

SZÉLENERGIA BECSLÉSEK REGIONÁLIS ÉGHAJLATI MODELLEK EREDMÉNYEI ALAPJÁN

ASSESSMENT OF FUTURE WIND CONDITIONS OVER HUNGARY USING REGIONAL CLIMATE MODELS

Illy Tamás, Szépszó Gabriella

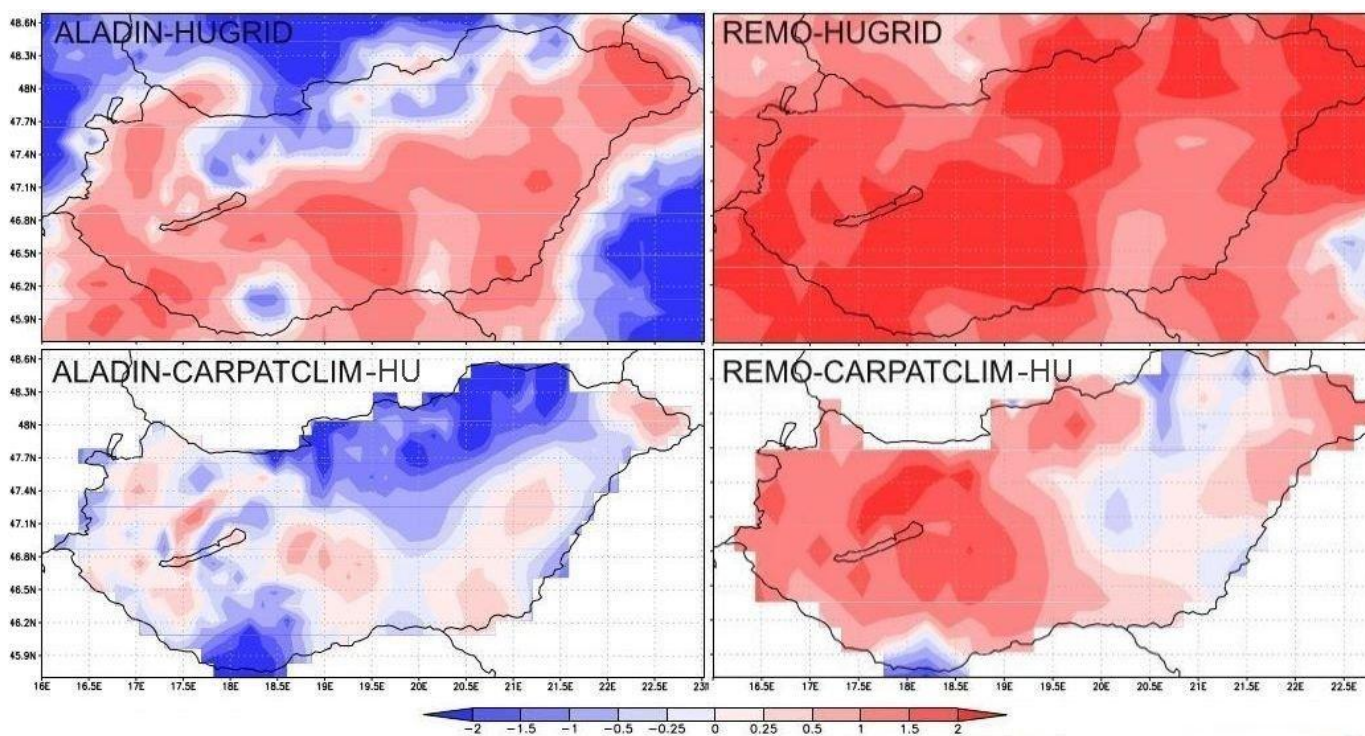
Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., illy.t@met.hu, szepszo.g@met.hu

Összefoglalás. Az éghajlati rendszer viselkedése és jövőbeli fejlődése numerikus modellek segítségével írható le. Az éghajlati modellek eredményeinek megfelelő értelmezéséhez elengedhetetlen a szimulációk bizonytalanságainak számszerűsítése. Ez az ensemble módszer, azaz több globális és regionális klímamodell, valamint kibocsátási forgatókönyv alkalmazásával tehető meg. Jelen tanulmányban a magyarországi szélviszonyok jövőbeli változását vizsgáljuk az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott két regionális klímamodell, az ALADIN-Climate és a REMO eredményei alapján. Az elemzés során a 10- és a 100-méteres szélsébséget, valamint a 100 méterre vonatkozó potenciális széleenergiát és teljesítményt vizsgáltuk. A modellek eredményeit két (a HUGRID és a CARPATCLIM-HU) rácsponti megfigyelési adatbázissal vetettük össze az 1961–1990 referencia-időszakra; a jövőben várható változásokat pedig 2021–2050-re és 2071–2100-ra számszerűsítettük.

Abstract. The climate system and its future behaviour can be described with numerical models. For correct interpretation of climate change estimates, it is indispensable to consider their uncertainties. This can be quantified by the ensemble method when using multiple regional climate models to downscale a number of global climate scenarios. In our study, the future change of wind conditions over Hungary is investigated based on the results of two regional climate models (RCM), ALADIN-Climate and REMO applied at Hungarian Meteorological Service. The evaluation was focussing on wind-related parameters: 10- and 100-meter wind speed, wind energy potential and power at 100 meters. The RCM results were validated for 1961–1990 using two gridded observation datasets (HUGRID and CARPATCLIM-HU) as reference. Future climate change was evaluated for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to 1961–1990.

Bevezetés. Magyarország szélklimatológiai jellemzőinek minél pontosabb ismerete és e jellemzők lehetséges jövőbeli alakulásának vizsgálata kulcsfontosságú a szél energiájának hatékony felhasználásához. A múltira vonatkozóan a különböző mérési adatbázisokból előállított, rácshálózatra interpolált (esetleg homogenizált) adatso-

rok segítségével vizsgálhatjuk és elemezhetjük a Kárpát-medencében uralkodó szélviszonyokat. Magától értetődő módon a jövőre vonatkozóan nem rendelkezünk mérési adatokkal, ráadásul a változó klíma a szélviszonyokra is hatással lehet, ezért mindenképp érdemes foglalkozni a szélklíma jövőbeli állapotát leíró mennyiségek megbecs-



1. ábra: A modellszimulációk 100 m-es szélsébségének átlagos évi eltérése a két mérési adatbázistól, ms^{-1}

lésével. A becslések alapját a regionális éghajlati modellek szimulációs eredményei képezik, melyek ma már igen finom (akár 10 km-es) térbeli felbontással állnak rendelkezésünkre, ezzel részletes információt szolgáltatva egy-egy régió klímájának várható alakulásáról. Ahhoz azonban, hogy a klímamodellek becsléseit érdemben ki tudjuk értékelni, fontos, hogy tisztában legyünk azok bizonytalanságaival és validációval győződjünk meg pontosságukról. A cikk célja, hogy két Magyarországon alkalmazott regionális klímamodell, illetve két, méréseken alapuló adatbázis felhasználásával képet alkossunk a modellek minőségéről hazánk szélenergetikai szempontból releváns paramétereinek vizsgálatáról illetve ezek lehetséges jövőbeli alakulásáról a XXI. század végéig.

1. táblázat: A vizsgált modellszimulációk főbb jellemzői (Horányi et al., 2010)

| | ALADIN-Climate 4.5 | REMO 5.0 |
|--------------------------------|--------------------|---------------|
| Időszak | 1961–2100 | 1951–2100 |
| Horizontális térbeli felbontás | 10 km | 25 km |
| Vertikális szintek száma | 31 | 20 |
| Határfeltételek | ARPEGE-Climate | ECHAM5/MPI-OM |
| Projekciós forgatókönyv | A1B | A1B |

2. táblázat: A 100 m-es szélesség és a potenciális teljesítmény eltérései a mérési adatbázisoktól

| Modell/Referencia | Szélesség | Potenciális teljesítmény |
|----------------------|------------------------------|--------------------------|
| ALADIN/HUGRID | 0,7 ms ⁻¹ (16%) | 68 kW (48%) |
| ALADIN/CARPATCLIM-HU | -0,6 ms ⁻¹ (-11%) | -59 kW (-27%) |
| REMO/HUGRID | 1,9 ms ⁻¹ (42%) | 219 kW (155%) |
| REMO/CARPATCLIM-HU | 0,7 ms ⁻¹ (13%) | 105 kW (49%) |

3. táblázat: A 100 m-es szélesség és a potenciális teljesítmény átlagos évi megváltozásai

| Modell | Időszak | Szélesség | Potenciális teljesítmény |
|--------|-----------|-------------------------------|--------------------------|
| ALADIN | 2021–2050 | 0,03 ms ⁻¹ (0,6%) | 4 kW (2,6%) |
| ALADIN | 2071–2100 | 0,05 ms ⁻¹ (1%) | 5 kW (3,3%) |
| REMO | 2021–2050 | 0,06 ms ⁻¹ (1%) | 9 kW (3%) |
| REMO | 2071–2100 | -0,1 ms ⁻¹ (-1,7%) | -17 kW (-5,4%) |

Módszertan. A vizsgálatok elvégzéséhez két regionális éghajlati modell, az ALADIN-Climate (4.5 verzió, Csima és Horányi 2008) és a REMO (5.0 verzió, Szépszó és Horányi, 2008) szimulációs eredményeit, továbbá a HUGRID és a CARPATCLIM-HU mérési adatbázisokat használtuk fel. A HUGRID adatbázist óránkénti magyarországi szélesség-mérések térbeli interpolációjával állították elő, a meteorológiai célra kifejlesztett MISH (Szentimrey és Bihari, 2005) interpolációs szoftvert alkalmazva. A CARPATCLIM-HU adatbázis (Lakatos et al., 2013) napi 3 homogenizált szélesség-mérés felhasználásával készült, s az interpoláció során nemcsak a magyarországi, hanem a szomszédos országok adatait is felhasználták. Mindkét modellnél azon kísérletek eredményeit tekintettük, amelyekhez az oldalsó határfeltételeket globális klímamodellek szolgáltatották. A szimulációk legfontosabb jellemzőit az 1. táblázatban foglaltuk össze. A vizsgált szélklimatológiai paraméterek a felszíni (10 m-es) szélesség, a 100 m-es szélesség, a 100 m-es energiasűrűség és a 100 m-es potenciális teljesítmény voltak. A 10 m-es szélesség értékeit közvetlenül a modellfuttatások eredményei, illetve a mérési adatbázisokból származó eredmények adták, a 100 m-es szélességet, energiasűrűséget és potenciális teljesítményt pedig a felszíni szélességből származtattuk. Ennek során először a 10 m-es szélességből a logaritmikus és a hatványkitevős szélprofilok ötvözetéből alkotott szélprofil (Szentimrey et al., 2006) segítségével előállítottuk a 100 m-es szint szélességét, majd ezen adatok segítségével kiszámítottuk a 100 m-es energiasűrűséget. A potenciális teljesítményt a hazánkban jelenleg legelterjedtebb Gamesa G90 típusú szél-turbina teljesítménygörbéje (mely megadja a turbina által leadott teljesítményt a rotor magasságában fújó szélesség függvényében) alapján számoltuk ki a 100 m-es szélességből. A magassági információk származtatását részletesen Illy (2014) diplomamunkája írja le.

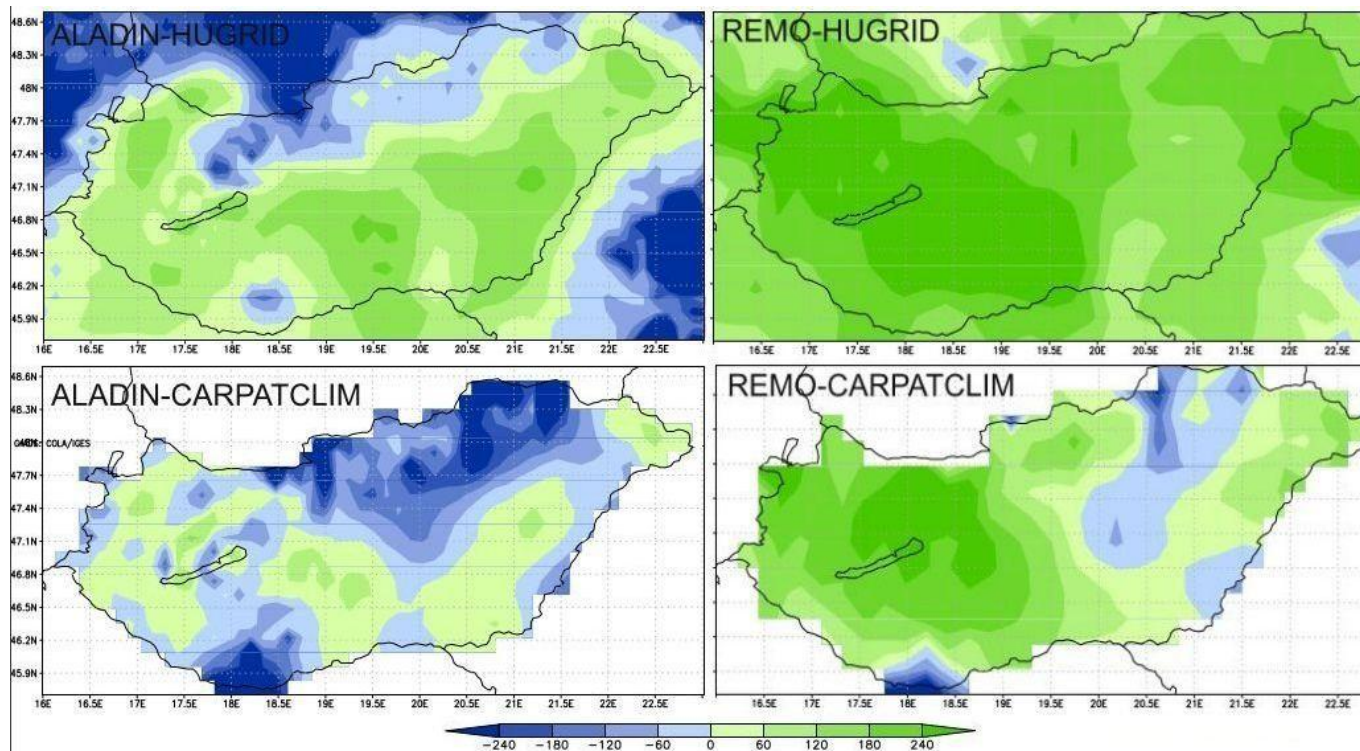
Az előbbieken említett szélparamétereket három éghajlati normálidőszakra vonatkozóan vizsgáltuk. Az 1961–1990-es időszakot tekintettük referencia-időszaknak a modellszimulációk validációja során, így erre vonatkozóan a két mérési (HUGRID, CARPATCLIM-HU) adatsor és a két regionális modellszimuláció (ALADIN, REMO) adataiból egyaránt előállítottuk az összes vizsgált paraméter havi, évszakos és évi átlagait. Ezek után megvizsgáltuk, hogy a modellszimulációk eredményeiből számolt átlagértékek mekkora eltérést mutatnak a mérési adatbázisokból számoltakkal. A két jövőbeli, 2021–2050-es és 2071–2100-as időszakra vonatkozóan is ugyanezen átlagokat állítottuk elő, de csak a modellszimulációk eredményei alapján, és megvizsgáltuk, hogy az ALADIN és a REMO modellek jövőre vonatkozó projekciói mekkora és milyen irányú eltéréseket adtak a saját 1961–1990-es időszakra vonatkozó átlagértékeikhez képest.

Validációs eredmények. A modelleredmények validációja során tehát megvizsgáltuk, hogy a két alkalmazott regionális modell szimulációi milyen pontossággal képesek visszaadni 1961–1990-es időszak mérések alapján leírt éghajlati jellemzőit. Meg kell jegyeznünk, hogy a két

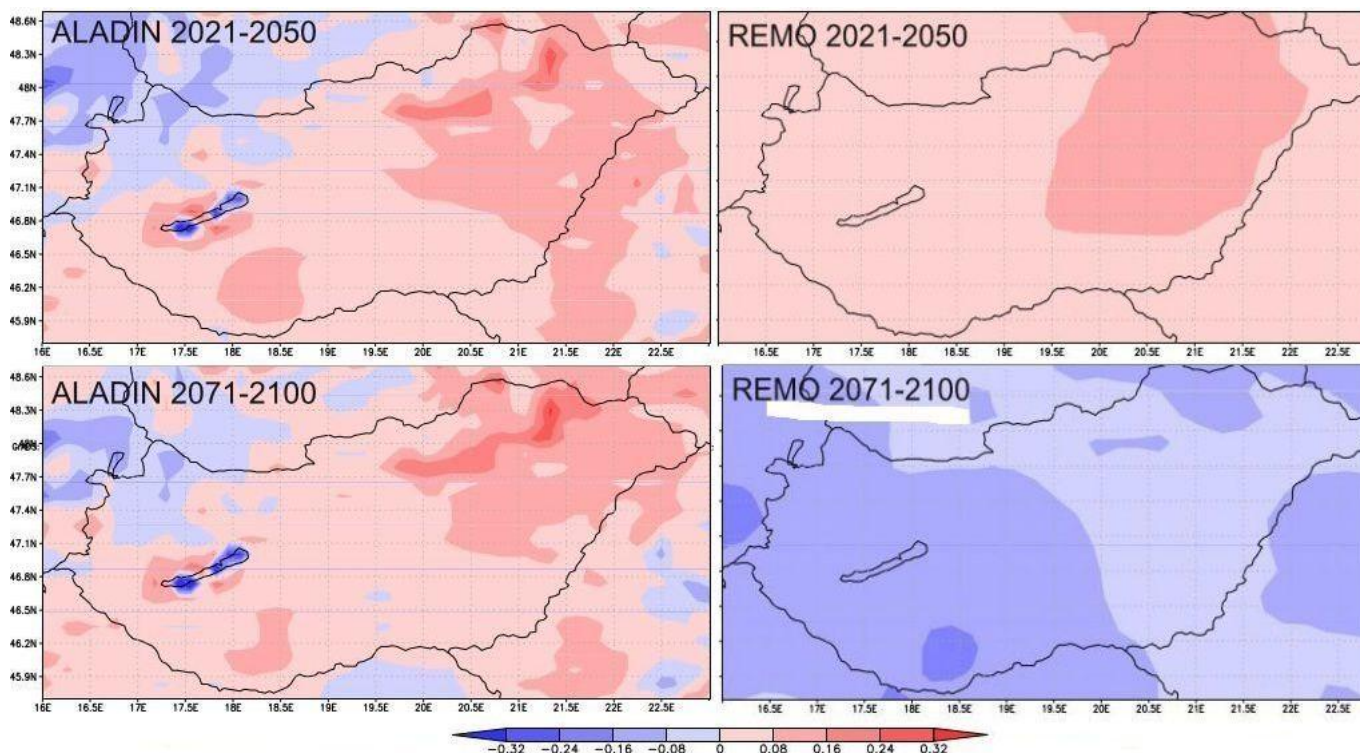
megfigyelési adatbázist eltérő módszerrel állították elő (például a CARPATCLIM-HU adatai homogenizáltak, a HUGRID adatai viszont nyers adatsorok alapján készültek) így a referencia-adatbázisok különbségei megjelentek a validációs eredményekben is. A két meghatározó elem, a 100 m-es szélsősebesség és a 100 m-es potenciális teljesítmény éves validációs ábráin ez jól látható (1. és 2. ábra). A modellek eredményei és a mérési adatok közti eltérések Magyarország területére vonatkozó átlagolásával megad-

tuk a két elem átlagos éves eltéréseit számszerűen és relatív formában is (2. táblázat).

Az ALADIN szimuláció a HUGRID adatbázishoz képest jellemzően felülbecsülte a felszíni szélsősebességet az ország területén éves és évszakos szinten egyaránt, mintegy $0,4 \text{ ms}^{-1}$ -mal (17%-kal; Illy, 2014). Kivételt képeztek ez alól a magasabban fekvő területek, pl. a Dunántúli-középhegység, az Északi-középhegység és a Mecsek,



2. ábra: A modellszimulációk 100 m-es potenciális teljesítményének átlagos évi eltérése a két mérési adatbázistól, kW



3. ábra: A modellszimulációk 100 m-es szélsősebességének átlagos éves megváltozása a két projekciós időszakban az 1961–1990-es időszakhoz képest, ms^{-1}

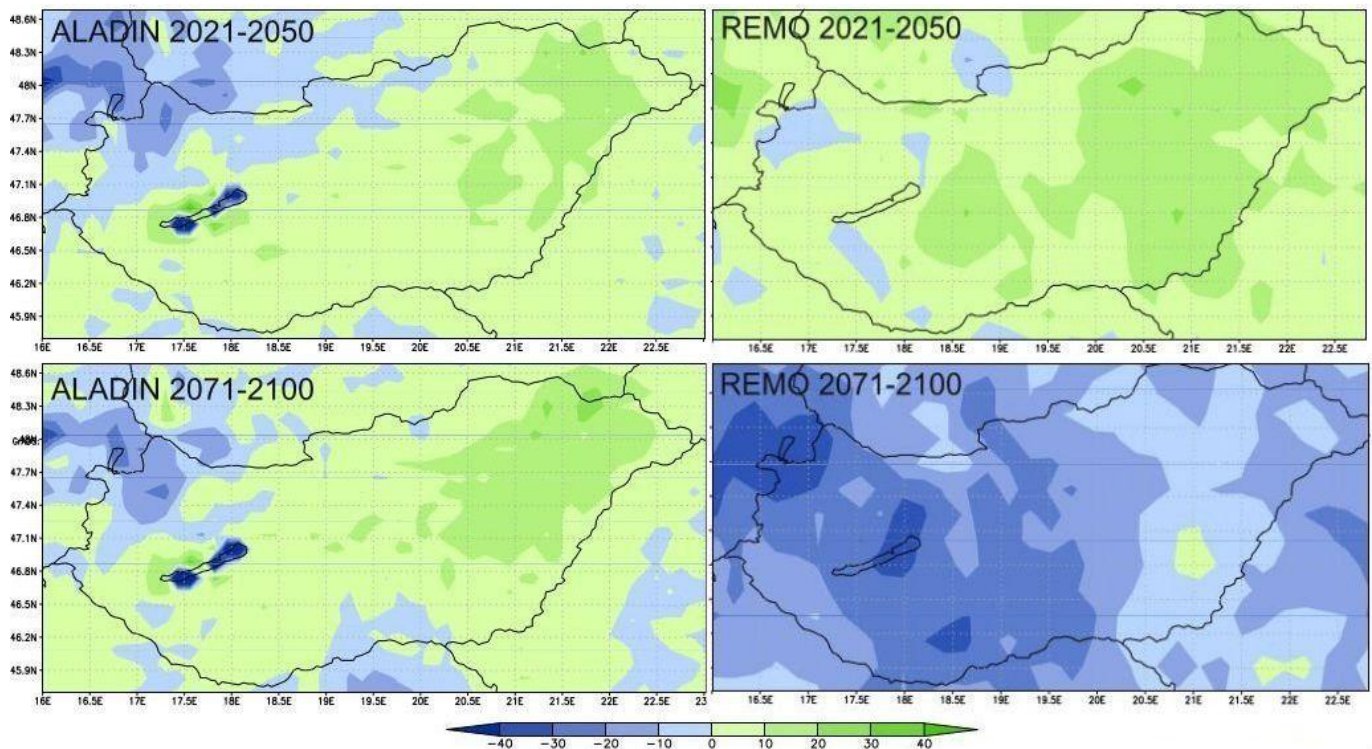
ahol a modellszimuláció kisebb szélsőérték értéket adott a HUGRID mérési adatbázisnál. A felülbecslés területi maximumai a Duna-Tisza-köze és a Tiszántúl középső illetve déli területeire estek. Ez a felülbecslés megjelent az összes többi vizsgált elem validációjánál is, hiszen a magassági szélsőérték, az energiasűrűség és a potenciális teljesítmény előállításánál is a felszíni szélsőértéket használtuk fel a számítások elvégzéséhez. Az eltérések relatív mértéke 100 m-es szinten általában nagyobb, mint a 10 m-es szinten, az átlagos eltérések az energiasűrűség és a potenciális teljesítmény validációjánál esetenként lokálisan igen magas értékeket (100%-nál magasabb relatív eltéréseket) adtak. A 100 m-es szélsőérték esetében a mérésektől vett átlagos éves eltérés Magyarországra $0,7 \text{ ms}^{-1}$ (16%) körüli, a potenciális teljesítmény esetében pedig 68 kW (48%) körüli értéket adott.

Az ALADIN szimulációját a CARPATCLIM-HU adataival összehasonlítva jobb egyezést kaptunk, mint a HUGRID-del, ám ebben az esetben többnyire a modell alulbecslését tapasztaltuk. Az átlagos eltérések ennek megfelelően alacsonyabbak lettek, a 100 m-es szélsőérték esetében $-0,6 \text{ ms}^{-1}$ (-11%), a potenciális teljesítmény esetében pedig -59 kW (-27%). A legerősebb alulbecslést a nyári évszakra kaptuk. A legnagyobb negatív eltérések itt is a hegyvidéki területekre estek, de ezek az alulbecslések jóval erőteljesebbek, mint amiket a HUGRID validáció során kaptunk. A téli évszak az egyetlen, amikor a CARPATCLIM-HU validációs eredményei szerint a modell a méréseknél nagyobb szélsőértéket szimulált. A felülbecslés maximumai a Balaton térségére és az ország keleti régiójára estek.

A REMO modellszimuláció esetében általánosságban jóval nagyobbak voltak a mérési adatbázisoktól való eltérések, mint az ALADIN-nál, de durvább térbeli felbontásánál fogva sem a magasabban fekvő területek, sem a Balaton nem tűntek ki a különbségmezőkben. A HUGRID mérési adatokkal összehasonlítva a REMO szimuláció mind a négy évszakra túlbecsülte az összes vizsgált paramétert (Illy, 2014). A felülbecslés a nyári évszakban lett a leghatározottabb, télen és tavasszal pedig valamelyest gyengébb. Az eltérés maximumai leginkább az ország középső illetve nyugati részére estek. Éves szinten az átlagos eltérés a 100 m-es szélsőértékre vonatkozóan $1,9 \text{ ms}^{-1}$ -os (42%) a potenciális teljesítményre vonatkozóan 219 kW-os (155%) értéket adott, vagyis a REMO modelleredményekből számolt éves potenciális teljesítménye több mint kétszeresen meghaladta a HUGRID adataiból számoltakat.

A REMO szimulációja a CARPATCLIM-HU mérési adatai szerint is túlbecsülte a paramétereket, de az eltérések összességében kisebbek, mint a HUGRID adataival végzett validációnál, a 100 m-es szélsőérték esetében éves átlagban $0,7 \text{ ms}^{-1}$ -ot (13%), a potenciális teljesítmény esetében 105 kW-ot (49%) adva. A felülbecslés maximuma a nyári évszakra, területi eloszlását tekintve pedig a nyugati országrészre esett (1. és 2. ábra).

Projekciós eredmények. A 2021–2050-es projekciós időszakokra éves átlagban a két modellszimuláció hasonló eredményt adott (3. és 4. ábra). Évesen az ALADIN és a REMO is mind a felszíni, mind a 100 m-es szélsőérték csekély növekedését szimulálta, ám a növekedés évi átlagos értéke igen kicsi, $0,1 \text{ ms}^{-1}$ alatti érték, így a változás szignifikanciája kérdéses. Az energiasűrűség és a potenci-



4. ábra: A modellszimulációk 100 m-es potenciális teljesítményének átlagos évi megváltozása a két projekciós időszakban az 1961–1990-es időszakhoz képest, kW

ális teljesítmény a szélsébség harmadik hatványával arányos, ezért a megváltozásuk is valamivel nagyobb, 3% körüli értéknek adódott. A növekedés maximuma mindkét modellszimulációban Magyarország keleti részére esik, és az ALADIN esetében ismét megjelent egy erős lokális minimum a Balaton közelében (azaz a környezetétől eltérően a tó felett a szélsébség csökkenését valószínűsíti a projekció; ezt célszerű lenne finomfelbontású felszíni modellek alkalmazásával is megvizsgálni).

A különböző paraméterek megváltozását évszakos szinten vizsgálva a két modell már kevésbé mutat egységes képet. Az ALADIN a vizsgált változók téli csökkenését és nyári növekedését szimulálta, míg a REMO ennek pontosan az ellenkezőjét, vagyis téli növekedést és nyári csökkenést. Az ALADIN esetében a meghatározó inkább a nyári növekedés, a REMO esetében pedig inkább a nyári csökkenés volt. Az őszi és a tavaszi évszakra vonatkozó változások hasonlítanak a két modell projekciójában.

A 2071–2100-as időszakra vonatkozóan a két modellszimuláció alapvetően eltérő tendenciákat mutatott már az évi átlagokat tekintve is (3. és 4. ábra). Az ALADIN projekciójában a vizsgált szélparaméterek éves szinten jelentősen nem változnak meg a 2021–2050-es állapothoz képest, a REMO ellenben azok csökkenését jelzi. Utóbbi változást egyrészt már a 2021–2050-es időszakra is jelzett nyári csökkenés erősödése, másrészt a 2071–2100-as időszakban megjelenő őszi csökkenés okozza, amik együttesen elnyomják a többi évszakban várható enyhe növekvő tendenciát. A változások évi átlagos értékei ennek ellenére ebben az időszakban sem sokkal magasabbak, a legnagyobb évi megváltozást a potenciális teljesítmény esetében kaptuk, ami az ALADIN projekciója szerint 3%, a REMO projekciója szerint -5% körüli érték (a 100 m-es szélsébség és a potenciális teljesítmény átlagos éves megváltozásait a 3. táblázatban foglaltuk össze).

Összefoglalás. Bemutattuk az elvégzett szélenergetikai vizsgálatok eredményét két meghatározó szélparaméter elemzésén keresztül. A modellszimulációk validálása során egyrészt láthattuk, hogy milyen nagyságrendűek az

eltérések az egyes modelleredmények és a különböző mérési adatbázisok között, másrészt meggyőződhetünk róla, hogy a más-más módon előállított mérési adatbázisok is észlelhetően eltérnek egymástól. A két regionális modell projekciós eredményei szerint a XXI. században a vizsgált szélparaméterek jelentős változása nem várható, a vizsgálataink során kapott legnagyobb relatív megváltozások is 6% alattiak voltak. A jövőben várható változások alaposabb feltérképezéséhez érdemes lenne több modellt bevonni a vizsgálatokba, valamint a magassági paraméterek kiszámításához a statisztikai szélprofil-illesztés helyett a modellek dinamikai úton számolt magassági szélsébség értékeit alkalmazni.

Köszönetnyilvánítás

A jelen cikkben bemutatott vizsgálatok elvégzése a 4.2.2/A számú TÁMOP pályázat támogatásával valósultak meg.

Irodalom

- Csima, G. and Horányi, A., 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* 112, 155–177.
- Horányi, A., Bartholy, J., Krüzselyi, I., Pieczka, I., Pongrácz, R., Szabó, P., Szépszó, G. és Torma, Cs., 2010: A hazai regionális klímamodellek eredményeinek együttes kiértékelése. 36. *Meteorológiai Tudományos Napok. Beszámolókötet* 113–129.
- Illy, T., 2014: Szélenergia becslések regionális éghajlati modellek alapján. *Diplomamunka*, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, pp 77.
- Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z. and Szalai, S., 2013: Creation of a homogenized climate database for the Carpathian region by applying the MASH procedure and the preliminary analysis of the data. *Időjárás* 117, 143–158.
- Szentimrey, T., Bihari, Z. és Birszki, B., 2006: Széltérkép fejlesztés állomások adataiból, statisztikai klimatológiai eljárással. Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei. *Beszámolókötet* 71–81.
- Szentimrey, T. and Bihari, Z., 2005: Manual of homogenization software MISHv1.01. *Hungarian Meteorological Service*.
- Szépszó, G. and Horányi, A., 2008: Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary. *Időjárás* 112, 203–231.

KISLEXIKON

POCKET ENCYCLOPAEDIA

Dunkel Zoltán

Magyar Meteorológiai Társaság, H-1525 Budapest, Pf. 38, dunkel.z@met.hu

ÁDOB <gör.> *Állástalan Diplomások Országos Bizottsága* a harmincas években, hazánkban működött szervezet, amelynek célja az egyetemekről és főiskolákról kikerültek részére megfelelő alkalmazás biztosítása volt. (Dunkel Zoltán: *Történelmi arcképek*–Béll Béla)

meteorográf <gör.> meteorológiai elemek egyidejű automatikus regisztrálására szolgáló mechanikus szerkezetű, több időjárási elem változását követő íróműszer, öniró műszer.. Az eszközben egy óraszerkezet íróhengert forgat körbe, amelyre a meteorológiai elemek (általános gyakorlat szerint légnyomás, hőmérséklet, légnedvesség) értékeit mérő műszerek változásait, az érzékelők jeleit az írókarok segítségével közös lapon rögzíti a szerkezet. Technikailag különböző gráfok kombinációja. A rádiószondák használata előtt a felső légkör rendszeres kutatásának eszköze. A ~ot hidrogénnel töltött ballonra kötötték. A regisztrátumot csak utólag lehetett kiértékelni, a visszaküldés után. Hazánkban 1913 és 1949 között 415 ballonszondát bocsátottak fel, amelyeknek némelyike elérte a 15 km-es magasságot is. (Dunkel Zoltán: *Történelmi arcképek* – Béll Béla)

folytatás a 173. oldalon.