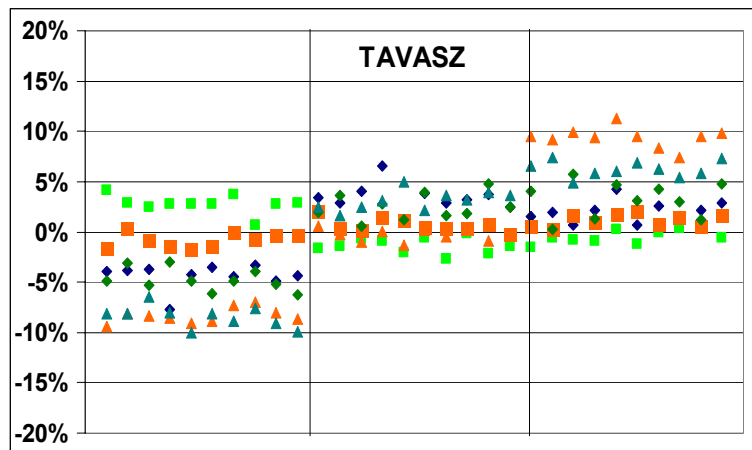
3.5.2. Nettó hosszúhullámú sugárzás

Az A2 scenárió esetén (19. ábra) 2071-2100-ra nyáron és ősszel a nettó hosszúhullámú sugárzás csökkenésére, míg tavasszal és télen a növekedésére számíthatunk a PRUDENCE projekt modellszimulációi alapján. A nyári várható csökkenés akár 15% is lehet, ősszel azonban ez az érték csak 5%-ig emelkedik. A várható növekedés mértéke télen valamelyest jelentősebb, mint tavasszal. Például a Svéd Hidrometeorológiai Intézet futtatása alapján a téli nettó hosszúhullámú sugárzás növekedése akár a 15%-ot is elérheti.

A B2 scenárió esetén (20. ábra) hasonló jellegű változások várhatók, mint az A2 esetén. Nyáron és ősszel a hosszúhullámú sugárzási egyenleg csökkenése, télen és tavasszal pedig a növekedése prognosztizálható. A csökkenés itt is a nyári hónapok esetében a legjelentősebb, az A2 scenárióhoz hasonlóan akár 15%-os is lehet, míg a növekedés a tavaszi hónapokban érheti el a legmagasabb értékeket, ekkor akár 10%-os is lehet.



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

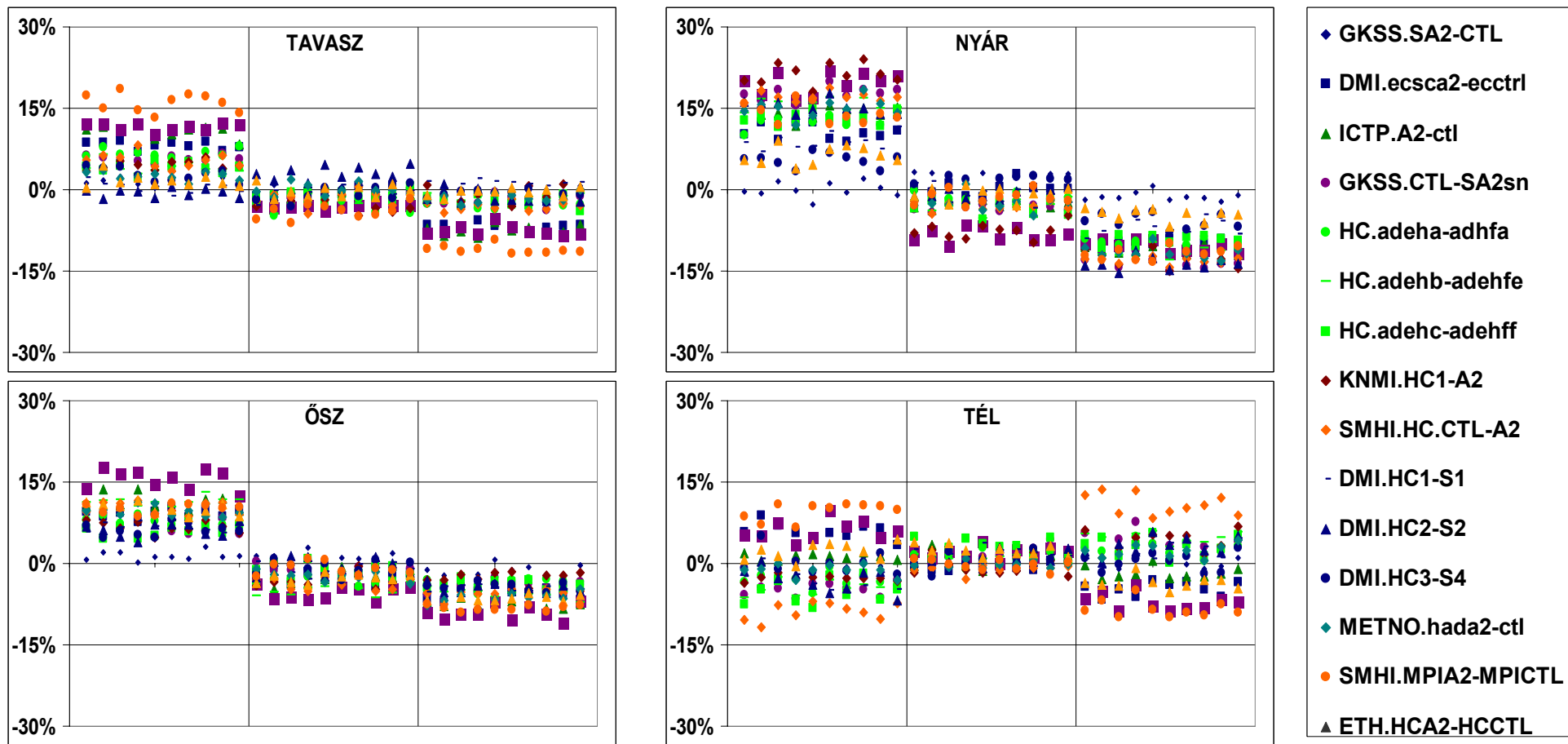


20.ábra: A nettó hosszuhullámú sugárzás eloszlásának várható változása 2071-2100-ra az B2 scenárió esetén a kontroll futtatás (1961-1990) tercilisei által meghatározott három harmadban, a kiválasztott 10 rácspontban

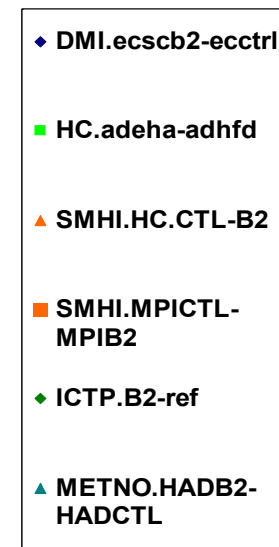
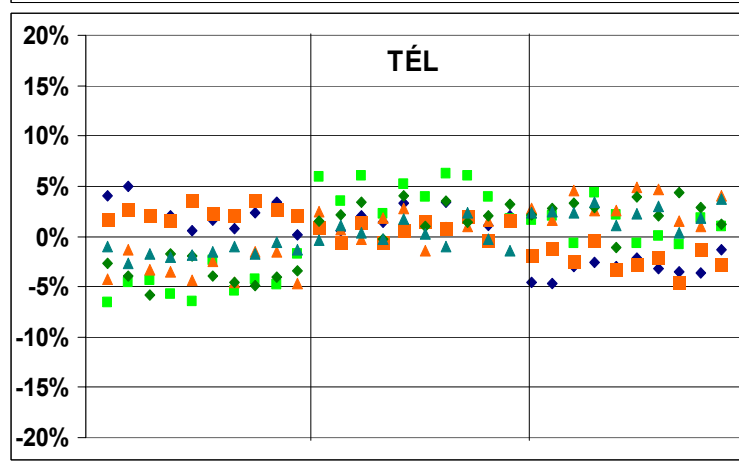
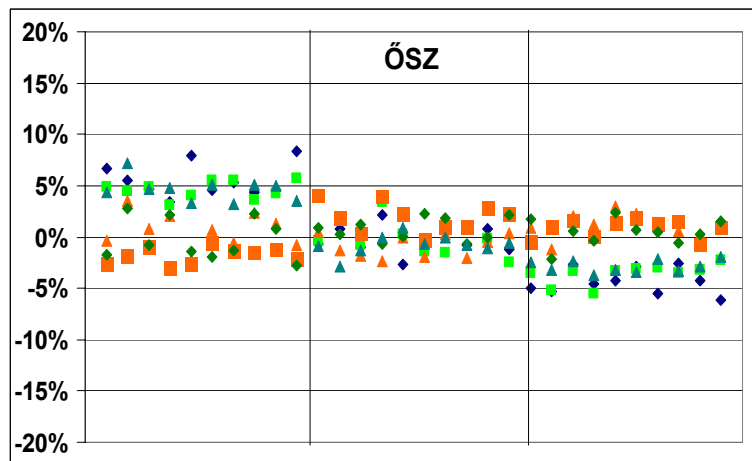
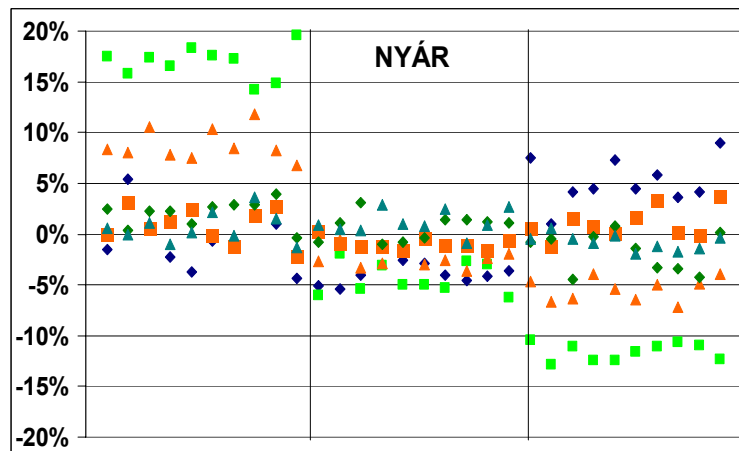
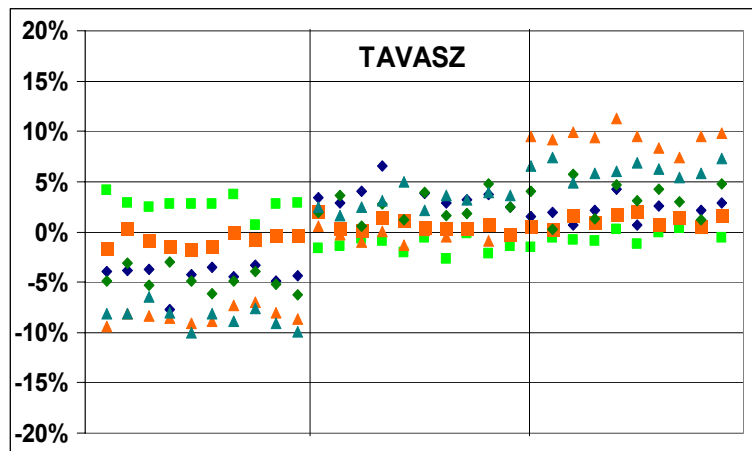
3.5.3. Felhőborítottság

Az A2 scenárió (21. ábra) esetén a PRUDENCE projekt modellszimulációi alapján tavasszal, nyáron, és ősszel várhatóan csökken a felhőborítottság. Ezt jelzi, hogy a felső harmadba eső értékek kisebb gyakorisággal fordulnak elő, mint az első harmadba esők. Tehát a tiszta ég előfordulásának valószínűsége a növekszik. A legjelentősebb csökkenés nyáron várható, ekkor ennek mértéke akár 15% is lehet. A téli hónapokban viszonylag nagy az egyes modellek által becsült változások szórása, s akár ellentétes irányú változást is jelezhetnek.

A B2 scenárió (22. ábra) esetén nyáron és (kisebb mértékben) ősszel a felhőborítottság átlagos csökkenése prognosztizálható, melynek mértéke akár a 13%-ot is elérheti. A tavaszi hónapokban inkább növekedés várható a vizsgált modellszimulációk nagy része szerint. Az A2 scenárióhoz hasonlóan télen a B2 scenárió esetén ellentétes trendeket jeleznek előre a különböző modellek.



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



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

4. Következtetések

Jelen dolgozatban a PRUDENCE projekt keretében futtatott regionális klíma-modellek szimulációs adatsoraiból a sugárzási paraméterek 2071-2100-ra várható változását vizsgáltuk az A2 és a B2 scenárió esetén. Eredményeink alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le.

(1) A havi átlagos rövidhullámú sugárzási egyenleg mindkét scenárió esetén a nyári félévben várhatóan növekedni fog, míg a téli, tavasz eleji hónapokban várhatóan kis mértékben csökkenni. Mind a várható nyári növekedés, mind pedig a várható téli csökkenés összefügg a felhőborítottság várható változásával.

(2) Mind az A2, mind a B2 scenárió esetén nyáron várhatóan jóval derültebb, télen pedig várhatóan kis mértékben borultabb égre lehet számítani 2071-2100-ra.

(3) A hosszuhullámú sugárzási egyenleg várhatóan kis mértékben csökkenni fog a nyári hónapokban, s növekedni a tél végi, tavasz eleji hónapokban. Ennek oka részben szintén a felhőborítottság várható alakulása, hiszen ha télen több a felhő (s ezzel együtt a légkör vízgőztartalma), akkor a felszín hőmérsékleti sugárzásából több nyelődik el a légkörben, mely ezáltal jobban felmelegszik, s több hosszuhullámú sugárzást bocsát ki a felszín felé is. Tehát nő a felszín hosszuhullámú sugárzási egyenlege. Nyáron derültebb meteorológiai viszonyok esetén épp fordítva, a kisebb vízgőztartalom és a légkör felől a felszínre érkező kevesebb hosszuhullámú sugárzás miatt a sugárzási egyenleg várhatóan csökken.

(4) A napenergia felhasználása szempontjából kiemelt fontosságú a rövidhullámú sugárzási egyenleg várható növekedése bár hazánk esetén ez összességében kis mértékű. A modellszimulációk s jelen dolgozat eredményei alapján érdemes megfontolni, hogy ezt a megújuló energiaforrást fokozottabban bevonjuk az egyre növekvő energiaigényt kielégítő energiatermelésbe.

Kapott eredményeink pontosságának vizsgálatához további terveink között szerepel a referencia időszak szimulált idősorainak összehasonlítása az ECMWF (Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ) ERA40 re-analízis adatbázisában található adatokkal. A verifikációt azonban nehezíti, hogy a PRUDENCE szimulációk 0,5 fokos rácsfelbontással állnak rendelkezésre, míg az ERA40 adatbázis csupán 1 fokos rácsfelbontású.

5. Irodalomjegyzék

- Bartholy, J., Pongrácz, R., Torma, Cs., Hunyady, A. (2006): A PRECIS regionális klímamodell és adaptálása az ELTE Meteorológiai Tanszékén. In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok – Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások (szerk: Weidinger T.) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. 99-114 p.
- Bartholy, J., Pongrácz R., Gelybó Gy. (2007a): Regional climate change expected in Hungary for 2071-2100. *Applied Ecology and Environmental Research*, 5, 1-17.
- Bartholy, J., Pongrácz R., Gelybó Gy. (2007b): A 21. század végén várható regionális éghajlatváltozás Magyarországon. *Földrajzi Értesítő*. LVI., 3-4. szám, 147-168.
- 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. 3-17.
- Bartholy, J., Pongrácz R., Gelybó Gy. (2008a): Milyen mértékű éghajlatváltozás várható a Kárpát-medencében? *Légkör*, 53/2., 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, 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.
- 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.
- Czelnai, R. (1980): III. A meteorológia eszközei és módszerei - Egyetemi jegyzet. Nemzeti Tankönyvkiadó. Budapest. 372 p.
- 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, 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.
- Csima, G., Horanyi A. (2008): Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* 112:155-177.

- 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.
- Dobor, L. (2008): A magyarországi szélsőségek várható változása a XXI. század végére a PRUDENCE eredmények alapján. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest (TDK dolgozat). 16p.
- Giorgi, F. (1990): Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climate* 3: 941-963.
- Hajdu M. (2008): A szél-, napenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest (diplomamunka). 88p.
- Hermelink, A. (2006): Proceedings of the European Conference and Cooperation Exchange 2006. Sustainable Energy Systems for Buildings - Challenges and Chances. 15p.
- Horányi, A. (2006): Regionális klímadinamikai kutatások: nemzetközi és hazai áttekintés. In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok – Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások (szerk: Weidinger T.). Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. 62-70.
- 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., Castro, de 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., Ulden, van A., Hurk. Van der B. (2007): An inter-comparison of regional climate models for Europe: Model performance in Present-Day Climate. *Climatic Change*, 10.1007/s10584-006-9213-4.
- Janka, T., Helgert L., szerk (2009a): A panelházak is spórolhatnak a zöld energiával. <http://www.alternativenergia.hu/a-panelhazak-is-sporolhatnak-a-zold-energiaval/3053>; megjelenés: 2009.04.23.
- Janka, T., Helgert L., szerk (2009b): Napkollektor egy budaörsi hipermarket tetején. <http://www.alternativenergia.hu/napkollektor-egy-budaorsi-hipermarket-tetejen/3257>; megjelenés: 2009.04.29.
- Janka, T., Helgert L., szerk (2009c): Napelemekkel működő közvilágítást építenek ki Dombóváron. <http://www.alternativenergia.hu/napelemekkel-mukodo-kozvilagitast-epitenek-ki-dombovaron/2305>; megjelenés: 2009.03.26.
- 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: 829-856.

- 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.
- Szépszó, G., Horányi, A. (2008): Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary. *Időjárás* 112:213-232.
- Torma, Cs., Bartholy, J., Pongrácz, J., Barcza Z., Coppola, E., Giorgi, F. (2008): Adaptation and validation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Időjárás* 112:233-247.

6. Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat támogatta a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, az OTKA T-049824, K-67626, K-69164, K-78125 számú pályázatait, az NKFP-6/079/2005 pályázat, valamint az MTA TKI Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz című, 2006/TKI/246 számú programja. További segítséget nyújtott az EU VI. keretprogram CECILIA projektje (GOCE-037005). Az éghajlatváltozási modell szimulációk adatbázisát az EU EVK2-CT2001-00132 számú szerződésében támogatott PRUDENCE projekt keretében állították elő.

Ezen kívül szeretnék köszönetet mondani Pongrácz Rita és Bartholy Judit tanárnőnek a fáradtságos munkáért, hogy munkámat javították és tökéletesítették, továbbá Gelybó Györgyinek, aki az adatok letöltésében volt nagy segítségemre.