

Tartalomjegyzék

1. Motiváció.....	3
2. Bevezetés	4
2.1. Időjárás és éghajlat.....	4
2.2. Az éghajlat modellezése	5
2.2.1. Az éghajlati modellek típusai	6
2.2.2. Regionális éghajlati modellek.....	8
2.3. Az éghajlati modellszimulációk bizonytalanságai	9
3. A szélenergia hasznosítása.....	11
3.1. A szélenergia helyzete Magyarországon.....	11
3.2. A szél erőművek működésének fizikai alapjai.....	14
3.3. Forgásból áram.....	15
4. Módszertan.....	16
4.1. Felhasznált adatok.....	16
4.1.1. Vizsgált regionális éghajlati modellek bemutatása	16
4.1.2. Vizsgált modellszimulációk bemutatása	18
4.1.3. Mérési adatbázisok	19
4.1.4. Egyéb felhasznált adatok.....	20
4.2. Validációs eljárás	22
4.3. Magassági szélesebesség előállítása	22
4.3.1. Szélprofilok.....	22
4.3.2. A dolgozatban használt kombinált szélprofil	24
4.4. Az energiasűrűség kiszámítása.....	25
4.5. A teljesítmény kiszámítása	26
5. Eredmények.....	27
5.1. Validációs eredmények	27
5.1.1. 10 m-es szélesebesség	28
5.1.2. 100 m-es szélesebesség	33
5.1.3. Energiasűrűség	38
5.1.4. Potenciális teljesítmény	43
5.2. Projekciók.....	49

5.2.1. 10 m-es szélesség	50
5.2.2 100 m-es szélesség	55
5.2.3. Energiasűrűség	60
5.2.4. Potenciális teljesítmény	65
6. Összefoglalás	71
Irodalomjegyzék	74
Köszönetnyilvánítás	77

1. Motiváció

A dolgozatban a globális klímaváltozás magyarországi vonatkozásait vizsgáljuk két különböző regionális éghajlati modell eredményeinek kiértékelésével. A vizsgálataink egyik célja, hogy egy általános képet kapjunk arról, hogy az éghajlatváltozás várhatóan milyen hatást gyakorol hazánk uralkodó szélviszonyaira a XXI. század végéig. A dolgozat másik fő célkitűzése, hogy specifikus szélenergetikai szempontok figyelembevételével megpróbáljunk becslést adni egyes konkrét szélérőmű-típusok által kinyerhető szélteljesítmény jövőbeli változására. A vizsgálatokat egy TÁMOP pályázat keretében végezzük, ezért az eredményeket nem csak az egész országra, hanem egy szűkebb térségre vonatkozóan is kiértékeljük.

A TÁMOP 4.2.2/A egy komplex területfejlesztési program, melynek célja Eger, illetve a várost övező régió energetikai önállóságának elősegítése. A program számos kutatási projektet foglal magába, melyek a megújuló erőforrások potenciális hasznosíthatóságát mérik fel, az éghajlatváltozás lehetséges hosszabb távú hatásainak figyelembevételével. A nagyszabású kutatást tizenöt különböző munkacsoport végzi, melyek a térségben elérhető valamennyi megújuló energiaforrás felhasználásának lehetőségét feltárják, majd gazdasági szempontok szerint is elemzik azokat. Vizsgálják a felszíni vízenergia-potenciált, a geotermikus potenciált, a biomasszából és hulladékból nyerhető energiát valamint a nap- és szélenergiát. A projektben az Országos Meteorológiai Szolgálat is részt vesz, a nap- és szélenergiával kapcsolatos kutatások révén. Jelen dolgozatban tehát Magyarország, és a pályázat céljainak megfelelően egy szűkebb, Eger környéki régió általános szélklimatológiájának és a szélenergiával kapcsolatos éghajlati jellemzőinek változását vizsgáljuk a XXI. században.

A dolgozat bevezetésében röviden bemutatjuk az éghajlati rendszert és annak modellezési hátterét. Ismertetjük a klímamodellek fajtáit, külön hangsúlyt fektetve a regionális modellekre és a modellek bizonytalanságaira. A következő fejezetben vázoljuk a magyarországi szélenergia-hasznosítás történetét és jelenlegi helyzetét illetve kitérünk az áramló levegővel és a szélturbinákkal kapcsolatos alapvető fizikai törvényekre. Ezután a módszertan ismertetése következik, amely során bemutatjuk a dolgozatban elvégzett vizsgálataink során alkalmazott konkrét módszereket. A módszertan ismertetése után rátérünk az eredmények bemutatására. Először a modellek validációs eredményeit, majd

végül a különböző projekciók eredményeit prezentáljuk. A dolgozatot összefoglalással zárjuk.

2. Bevezetés

2.1. Időjárás és éghajlat

Ahhoz, hogy az éghajlattal, annak múltbéli vagy jövőbeli lehetséges változásaival illetve az éghajlat modellezésével foglalkozzunk, elengedhetetlen bizonyos alapfogalmakat tisztáznunk. Az időjárás a légkörnek egy pillanatnyi állapota, illetve ennek az állapotnak az időbeli megváltozása egy rövid (néhány órás, napos vagy hetes) időtávon. Az éghajlat ezzel szemben nem csak a légkör, hanem a vele érintkező geoszférák, a hidroszféra, a bioszféra, a krioszféra és a kontinentális felszín együttes rendszerének egy hosszú távon (néhány hónapos, éves, évtizedes vagy még hosszabb távon) jellemző állapotát jelenti. Az időjárás és az éghajlat nem csupán a folyamataik időskáláiban különböznek. Az időjárás jellemzése, a légkör pillanatnyi állapotának, tehát az állapothatározók pillanatnyi értékének és ezen értékek rövid idejű megváltozásának megadásával történik. Az éghajlatot ezzel szemben statisztikai paraméterekkel jellemezzük, az állapotjelzők bizonyos időintervallumra számolt eloszlásaival, átlagértékeivel, szórásaival, vagy éppen az átlagtól való eltéréseivel, azaz anomáliáival. A klímaállapot teljes leírásához hozzátartozik a változó koncentrációjú légköri gázok koncentrációjának megadása is, mely az időjárás jellemzésének nem képezi részét, mivel ezen nyomgázok csupán hosszabb távon érzékeltetik hatásukat. A térbeli skálákat illetően az időjárás nem különül el az éghajlattól, mindkettőt vizsgálhatjuk globális (egész Földre vonatkozó), regionális (pl.: egy adott földrészre vonatkozó) vagy lokális (pl.: egy országra vonatkozó) skálán (Götz, 2004).

Ahogy említettük, az éghajlati rendszert a légkör és a vele kapcsolatban álló négy másik geoszféra alkotja. Az éghajlati rendszer komponensei, mind fizikai, mind kémiai tulajdonságaikban nagyban különböznek egymástól, de a közöttük zajló tömeg-, impulzus- és energiaáramlás mégis szoros kapcsolatot teremt köztük. Az éghajlatot ennek az összetett rendszernek hosszabb távon, azaz éves, vagy méginkább évtizedes időskálán vett átlagos állapotaként definiáltuk. Mi alakítja ki ezt az állapotot? Az éghajlati rendszer elsődleges energiaforrása a Nap sugárzása. Ennek értelmében éghajlatalakító tényezőnek tekinthetünk minden olyan hatást, amely a légkör felső határához érkező napsugárzás intenzitását, a sugárzás légkörön belüli terjedését, vagy a felszínre érkező sugárzás elnyelődését, ezzel

pedig a felszín energiabevételét befolyásolja. A Föld alakjának és az egyes felszíntípusok eltérő sugárzáselnyelő képességének következtében a Föld energiabevétele térben nem egyenletes, tehát nincs termikus egyensúlyban. Ennek hatására a légkörben és az óceánokban egyaránt kiegyenlítő áramlások alakultak ki, amik nagy mennyiségű energiát szállítanak a forró Egyenlítőtől a hideg pólusok irányába. Ez a globális légköri és óceáni cirkulációs rendszer, ami szintén jelentősen hozzájárul egy adott terület klímaállapotának kialakításához (Götz, 2004).

2.2. Az éghajlat modellezése

Az éghajlati modellek olyan matematikai modellek, amelyek az éghajlati rendszer komponenseit és a közöttük zajló bonyolult, többirányú kölcsönhatásokat fizikai törvényeken alapuló matematikai egyenletek segítségével modellezik, és az egyenleteket analitikus megoldás hiányában közelítő (numerikus) módszerekkel oldják meg. Segítségükkel szimulálhatjuk az éghajlati rendszer viselkedését, tanulmányozhatjuk a rendszer elemei közötti kölcsönhatásokat, vagy megvizsgálhatjuk, hogy az éghajlat hogyan reagál egy feltételezett jövőbeli kényszerre. A működésük tehát a geoszférákat kormányzó alapvető törvények, pl.: mozgásegyenletek, kontinuitási egyenlet, termodinamikai egyenlet, stb. numerikus megoldásán alapul, melyek különböző geoszférák esetén különböző fizikai törvényeket jelentenek. A légkör folyamatait a légköri hidro-termodinamikai egyenletrendszer írja le, amelyhez ugyan hasonló megmaradási törvényeket a többi geoszféra folyamataira vonatkozóan is fölírhatunk, de ezek sok tekintetben különböznek a légköri egyenletektől. Az óceáni folyamatok például karakterisztikus idejüket tekintve jóval lassabbak a megfelelő légköri folyamatoknál, illetve az óceáni cirkulációk működésében fontos szerepet játszik a tengervíz sótartalmának térbeli és időbeli változása is, amelynek nincs légköri megfelelője. Vannak további adott geoszférára jellemző folyamatok, melyekre jó példa a bioszféra fotoszintézise, amely a globális szén ciklus egyik meghatározó folyamataként nagy hatást gyakorol az éghajlatra. Az éghajlat modellezésének feladatát tovább nehezíti, hogy nem csak az egyes folyamatokat, hanem az azok közötti lehetséges visszacsatolásokat (a kiváltó folyamatot erősítő, vagy gyengítő hatás) is minél pontosabban ismernünk kell, mert ezek alakítják ki az éghajlati rendszer belső változékonyságát.

A fent tárgyalt folyamatokat reprezentáló egyenletek numerikus megoldásához a modellek a Földet, vagy a vizsgált kisebb területet egy 3 dimenziós rácshálózattal fedik le, és egy megadott kezdeti feltétel alapján minden rácspontra meghatározzák az állapotváltozók jellemző értékeit. Az egyes geoszférákat kormányzó folyamatok egyenleteinek időbeli integrálását időlépésekben, az egyenletekben szereplő térbeli és időbeli differenciál-operátorokat numerikus sémákkal közelítve hajtják végre. A diszkrétizáció egyik következménye, hogy a rácstávolságnál kisebb karakterisztikus méretű folyamatok (pl.: helyi zivatarok) a rácsfelbontás számára „láthatatlanok”, ezért a működésüket csak parametrizációk formájában építhetjük bele a modellekbe.

A modellek megalkotásánál figyelembe kell vennünk az egyenletek megoldásának számításgényét is, mivel még a mai szuperszámítógépeken is jelentős időbe telik egy-egy modellfuttatás elvégzése. Az éghajlati modellek tehát több okból is a valóság csupán egy egyszerűsített változatát írják le, ugyanakkor a folyamatos fejlesztések révén egyre több folyamat leírására képesek. A klímamodellek nem hosszútávú időjárás előrejelző modellek. A feladatuk annak szimulálása, hogy hogyan reagál az éghajlati rendszer egy adott külső kényszerre, például egy megnövekedett antropogén szennyezőanyag-kibocsátásra. Mivel már a feladat kitűzésében szerepel egy feltételes külső tényező, ezért az éghajlati modellek szimulációit nem nevezhetjük előrejelzésnek, ezeket projekcióknak hívjuk. Az eredmény pontossága nem csak a modell megbízhatóságától függ, hanem attól is, milyen pontosan tudjuk megbecsülni a feltételezett jövőbeli kényszert. Mivel az antropogén kibocsátás erősen függ a politikai, gazdasági döntésektől, ezért nem tudhatjuk, hogy pontosan hogyan fog alakulni a jövőben. A modellek számára tehát különböző forgatókönyvek, scenáriók segítségével írják le a lehetséges jövőképeket, melyek közül vannak pesszimistábbak, optimistábbak és átlagosak. Az ilyen módon készített projekciók célja, hogy egy hosszabb periódus (tipikusan 30 év) éghajlati viszonyait minél pontosabban leírják, annak statisztikai jellemzőivel, vagyis az átlagos értékeivel, szórásaival, szélsőértékeivel, stb.

2.2.1. Az éghajlati modellek típusai

Az éghajlat modellezésének kezdete óta a modellek hatalmas fejlődésen mentek keresztül. Az éghajlati modellek különböző komplexitásúak attól függően, hogy a légkörön kívül még az éghajlati rendszer mely komponenseinek folyamatait írják le. Ezen kívül

eltérhetnek például a modell által lefedett terület méretében, a modell rácshálózatának felbontásában vagy az alkalmazott közelítő és parametrizációs módszerekben. Összetettségüket tekintve a legegyszerűbb modellek csupán a légköri folyamatokat írják le, a legfejlettebbek pedig az úgynevezett kapcsolt légkör-óceán általános cirkulációs modellek. Ezek a modellek a tengerjég és a kontinentális felszín viselkedését, valamint a legfontosabb kémiai folyamatokat (például a kén és a szén globális ciklusát) is figyelembe veszik. Ha a modell által lefedett területet szemléljük, megkülönböztetünk egész Földre kiterjedő globális modelleket és egy kisebb területre (például egy adott földrészre) koncentrált regionális modelleket.

A globális modellek felhasználási területe az általános cirkuláció és a nagytérségű folyamatok szimulálása, azok lehetséges jövőbeli változásainak projekciója. Ezek a modellek általában 100 és 400 km közötti rácstávolsággal dolgoznak, így az eredményeiket is csak ezen a skálán értelmezhetjük. A jövőben várható regionális változások pontosabb megismeréséhez a globális modellek eredményeinek finomítása szükséges, ami alapvetően kétféle leskálázási (downscaling) módszerrel történhet.

Az egyik lehetőség az empirikus-statisztikus leskálázás, mely során olyan statisztikus összefüggéseket alkalmazunk a globális modell rácstávolságánál kisebb skálájú folyamatok leírására, amiket a múltban észlelt (tehát mérési) adatsorok alapján határoztak meg. A módszer legfőbb gyengesége, hogy feltételezi, hogy a múltban érvényes statisztikai összefüggések érvényesek lesznek a jövőben egy megváltozott klíma esetén is, továbbá, hogy nem lehetséges vele az éghajlati rendszer ok-okozati összefüggéseinek vizsgálata.

A másik lehetőség a dinamikai leskálázás, melynek során finomabb felbontású modelleket alkalmazunk. Használhatunk egyenletesen finom illetve változó rácsfelbontású globális légköri cirkulációs modelleket (AGCM), utóbbiak felbontása csak a vizsgált területen finomabb és az ettől távol eső részeken durvább. Ezek számára kapcsolt modellek írják le a többi geoszféra viselkedését. Sajnos ezeknek a modelleknek még rövidebb időintervallumokra futtatva is óriási a számítási igényük. A globális modelleken túl alkalmazhatunk regionális éghajlati modelleket (RCM), melyek finom felbontásúak, de csak egy adott területet éghajlatát írják le. A regionális modellek felbontása ma már a 10 kilométert is elérheti (sőt meg is haladhatja), így lehetőséget adnak egy adott régió klímájának részletesebb tanulmányozására és részletgazdagabb projekciók készítésére. Ahhoz azonban, hogy a regionális modellek megfelelően jellemezzék a lokális

folyamatokat, az integrálási tartományon kívül zajló nagyskálájú viszonyok megbízható leírása is szükséges. Ez az oldalsó határfeltételeken keresztül történik, amiket a globális modellek biztosítanak számukra. Minthogy a szakdolgozatban regionális modellfuttatások eredményeit fogjuk vizsgálni, ezért a regionális modellek jellemzőit részletesebben ismertetem (Szépszó, Zsebeházi, 2010).

2.2.2. Regionális éghajlati modellek

A regionális klímamodellek hasonló fizikai törvényeket vesznek figyelembe, mint a globális modellek, de főként a légkörre és a szárazföldi felszínre összpontosítanak, hogy minél finomabb felbontású, minél részletgazdagabb információkat szolgáltatassanak. Mivel a vizsgált terület a regionális modellek esetében jóval kisebb, mint a globális esetben, ezért ugyanazon számítási kapacitással lehetőség van nagyobb térbeli felbontást alkalmazni. A regionális modellek tipikus felbontása 10-50 km, amivel sokkal pontosabban vehetjük figyelembe a domborzat hatását, vagy egyes regionális mezoskálájú folyamatokat, mint például a különböző lokális cirkulációs rendszereket. Ennek ellenére a regionális modellek is tartalmazznak parametrizált folyamatokat, melyek még ennél a finomabb rácsfelbontásnál is kisebb karakterisztikus mérettel rendelkeznek, vagy a közvetlen leírásuk nem lehetséges. Ilyen folyamatok például a konvektív folyamatok, a felszín-légkör kölcsönhatások, vagy a felhők mikrofizikája.

A regionális változások természetesen nem függetlenek a globális folyamatoktól, ezért a korlátos tartomány határain mindenképpen szükség van az oldalsó peremfeltételek megadására, melyeket vagy más éghajlati modellek, vagy reanalízis mezők szolgáltatják. A reanalíziseket a légkörnek egy múltbeli állapotáról a lehető legtöbb mérési információ és rövidtávú előrejelzések kombinálásával, adatasszimilációs technikák használatával állítják elő úgy, hogy a múltra vonatkozóan minél pontosabb és teljesebb képet nyújtsanak teljes háromdimenziós légkörről a modellek számára. Ha a peremfeltételeket reanalízis mezők szolgáltatják, akkor ezekkel természetesen csak múltbeli szimulációk futtathatóak. A jövőbeli projekciókhoz csak a globális vagy a nagyobb területet lefedő regionális klímamodellek eredményei szolgáltatathatnak határfeltételeket. Ahhoz, hogy a regionális modell futtatása során a tartományon kívül zajló nagyskálájú folyamatok megfelelően legyenek leírva, fontos, hogy a globális kényszert biztosító peremfeltételeket elég sűrűn vegyük figyelembe, illetve, hogy a globális és a regionális modell felbontásának különbsége ne haladjon meg egy bizonyos határt (vagy ha igen, akkor be kell iktatni egy

közbülső leskálázási lépést). Szerepet játszik az eredmények pontosságában az integrálási tartomány mérete is: ha a modelltartomány túl nagy, úgy a regionális modelleredmények túlságosan eltérhetnek a nagyskálájú folyamatok által meghatározott viszonyoktól, míg ha túl kicsi, akkor a nagyskálájú kényszerek elnyomják a lokális felszín, vagy a mezoskálájú folyamatok hatásait (Klímaváltozás – 2011)

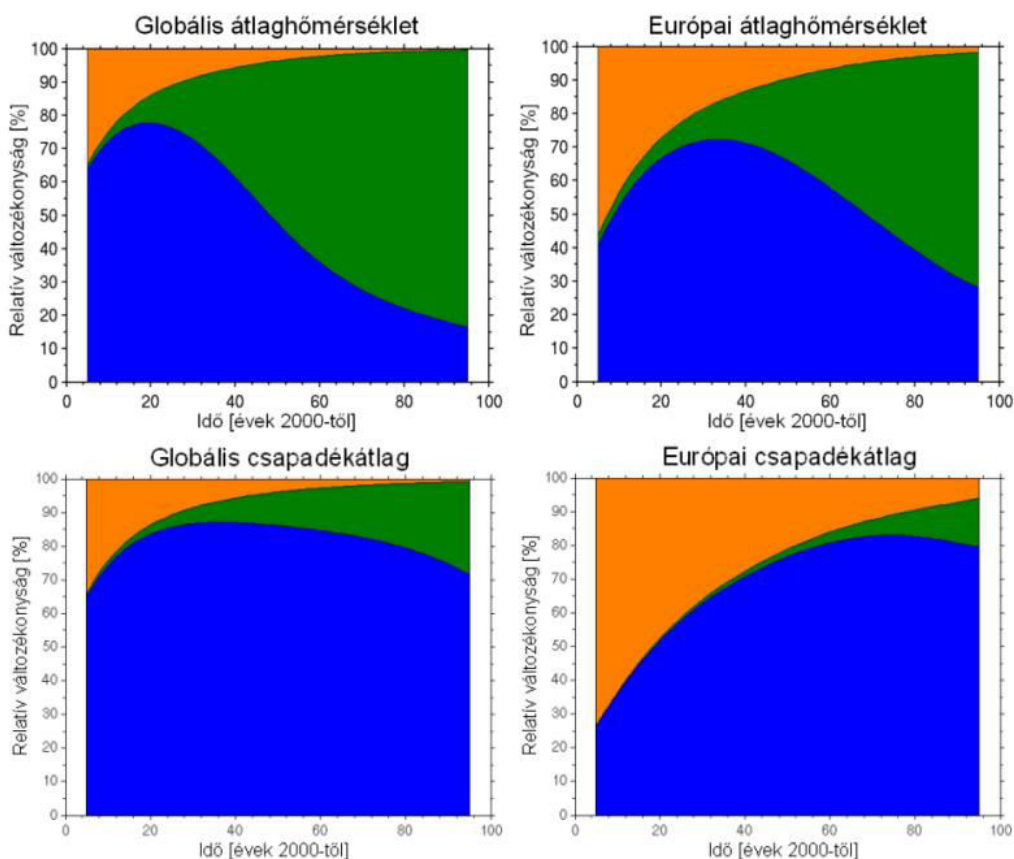
2.3. Az éghajlati modellszimulációk bizonytalanságai

A klímamodellek eredményeinek objektív értelmezéséhez nem csak az eredmények elemzése szükséges, de ismernünk kell azok korlátait és bizonytalanságait is. A bizonytalanságok többféle forrásból erednek: az egyik legnagyobb bizonytalanságot az emberi tevékenység éghajlatra gyakorolt hatása jelenti, mivel ahogyan említettük, a jövőbeli szennyezőanyag kibocsátásokra vonatkozóan csak feltételezésekkel élhetünk. Az emberi tevékenység alakulását leíró forgatókönyveket ekvivalens szén-dioxid koncentráció formájában a modellekbe beépítve képet kaphatunk arról, hogy az antropogén hatás a jövőben milyen mértékben befolyásolja a klímát. A vizsgálatok azt mutatják, hogy az emberi eredetű szennyezőanyag kibocsátás mértéke elsősorban hosszabb távon, a XXI. század végére jelent érdemi különbséget a várható földi éghajlatra vonatkozó projekciókban.

Szintén bizonytalanságot okoznak az egyes modellek közötti eltérések, különösen a parametrizáltan kezelt, közülük is elsősorban a csapadékképződéssel kapcsolatos folyamatok. További pontatlanságok adódhatnak abból, hogy a regionális modell integrálásához szükséges oldalsó peremfeltételeket egy globális modell adja meg, melyek szintén hibával terheltek, illetve a két modell közötti csatolási mechanizmusok is hatással vannak a regionális modell megbízhatóságára. Ezt a hibát úgy számszerűsíthetjük, hogy megvizsgáljuk egy adott regionális modell milyen szimulációs különbségeket produkál, ha különböző globális modellek szolgáltatják az oldalsó peremfeltételeket. A tapasztalatok azt mutatják, (Hawkins, Sutton, 2009) hogy a mindezekből eredő bizonytalanság mindvégig fontos eleme a teljes bizonytalanságnak (1. ábra).

Végül meg kell említenünk egy olyan bizonytalansági tényezőt, mely hosszútávon (több évtizedes időskálán) sem a számítógépes kapacitás, sem a modellek fejlesztésével nem küszöbölhető ki teljes mértékben. Az éghajlati rendszer egyes komponensei közötti kölcsönhatások és az összetett visszacsatolási mechanizmusok eredményeként az éghajlati jellemzők mind rövidebb, mind hosszabb időskálán változékonyságot mutatnak. Az

éghajlati rendszer eme természetes tulajdonságát az éghajlati rendszer szabad belső változékonyságának nevezzük, és ez a folyamat is hozzájárul az éghajlati modellek bizonytalanságához. A másik két nagy bizonytalansági faktorkal összehasonlítva elmondhatjuk, hogy az éghajlat belső változékonyságának szerepe globális szinten csak a század első felében jelentős, a század végére viszont azokhoz képest jelentéktelenné zsugorodik. Regionális szinten a belső változékonyság okozta bizonytalanság jelentősebb, sőt a csapadék esetében a belső változékonyság a felelős a bizonytalanság döntő hányadáért (*Bartholy et al., 2011*). Az 1. ábrán az éghajlati modellek három fő bizonytalansági tényezőjének egymáshoz viszonyított arányát láthatjuk.



1. ábra Az éghajlati modellek három fő bizonytalansági tényezőjének egymáshoz viszonyított aránya a hőmérsékletre és a csapadékra vonatkozóan. A kék terület a modellekből, a zöld a különböző kibocsátási scenáriókból, a sárga pedig az éghajlat saját belső változékonyságából adódó bizonytalanságot jelöli (bal oldalon globális, jobb oldalon regionális szinten). (*Hawkins, Sutton 2009*)

Az éghajlati modellek bizonytalanságait az ensemble technika alkalmazásával számszerűsíthetjük. A módszer lényege, hogy nem egy modellfuttatás eredményét vizsgáljuk, hanem egyszerre több különböző modellszimuláció eredményeit értékeljük ki. A vizsgálatot több regionális és globális modellen különböző forgatókönyvekkel hajtják végre, így elemezhető, hogy az egyes forgatókönyvek és az eltérő modellek milyen bizonytalanságot, milyen szimulációs eltérést okoznak a vizsgált időszak végére. 2004 és 2009 között például az ENSEMBLES nemzetközi projekt (*van der Linden, Mitchell, 2009*) keretében számos regionális klímamodellel hajtottak végre 25 km-es térbeli felbontású, egész Európára kiterjedő modellszimulációkat, melyekhez különböző globális modellek eredményei szolgáltatták a határfeltételeket döntően az A1B átlagos kibocsátási forgatókönyv figyelembevételével (*Szépszó, Zsebeházi, 2010*). Magyarországon négy regionális klímamodellel alkalmaznak az Országos Meteorológiai Szolgálatnál és az ELTE Meteorológiai Tanszékén a Kárpát-medencére vonatkozó éghajlati projekciók bizonytalanságainak számszerűsítésére.

3. A szélenergia hasznosítása

3.1. A szélenergia helyzete Magyarországon

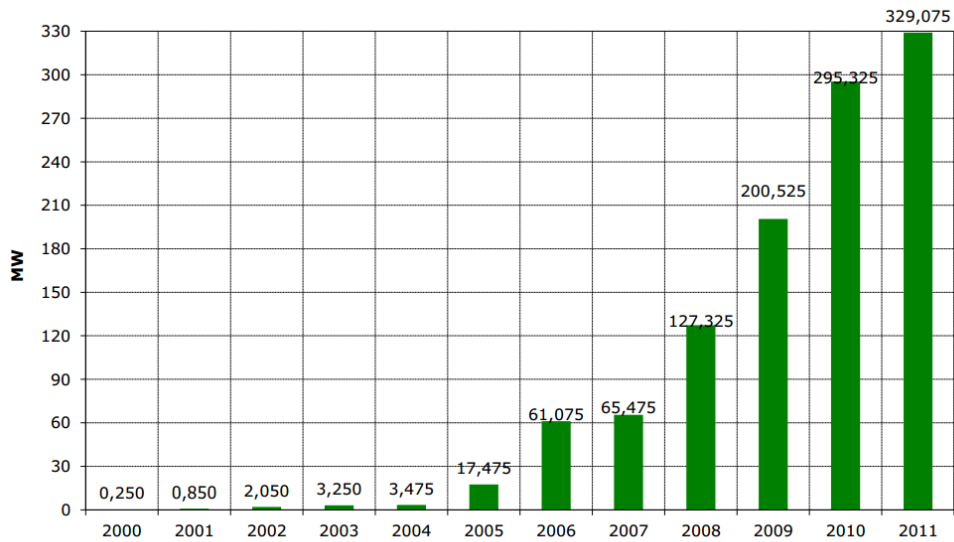
A szél mozgási energiájának hasznosítása mind hazánkban, mind az egész Földön nagy múltra tekint vissza. A szél hajtotta vitorlánhajók mellett feltehetően már a IX. században megjelentek a szél energiáját mechanikai munkává alakító szélmalomok, szélkerekek. Magyarországon az első szélmalomok a XV. században jelentek meg, majd számuk a török hódoltság alatt fokozatosan növekedett. A történeti feljegyzések szerint a XVII. századtól kezdve az elterjedésük általánossá vált olyannyira, hogy a XIX. században már több száz szélmalom működött az országban. A szélmalomok többségét az Alföld déli részén építették, a lapátok forgástengelye a felszínhez viszonylag közel helyezkedett el, így a teljesítményük feltehetően csupán 20 kW körül lehetett (*Tar, 2011*).

A modern értelemben vett szélenergia-hasznosítással Magyarországon az 1900-as évek elején kezdtek el foglalkozni. Az első energetikai célú szélméréseket a két világháború között végezték Orosházán, Balatonföldváron és a Kékestetőn. A mérések lezárultával a méréssel megbízott Magyar Királyi József Műegyetem, Mezőgazdasági és

Géptani Tanszéke azon a véleményen volt, hogy Magyarország nem rendelkezik hasznosításra alkalmas szélenergiával (Lédács, 1963). A második világháború után az ipari fejlődésnek, és az ezzel járó megemelkedett energiaigénynek köszönhetően újból vizsgálni kezdték a hazai szélenergia hasznosíthatóságát. Megalakult a szélenergia munkabizottság, és elvégezték a Martonvásár-erdőháti szélmotor-kísérleteket. A vizsgálatok pozitív eredménnyel zárultak, és megállapították, hogy van hazánkban hasznosítható szélenergia, ezért kidolgozták egy 200 kW teljesítményű szélerőmű terveit (Lédács, 1963). Mindezek ellenére a projekt ezúttal is kísérleti szinten maradt, az erőmű nem került megépítésre. A következő ilyen irányú kutatásokat az 1970-es években folytatták Lédács Aladár vezetésével. Ekkor már az Országos Meteorológiai Szolgálat tizenegy mérőhelyének többéves adatait felhasználva készítették el a szélenergia-potenciál becsléseket, melyek szerint a két szélenergetikailag legkedvezőbb terület hazánkban a Kisalföld és a Nagyalföld (Lédács, 1977, 1982). Az 1990-es években az ELTE Meteorológiai Tanszékén megkezdődött hazánk szélklimatológiai és szélenergetikai jellemzőinek részletes elemzése, illetve ezen jellemzők várható változási tendenciájának a vizsgálata. A 2000-es évek elején a dán fejlesztésű program, a WasP (Wind Atlas Analysis and Application Program, *Mortensen et al.*, 1993) felhasználásával a potenciális szélenergia regionális változékonyságát, és a felszín áramlást módosító hatását vizsgálták (*Bartholy, Radics*, 2001), 2004-ben pedig az ország teljes területére pontonként megbecsülték az átlagos szélesebséget és a rendelkezésre álló szélenergiát a WasP program segítségével. (*Radics*, 2004). Az elmúlt 10 év során az Országos Meteorológiai Szolgálatnál homogenizált mérési adatsorok interpolációjával feltérképezték a felszínközeli néhány tíz méteres réteg szélviszonyait (*Szentimrey et al.*, 2006), a numerikus modellezés eszköztárának alkalmazásával pedig a mai szélturbinák magasságában uralkodó szélviszonyokat (*Szépszó et al.*, 2006).

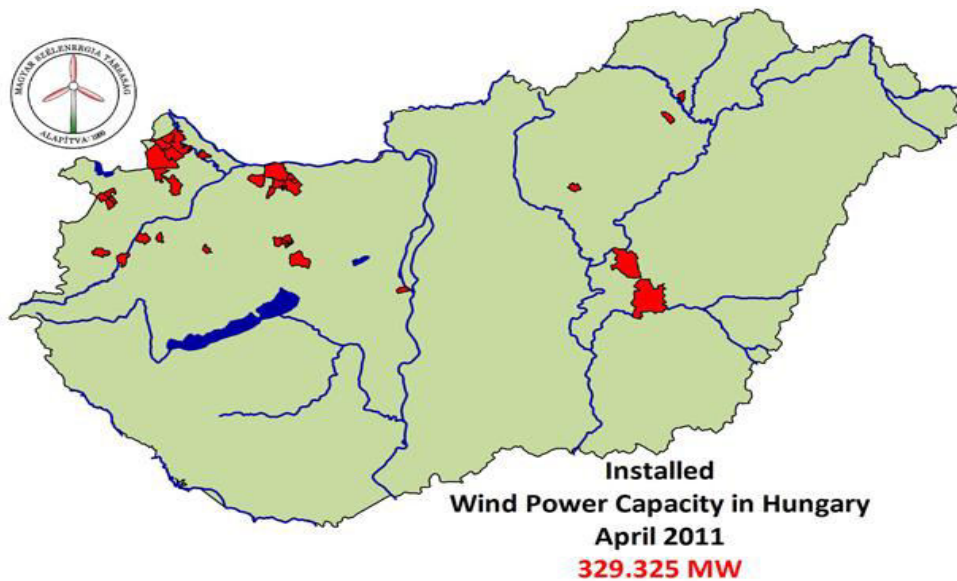
Az első hazai szélerőművet, egy 250 kW-os Nordex N-250 típusú szélturbinát, 2000-ben telepítették Inotán, bár a turbina rossz elhelyezése miatt az erőmű inkább csak demonstrációs célokat szolgált, kihasználtsága általában 10 % alatt maradt. Ezt követte 2001-ben a Kulcs mellett felállított 600 kW teljesítményű Enercon E-40 turbina. 2005-től kezdve a magyarországi szélerőmű kapacitás növekedési üteme felgyorsult, 2011-ben már 173 szélturbina működött hazánkban, mintegy 329 MW összesített névleges teljesítménnyel. (*Hartmann*, 2012) A magyarországi szélerőmű kapacitás növekedésének ütemét a 2. ábrán, területi elhelyezkedésüket pedig a 3. ábrán láthatjuk. Jelenleg a

hazánkban két leggyakrabban alkalmazott szélérőmű-típus a spanyol gyártmányú Gamesa G90 és a dán Vestas V90 szélturbina. Mindkét turbina három lapátos típus, névleges teljesítményük pedig egyaránt 2.0 MW. A rotormagasságuk a helyi adottságoktól függően 100 és 108 m között változik, a rotor átmérője 90 m. (www.gamesacorp.com, www.vestas.com)



2. ábra Hazánkban működő szélérőművek összteljesítménye

(www.mszt.hu)



3. ábra A magyarországi szélérőművek elhelyezkedése (www.mszt.hu)

3.2. A szélérőművek működésének fizikai alapjai

A szélérőművek az áramló levegő kinetikus energiáját alakítják elektromos árammá. Egy m tömegű, v sebességgel mozgó légréteg kinetikus energiáját az

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

összefüggés határozza meg. Ha a légréteg tömegét felbontjuk a sűrűségének és a térfogatának szorzatára, megkapjuk az adott (légréteg mozgási irányára merőleges) felületen, adott idő alatt átáramló levegő teljes kinetikus energiáját:

$$E = \frac{1}{2} (A v t \rho) v^2 = \frac{1}{2} A t \rho v^3 \quad (2)$$

A (2) egyenletet az idővel leosztva előáll az A felületen vett teljes szélteljesítmény:

$$P = \frac{1}{2} A \rho v^3 \quad (3)$$

Az áramló levegő részecskéi a turbinát elérve mozgási energiájuk egy részét átadják a lapátoknak, ezzel meghajtva azokat, majd alacsonyabb sebességgel haladnak tovább. Ennek értelmében fizikailag lehetetlen a szél teljes energiáját hasznosítani, mivel ez azt jelentené, hogy a részecskék minden kinetikus energiájukat átadva megállnak a turbina mögött, ahol az így föltorlódó anyag elzárja az utat a további átáramló légréteg részecskéi előtt. Az elméletileg lehetséges maximális hatásfokot a Betz-törvény mondja ki, mely szerint semmilyen turbina nem képes a szél energiáját 59.3 %-nál nagyobb hatásfokkal kihasználni (Betz, 1966). A ténylegesen kinyerhető szélteljesítményt (P_{extr}), a levegő összenyomhatatlanságának feltételezésével egyszerűen becsülhetjük a turbina előtti (P_e) és a turbina mögötti (P_m) szélteljesítmény különbségével:

$$P_{extr} = P_e - P_m = \frac{1}{2} \rho (A_e v_e^3 - A_m v_m^3) \quad (4)$$

A tömegmegmaradás következtében az áramlási sebesség és az áramlási csatorna felületének szorzata állandó,

$$A_e v_e = A_m v_m \quad (5)$$

aminek segítségével a (4) kinyerhető szélteljesítmény a következő alakra hozható:

$$P_{extr} = \frac{1}{2} \rho A_e v_e (v_e^2 - v_m^2) \quad (6)$$

A teljes és a kinyerhető széltejesítmény arányát a teljesítménytényező (C_p) határozza meg, mellyel a kinyerhető széltejesítményt már könnyen számolhatjuk:

$$P C_p = P_{extr} \quad (7)$$

A tényező lehetséges maximális értékét a már említett Betz-törvény $C_p = 0.593$ -ben maximalizálja, ami akkor állhat fenn, ha a szél a turbinán való áthaladás közben az eredeti sebességének harmadára lassul (*Bartholy et al., 2013*)

3.3. Forgásból áram

A turbina lapátjai egy tengelyt megforgatva a szél mozgási energiáját rotációs energiává alakítják. A tengely egy generátorhoz kapcsolódik, melyben egy erős mágnes vezető tekercsek közelében forgatva, azokon időben változó mágneses teret kelt. Ez pedig az indukciós törvény értelmében feszültséget generál a tekercsrendszeren. Az adott idő alatt előállított energia erősen függ a

rotor forgási sebességétől, amit a pillanatnyi szélesebesség határoz meg. A szélerőmű pillanatnyi teljesítménye és a szélesebesség közötti kapcsolatot a teljesítménygörbe határozza meg, mely megadja, hogy egyes szélesebességek esetén az adott szélturbina mekkora teljesítményt ad le. A teljesítménygörbe pontos menete minden turbinatípusra különböző, de egyes alapvető



4. ábra Vestas V90 típusú turbina rotormechanikája a turbina belsejéből (<http://www.origo.hu/idojaras>)

tulajdonságaikban megegyeznek. Azt a szélesebességet, ahol a szél által a lapátokra ható forgatónyomaték meghaladja a tengely forgással szembeni ellenállását, és beindul a forgómozgás, bekapcsolási sebességnek nevezzük. A bekapcsolási sebesség tipikusan 3-5 m/s közé esik. A bekapcsolási sebesség elérése után a szélesebesség növekedésével a turbina által leadott teljesítmény erősen növekszik egészen addig, amíg a szélerőmű generátora el nem éri a maximális teljesítményét. Ezt a szélesebességet névleges

szélsebességnek nevezzük, a szélerőmű inentől kezdve adja le a teljes névleges teljesítményét, az értéke pedig tipikusan 12-17 m/s közé esik. Ezek után a szélsebesség további növekedése már nem eredményez többleteljesítményt. A harmadik jellemző érték a leállási, vagy kikapcsolási sebesség, amely fölött a turbina leáll a nagy forgási sebességek miatt bekövetkező károk elkerülése érdekében. A leállítás általában 25 m/s-os szélsebesség fölött történik meg (*Bartholy et al.*, 2013).

4. Módszertan

4.1. Felhasznált adatok

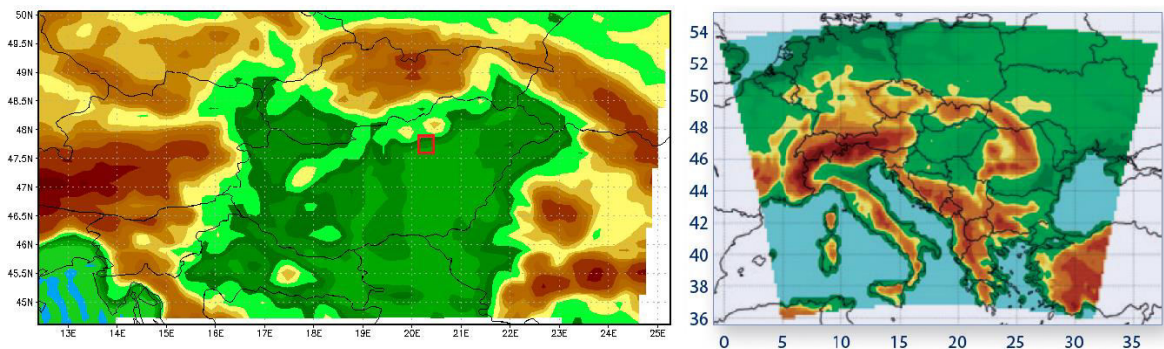
4.1.1. Vizsgált regionális éghajlati modellek bemutatása

A dolgozatban Magyarország szélklimatológiai jellemzőinek a század végéig várható változását vizsgáljuk két regionális éghajlati modell eredményeinek alapján. A két alkalmazott modell az ALADIN-Climate (4.5 verzió, *Spiridonov et al.*, 2005) és a REMO (5.0 verzió, *Jacob*, 2001). Az ALADIN-Climate modellt a Météo France nemzetközi együttműködésben fejlesztette ki, az ARPEGE-Climate (*Royer et al.*, 2002) légkör-óceán általános cirkulációs modell alapján. Az ALADIN modell eredetileg egy rövidtávú előrejelző modell volt, melybe beültették az ARPEGE-Climate parametrizációját, amelyben nagyobb hangsúly fektettek a hosszabb időtávon domináló folyamatok pontosabb leírására, így létrehozva egy korlátos tartományú regionális klímamodellt az ALADIN-Climate-et. A modellt az Országos Meteorológiai Szolgálat 2005-ben adaptálta, hogy pontosabb képet kaphassunk Magyarország és a Kárpát-medence éghajlatának jövőbeli alakulásáról. Az ALADIN-Climate horizontálisan Lambert-féle kúpvetületet, vertikálisan pedig hibrid koordinátarendszert alkalmaz, mely a légkör alsó részében felszínkövető, a magasban pedig fokozatosan belesimul a nyomási felületekbe. Sok másik modellhez hasonlóan az ALADIN-Climate is hidrosztatikus közelítést alkalmaz, vagyis a vertikális irányú gyorsulásokat zérusnak veszi. Ennek következtében a kisebb karakterisztikus méretű, konvektív folyamatok csak parametrizált formában szerepelnek a modellben. A modell prognosztikai változói a hőmérséklet, a specifikus légnedvesség, a felszíni légnyomás és a szélsebesség horizontális irányú komponensei.

A másik alkalmazott regionális klímamodell, a REMO a Deutscher Wetterdienst időjárás előrejelző modelljének (Europa Modell, *Majewski*, 1991) és az ECHAM4 (*Roeckner et al.*, 1996) általános cirkulációs modellnek az ötvözéséből született a hamburgi Max Plank Intézet fejlesztésében. A modellt az Országos Meteorológiai Szolgálatnál 2004-ben adaptálták. A REMO horizontális koordinátázásra egy elforgatott szférikus koordinátarendszert, míg vertikálisan az ALADIN-hoz hasonlóan hibrid koordinátázást használ. A REMO is hidrosztatikus modell, a prognosztikai változói a hőmérséklet, a horizontális szélesség-komponensek, a specifikus nedvesség, a felhő-víz-tartalom, illetve a felszíni légnyomás. A két modell legfontosabb jellemzőit az 1. táblázatban láthatjuk (*Szabó et al.*, 2010).

1. táblázat Az ALADIN és a REMO regionális klímamodellek főbb jellemzői (*Szabó et al.*, 2010)

	ALADIN-Climate	REMO
Kiindulási modell	ALADIN, ARPEGE-Climate	Europa Modell, ECHAM4
Hidrosztatikus közelítés	Hidrosztatikus	
Horizontális koordinátarendszer	Lambert-féle kúpvetület	Elforgatott szférikus rendszer
Vertikális koordinátarendszer	Hibrid	
Prognosztikai változók	hőmérséklet, specifikus nedvesség, felszíni légnyomás, szélesség horizontális komponensei	hőmérséklet, specifikus nedvesség, felhő-víz-tartalom felszíni légnyomás, szélesség horizontális komponensei



5. ábra Az ALADIN (balra) és a REMO (jobbra) regionális modellek integrálási tartományai. A piros téglalap a külön vizsgált Eger környéki régiót jelöli. (www.met.hu)

4.1.2. Vizsgált modellszimulációk bemutatása

A dolgozatban elvégzett vizsgálatokhoz az előbbieken bemutatott ALADIN-Climate és REMO regionális modellek szimulációs eredményeit használtuk fel. Az ALADIN-Climate szimuláció az 1961-2100-ig terjedő időszakra készült 10 km-es térbeli felbontással a Kárpát-medence területére. A határfeltételeket az ARPEGE-Climate globális modell szolgáltatja. A modell futtatása során az átlagos jövőbeli antropogén üvegházgáz-kibocsátásra vonatkozó A1B scenáriót alkalmazták. A REMO szimuláció az 1951-2100-as időszakra készült Közép- és Kelet-Európára vonatkozóan 25 km-es térbeli felbontással. Az oldalsó határfeltételeket az ECHAM5/MPI-OM modellszimulációk biztosították és ebben az esetben is az A1B kibocsátási forgatókönyv volt érvényben. A két modellkísérlet jellemzőit a 2. táblázatban foglaljuk össze, az integrálási tartományokat pedig az 5. ábrán láthatjuk. Az adatok minden esetben havi átlagos mezők formájában álltak rendelkezésünkre.

2. táblázat Vizsgált modellszimulációk 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
Integrálási tartomány	Kárpát-medence	Közép- és Kelet-Európa
Határfeltételek	ARPEGE-Climate	ECHAM5/MPI-OM
Határfeltételek térbeli felbontása	125 km	200 km
Projekciós forgatókönyv	A1B	

4.1.3. Mérési adatbázisok

A két éghajlati modellt és az alapvető tulajdonságaikat már bemutattuk, most térjünk ki röviden a két referenciaként használt adatbázisra. Ezen mérési adatbázisokra a modellek validációjának elvégzésekor volt szükségünk, melyet később részletesebben ismertetünk. A modelleredmények validálásához a HUGRID és a CARPATCLIM mérési adatbázisait használtuk referenciaként. A HUGRID egy felszíni rácsponti megfigyelési adatbázis, melynek előállításához minden magyarországi mérőállomás adatait felhasználták. Az adatbázis az OMSZ-ban készült, nyers megfigyelési adatok rácspontokra való interpolációjával, 0,1 fokos rácsfelbontással. Az interpolációhoz a MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis; *Szentimrey et al.*, 2005) meteorológiai interpolációs szoftverrel végezték.

A CARPATCLIM mérési adatbázis egy nemzetközi projekt keretében készült, melynek célja a teljes Kárpát-régió éghajlatának részletes vizsgálata egységes módszertannal, illetve tér- és időbeli felbontással. A CARPATCLIM homogenizált adatokra épül, az adathomogenizációt a magyar fejlesztésű MASH (Multiple Analysis of Series for Homogenization; *Szentimrey*, 2006) eljárással, a rácspontokra történő interpolációt pedig a MISH eljárással végezték. Az adatbázis havi és napi adatmezőket tartalmaz 0,1 fokos térbeli felbontással, melyeket a szélesség esetében napi három mérési eredmény átlagaiból állítottak elő (*Lakatos et al.*, 2013)

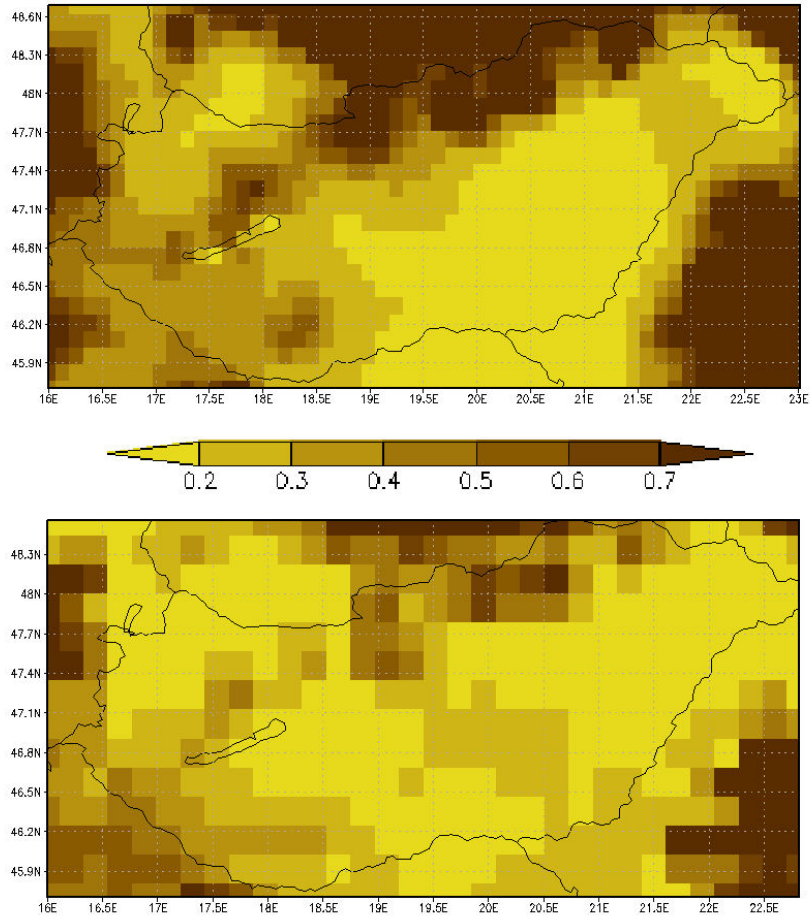
4.1.4. Egyéb felhasznált adatok

A dolgozat célja, hogy a szélesebbeséget, energiasűrűséget, teljesítményt a szélerőművek rotorjának magasságában jellemezzük. Mivel az egész Magyarországot lefedő megfigyelések esetében csak felszíni adatok állnak rendelkezésünkre, ezért a felszíni szélesebbesség adatokból magassági adatokat kell előállítanunk. Hogy konzisztensen hasonlítsuk össze a méréseket és a modellszimulációkat, ezért a modelleredmények esetében is a felszíni információk segítségével állítottuk elő a magassági értékeket. Ehhez szükség van a felszín érdességi paramétereire. Az érdesség a felszín minőségi jellemzője, mely az adott felszín egyenetlenségének mértékét adja meg. Azt a felszíntől számított magasságot jelenti, ahol a szélesebbesség nullára csökken. Tipikus értékei méterben megadva (WMO, 2008):

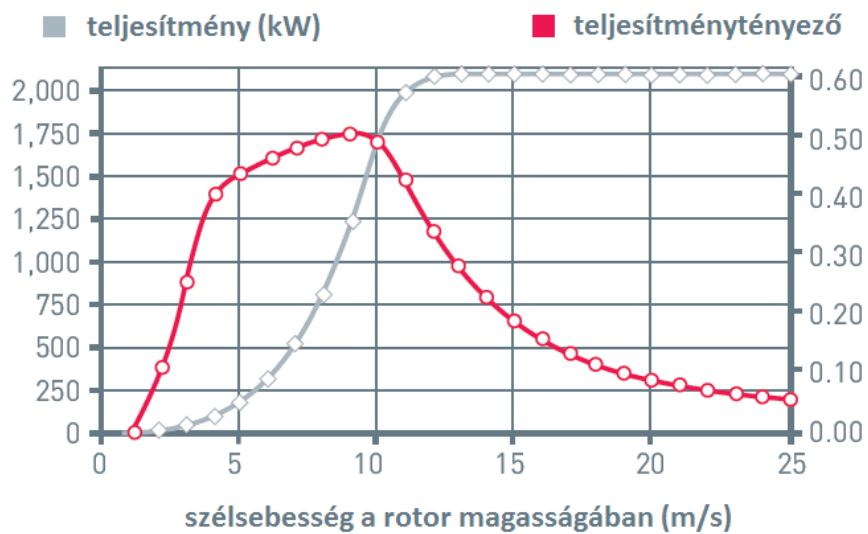
- Nyugodt, nyílt vízfelszín fölött: 0,0002 m
- Hóval borított, vagy vegetációmentes felszín fölött: 0,005 m
- Fűvel borított felszín fölött: 0,03 m
- Gabonaföld fölött: 0,1-0,25 m
- Erdős területen: 1,0 m

Az ALADIN esetében a modellbe épített érdességi mező havonta változik (szimulálja a természetes vegetáció éves változását): januárban minimális, júniusban maximális érdességet adva, míg a REMO időben állandó érdességgel számol. A 6. ábrán az ALADIN modellfelszín éves átlagos érdességét és a REMO modellfelszín érdességét láthatjuk.

Végül még egy adattípusra volt szükségünk a vizsgálatok elvégzéséhez. A kinyerhető teljesítmények kiszámolásához felhasználtunk egyes konkrét szélerőmű-típusokra vonatkozó teljesítménygörbéket. Az adatok táblázatos formában voltak megadva, melyek tartalmazták, hogy adott szélesebbesség mellett (1-25 m/s között) mennyi a turbina által leadott teljesítmény. A 7. ábrán egy erre vonatkozó példát láthatunk.



6. ábra Az ALADIN (fent) és a REMO (lent) éves átlagos érdessége méterben kifejezve



7. ábra Az Enercon E-82 szélturbina teljesítménygörbéje (<http://www.enercon.de>)

4.2. Validációs eljárás

A modellek jövőre vonatkozó eredményeit csak akkor értékelhetjük reálisan, ha tisztában vagyunk vele, hogy a múlttra vonatkozóan milyen pontossággal adják vissza egy adott időszak éghajlatát, mérési eredményeit. Ezért szükséges a modelleredmények validálása, mely során egy múltbeli időszakra futtatott szimuláció eredményeit összehasonlítjuk az adott időszakra vonatkozó, mérésekből előállított mezőkkel, és vizsgáljuk az eltérés mértékét, területi és időbeli eloszlását. A modellek validálását a HUGRID és a CARPATCLIM referencia-adatbázisokkal végeztük, minden esetben az 1961-1990-es időszakot használva referenciaként. A validáció első lépéseként a mérésekből származó szélmezőket, amennyiben szükséges volt az egyes modellek rácshálózatára transzformáltuk, melyek az ALADIN esetében $0,13^\circ$, a REMO esetében pedig $0,22^\circ$ felbontású rácshálózatot jelentettek. Ezután előállítottuk a különbségmezőket. Kiszámoltuk a harminc éves átlagos mezők különbségét, illetve az egyes hónapokra és évszakokra vonatkozó átlagos mezők különbségét. Előállítottuk az eltérések területi átlagát Magyarország területére és egy szűkebb, Eger környéki régióra is. A leszűkített terület az ALADIN modell esetében egy 3×3 rácspontot tartalmazó, k. h. $20,16^\circ - 20,42^\circ$, é. sz. $47,65^\circ - 47,93^\circ$ koordinátákkal határolt terület, a REMO esetében pedig egy 2×2 rácspontot tartalmazó k. h. $20,18^\circ - 20,4^\circ$, é. sz. $47,68^\circ - 47,92^\circ$ koordinátákkal határolt terület. Az Eger körüli terület országon belüli helyzetét az 5. ábrán látható ALADIN domborzati térképén bejelöltük.

4.3. Magassági széleseesség előállítása

4.3.1. Szélprofilok

A felszín közelében a széleseesség erősen függ a talajtól számított távolságtól. Minél magasabban vagyunk a talaj felett, a széleseesség annál nagyobb lesz, ugyanis a távolság növekedésével a talaj okozta súrlódás egyre kisebb mértékben befolyásolja a légáramlatokat. Ha ismerjük a szél függőleges profilját, akkor a felszínen mért széleseességből megbecsülhetjük a magasban uralkodó széleseességet. Erre számos módszer létezik, melyek mind eltérő módon közelítik a széleseesség függőleges koordináta szerinti megváltozását. Két ismert szélprofil mutatunk be (*Götz., Rákóczi, 1988*) nyomán. Az egyik ilyen széles körben elterjedt szélprofil a logaritmikus szélprofil. A logaritmikus szélprofil levezetéséhez a következő összefüggésekből indulunk ki:

$$\frac{d\bar{u}}{dz} = \frac{u_*}{l} \quad (8)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_{zx}}{\rho}} \quad (9)$$

ahol \bar{u} az átlagos szélességet, z a vertikális koordinátát, u_* a dinamikus, vagy nyírási sebességet, l a keveredési úthosszat, τ a turbulens feszültségi tenzort, ρ pedig a levegő sűrűségét jelöli. Feltételezzük, hogy a keveredési úthossz a magassággal lineárisan növekszik, az arányossági tényezőt Kármán-féle konstansnak nevezzük.

$$l = kz \quad (10)$$

A keveredési hosszra vonatkozó (10) kifejezést a (9)-ba behelyettesítve, majd a változókat szétválasztva a

$$d\bar{u} = \frac{u_*}{k} \frac{1}{z} dz \quad (11)$$

egyenletre jutunk, melyet a felszín és az adott szint között integrálva megkapjuk a logaritmikus szélprofilra vonatkozó összefüggést:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \ln z + C \quad (12)$$

Ha a szélességet érdes felszín fölött szeretnénk meghatározni, az integrálás alsó határát nem a $z=0$ felszín, hanem z_0 érdességi magasság (az a felszín feletti magasság, ahol az átlagos szélesség elméletileg nullává válik) jelenti. Az integrálást az új határok között elvégezve megkapjuk az érdes felszín fölötti logaritmikus szélprofil:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (13)$$

A logaritmikus szélprofil a talaj közvetlen közelében nem ad jó közelítést a szélességre, mivel a felszínhez nagyon közel érve az átlagos szélesség már nehezen definiálható, továbbá erősen érdes felszínek esetén a szélesség nem válik nullává a felszínen. A szélprofilat kiegészíthetjük még egy további paraméterrel, amellyel egy vegetáció fölött érvényes formulát kapunk:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (14)$$

ahol d a vegetáció átlagos magasságát jelöli (Götz, G., Rákóczi, F., 1988).

Egy másik gyakran alkalmazott szélprofil a hatványkitevős formula. A formulát úgy kapjuk meg, hogy a keveredési úthossz magassággal való változását a következő módon közelítjük:

$$l = l_0 z^n \quad (15)$$

ahol l_0 a keveredési hossz értéke $z = 1$ m magasságban, és $n \geq 1$. Ebben az esetben az átlagos szélsébség magasság szerinti változása:

$$\frac{d\bar{u}}{dz} = \frac{u_*}{l_0 z^n} \quad (16)$$

amit a felszín és az adott magasság között kiintegrálva megkapjuk a hatványkitevős szélprofil.

$$\bar{u} = \frac{u_*}{l_0(1-n)} z^{1-n} + C \quad (17)$$

4.3.2. A dolgozatban használt kombinált szélprofil

A dolgozatban elvégzett számításokhoz egy harmadik szélprofil formulát használtunk, melyet a fenti kettő kombinációjából hoztak létre statisztikai klimatológiai megfontolások alapján (*Szentimrey et al.*, 2006). A szélprofil abból a célból alkották, hogy a különböző felszín feletti magasságban elhelyezett szélmérők adatsorait egységesen 10 m-re számítsák át. A feladat során a logaritmikus vagy a hatványkitevős formulát alkalmazva az eredmények nem lettek kellő pontosságúak, illetve gondot okozott a hatványkitevő formalizálása, mivel az függ a talaj érdességétől, az érdesség pedig időfüggő mennyiség. Végül egy olyan kétparaméteres formulát vezettek be, amely mindkét egyparaméteres formulát egyaránt figyelembe veszi, és pontosabb eredményeket szolgáltat, mintha a két profilt külön-külön alkalmaznánk.

$$\bar{u} = \left(\frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z/z_0^*)} \right) v(z_0^*) z^{\alpha(z_0^*)} \quad (18)$$

Ebben a formulában a hatványkitevőket konstans $z_0^* = 0,1$ érdesség mellett, de az időfüggés megtartásával valós minta alapján becsülték. A dolgozatban ezt a szélprofil alkalmazva számoltuk ki a 10 m-es szélsébségekből a 100 m-es szélsébségeket. Ebben a konkrét esetben az átszámítási formula a:

$$\bar{u}_{100} = \bar{u}_{10} \left(\frac{\ln(100/z_0)/\ln(100/0,1)}{\ln(10/z_0)/\ln(10/0,1)} \right)^{\gamma(0,1)} \left(\frac{100}{10} \right)^{\alpha(0,1)} \quad (19)$$

alakot öltötte. Az átszámításkor a két paraméter $\gamma(0,1)$, $\alpha(0,1)$ 12 hónapra modellezett átlagos értékeivel számoltuk, melyek a 3. táblázatban láthatóak, a z_0 érdességet pedig az ALADIN és a REMO említett adataiból vettük.

3. táblázat Az alkalmazott szélprofil paraméterei az év során

Hónap	$\gamma(0,1)$	$\alpha(0,1)$
Január	0.6770	0.2036
Február	0.6884	0.2115
Március	0.6992	0.1753
Április	0.6329	0.1580
Május	0.6346	0.2078
Június	0.6223	0.2395
Július	0.6197	0.2594
Augusztus	0.6585	0.2651
Szeptember	0.7241	0.2798
Október	0.7153	0.2350
November	0.6703	0.2168
December	0.6411	0.2229

4.4. Az energiasűrűség kiszámítása

A szél energiasűrűsége nem más, mint az egységnyi idő alatt egységnyi felületen átáramló levegő kinetikus energiája. Ha az áramló levegő kinetikus energiájára vonatkozó (2) egyenletet elosztjuk az idővel és a felülettel, megkapjuk az energiasűrűséget:

$$e = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (20)$$

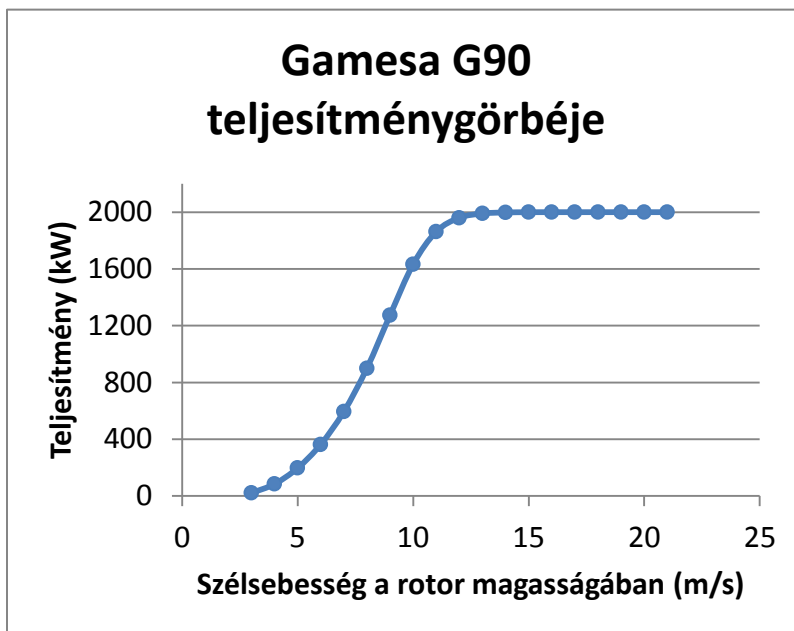
Ezt az összefüggést alkalmazva a 100 m-es szélesség-mezőkből előállíthatjuk a 100 m-re vonatkozó energiasűrűség mezőket. A levegő sűrűségének átlagos értéke normál légköri nyomás mellett:

- 20 °C-on 1,2045 kg/m³
- 10 °C-on 1,2471 kg/m³
- 0 °C-on 1,2928 kg/m³

Magyarországon a legmelegebb, július hónap középhőmérséklete 20-21 °C, a leghidegebb, január hónap középhőmérséklete 0-(-2)°C, az éves középhőmérséklet pedig 10-11 °C közé esik. Ha a 20 °C-hoz, illetve a 0 °C-hoz tartozó sűrűségeket elosztjuk a 10 °C-hoz tartozó értékkel, megkapjuk, hogy maximálisan mekkora relatív hibát vétünk, ha egész évben a közepes értékkel számolunk. Mivel a maximális relatív hiba csupán 3.5 %, így a számítások során a levegő sűrűségének a hőmérséklet ingadozásából adódó változását elhanyagoltuk, és egy konstans, 10 °C-hoz tartozó sűrűség értékkel dolgoztunk.

4.5. A teljesítmény kiszámítása

Célunk az volt, hogy minden rácspontban meghatározzuk a (6) összefüggésben bemutatott, potenciálisan kinyerhető szélteljesítmény átlagos értékeit. Az összefüggésből látható, hogy a kinyerhető teljesítmény függ a turbina előtti és a turbina mögötti szélességtől, amiről nem rendelkezünk információval. Ezért a képlet alkalmazása helyett teljesítménygörbék segítségével határoztuk meg a kinyerhető szélteljesítményt. A 8. ábrán egy teljesítménygörbét láthatunk, amely a rotor magasságában fújó szél sebességéhez hozzárendeli a turbina által leadott teljesítményt. A teljesítménygörbéket a szélérőművek gyártói határozzák meg minden egyes típusra külön-külön, hiszen a turbina geometriájától, kialakításától, névleges teljesítményétől függően a görbék menete más-más formát ölthet. A 100 m-es szélmezőket először sebesség szerint részekre osztottuk 1 m/s-os lépésközzel, így megkaptuk az egyes szélességekhez tartozó területeket. Ezután minden részmezőhöz a szélesség és a teljesítménygörbe alapján meghatároztuk az arra vonatkozó kinyerhető szélteljesítményt. Végül a részmezőket újra egyesítve megkaptuk a teljes tartományra vonatkozó kinyerhető teljesítményt.



Szélsebesség (m/s)	Teljesítmény (kW)
3	21.3
4	84.9
5	197.3
6	363.8
7	594.9
8	900.8
9	1274.4
10	1633.0
11	1863.0
12	1960.4
13	1990.4
14	1997.9
15	1999.6
16	1999.9
17	2000.0
18-21	2000.0

8. ábra Gamesa G90 turbina és teljesítménygörbéje (<http://www.gamesacorp.com>)

5. Eredmények

5.1. Validációs eredmények

Az éghajlati modellek alkalmazásának első lépése a modell tesztelése, azaz validációja. A tesztelést úgy végezzük, hogy a múltira vonatkozóan futtatjuk a modellt, és megvizsgáljuk, hogy az milyen pontossággal képes visszaadni a közelmúlt éghajlati jellemzőit. Ezt kétféleképpen is megtehetjük. Egyrészt elvégezhetjük a szimulációt úgy, hogy az oldalsó peremfeltételeket reanalízis adatok adják (például az ERA 40 reanalízis adatbázisa). Mivel a reanalíziseket megfigyelések felhasználásával állítják elő, így a peremfeltételeket „kvázi-tökéletesnek” tekinthetjük, hiszen azokból jelentős hiba nem

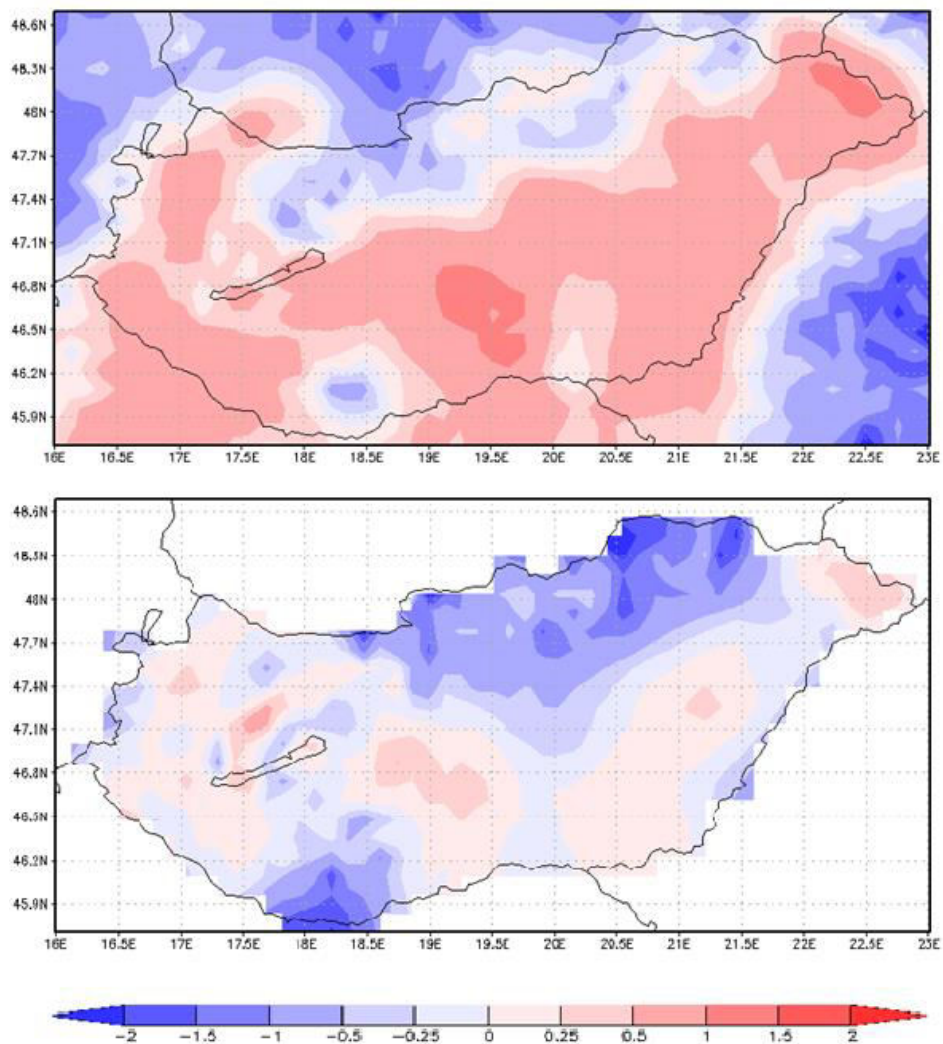
kerül a szimulációkba, így pontos képet kaphatunk a tesztelt modell viselkedéséről. Másrészt elvégezhetjük a tesztelést úgy is, hogy már a múltira vonatkozóan is globális modellek szolgáltatják a peremfeltételeket. Ebben az esetben arról kapunk információt, hogy a peremfeltételeken keresztül a globális modell milyen további pontatlanságot visz be a regionális szimulációkba. Mivel a jövőre nézve csak ilyen módszerrel végezhetünk regionális modellfuttatásokat, ezért jelen esetben is olyan modellszimulációk eredményeit vizsgáljuk, melyeknek globális modellek szolgáltatták a peremfeltételeket. A peremfeltételeket szolgáltató modellek és ezek felbontása a 2. táblázatban láthatóak.

A validációt mindkét regionális modellre elvégeztük a először a HUGRID, majd a CARPATCLIM adatbázist használva referenciaként, így képet kaptunk arról is, hogy a CARPATCLIM adatbázis előállításánál alkalmazott adathomogenizációs eljárás, hogyan befolyásolja a vizsgált modellel való egyezést. Az eredmények alapján elmondhatjuk, hogy a két adatbázis egymástól kissé eltérő következtetésekre vezet. A validáció során előállítottuk a négy vizsgált elem (10 m-es szélesség, 100 m-es szélesség, 100 m-es energiasűrűség, 100 m-es potenciális teljesítmény) modellszimulációból származó illetve a mérési adatbázisokból előállított mezőjének különbségét a 30 éves periódus éves, évszakos és havi átlagaira vonatkozóan. A különbségmezők területi átlagolásával kiszámoltuk az egyes elemek átlagos eltérését Magyarországra és a korábban említett Eger környéki régióra.

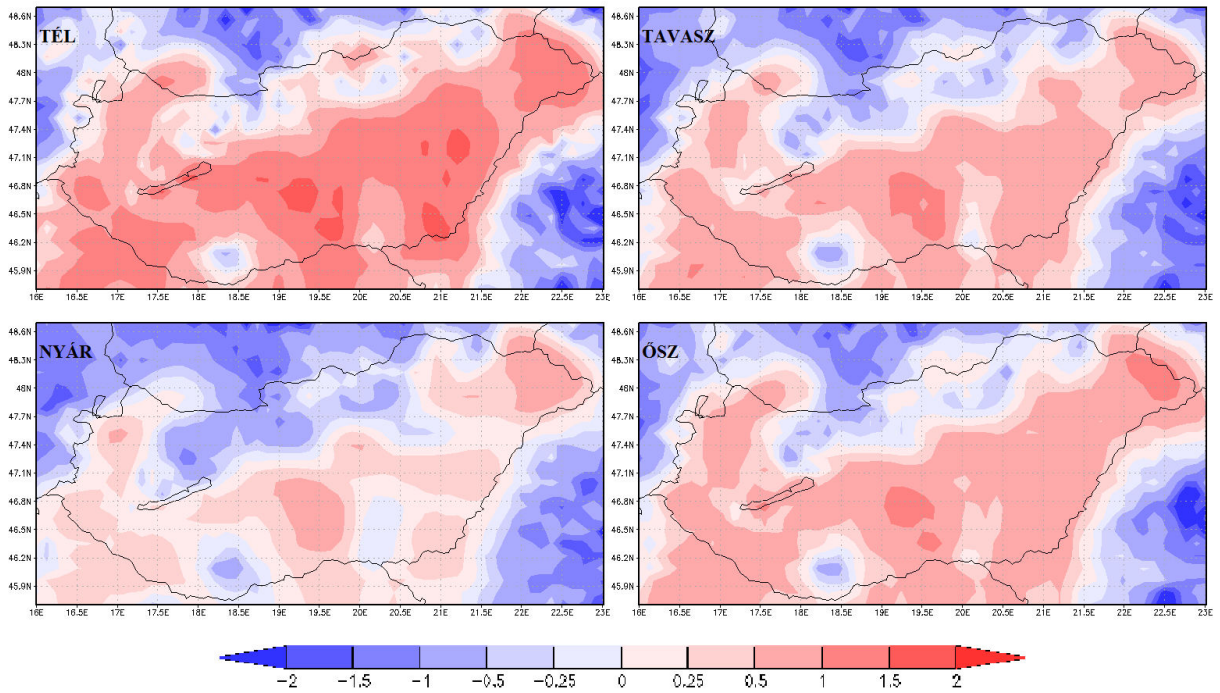
5.1.1 10 m-es szélesség

A validációt a felszíni szélesség-mezővel kezdtük. Az ALADIN modell esetében a HUGRID adatbázist használva referenciaként azt tapasztaltuk, hogy az ország nagyobb részén a szélesség enyhe felülbecslése jellemző. Kivételt képeztek a magasabban fekvő területek (Dunántúli-középhegység, Északi-középhegység, Mecsek), ahol a modell épp ellenkezően, kisebb értékeket adott a mérési adatbázisoknál (9. ábra). A legerősebb felülbecslés a téli időszakra, a legkisebbet pedig a nyári időszakra kaptuk (10. és 11. ábra). A harminc éves átlagos eltérés a szimulációs és a mérési mezők között az ország területén +0,4 m/s, a szűkebb egri régióban pedig -0,2 m/s lett. Ha a validációt a CARPATCLIM adatbázissal végeztük, a modell és a mérések közötti eltérés átlagosan kisebbnek bizonyult, és inkább a szélesség alulbecslése volt a jellemző. A hegységekben azonban itt is erősebb alulbecslést tapasztaltunk, mint más tájakon (9. ábra).

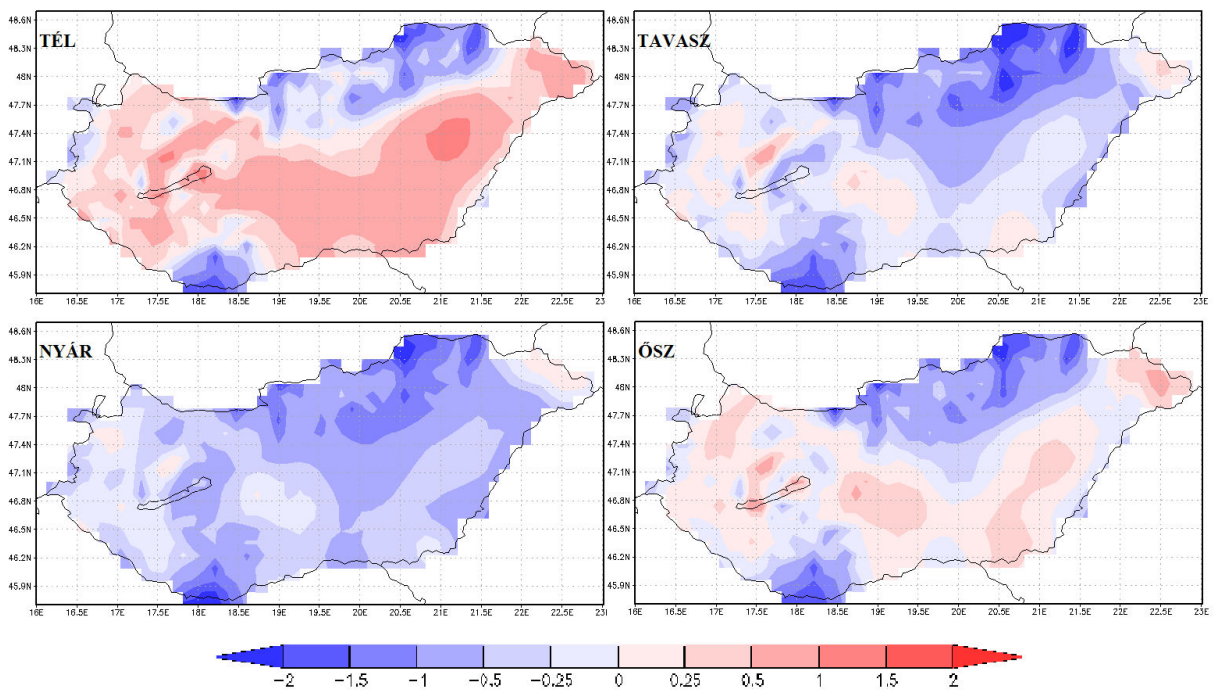
Az évszakokat tekintve, ebben az esetben is a modell a téli évszak szélességét becsülte leginkább fölül, a nyárit azonban a többi évszagnál erősebben becsülte alul (10. és 11. ábra). A harminc éves átlagos eltérés a szimulációs és a mérési mezők között az ország területén: $-0,3$ m/s-nak, az egri régióban pedig $-0,9$ m/s-nak adódott (4. táblázat). Ahhoz, hogy az eltéréseket értelmezni tudjuk, megadjuk a modell 30 éves átlagos 10 m-es szélességének az országra vonatkozó területi átlagát, ami az ALADIN esetén $2,8$ m/s.



9. ábra Az ALADIN modell 10 m-es átlagos éves szélességének validációja (m/s). Referencia adatbázisok: HUGRID (fent), CARPATCLIM (lent), referencia időszak: 1961-1990.

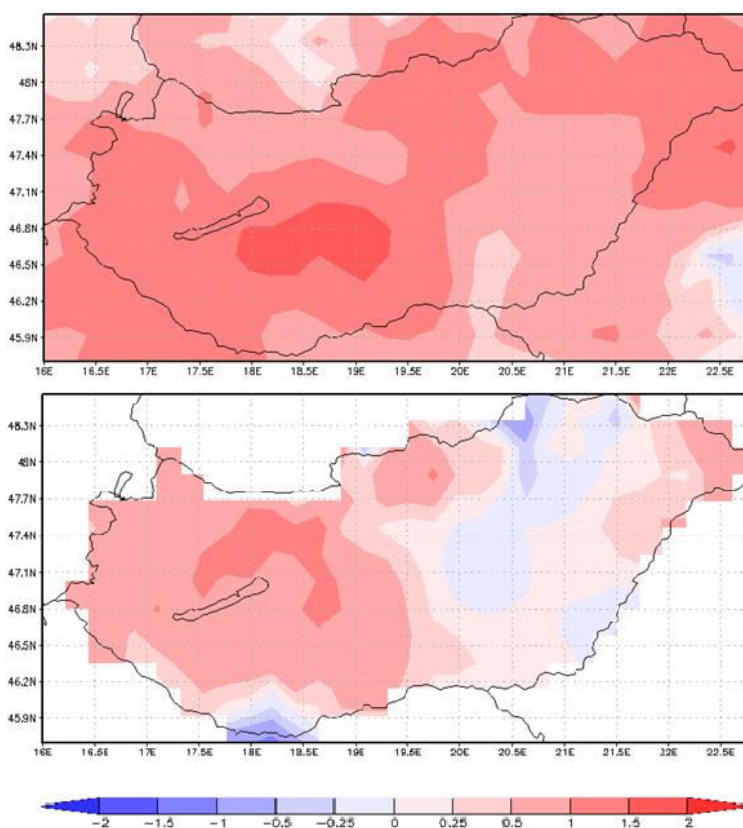


10. ábra Az ALADIN modell 10 m-es átlagos szezonális szélességének validációja (m/s).
Referencia adatbázis: HUGRID, referenciaidőszak: 1961-1990

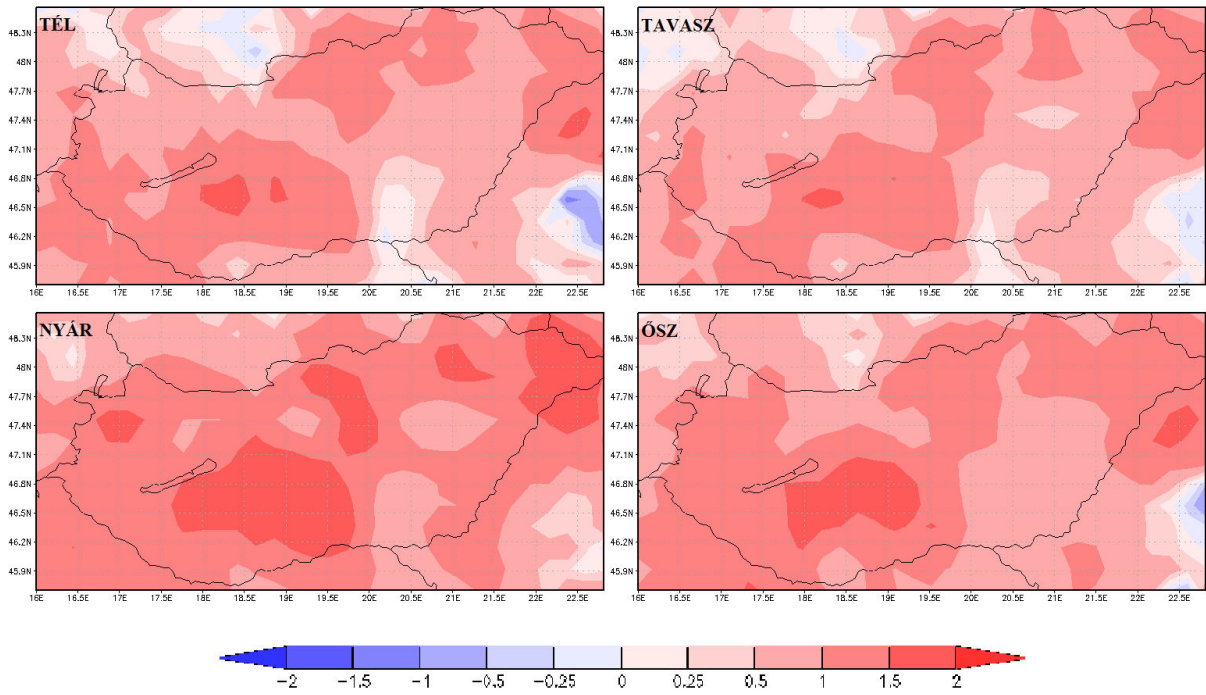


11. ábra Az ALADIN modell 10 m-es átlagos szezonális szélességének validációja (m/s).
Referencia adatbázis: CARPATCLIM, referenciaidőszak: 1961-1990

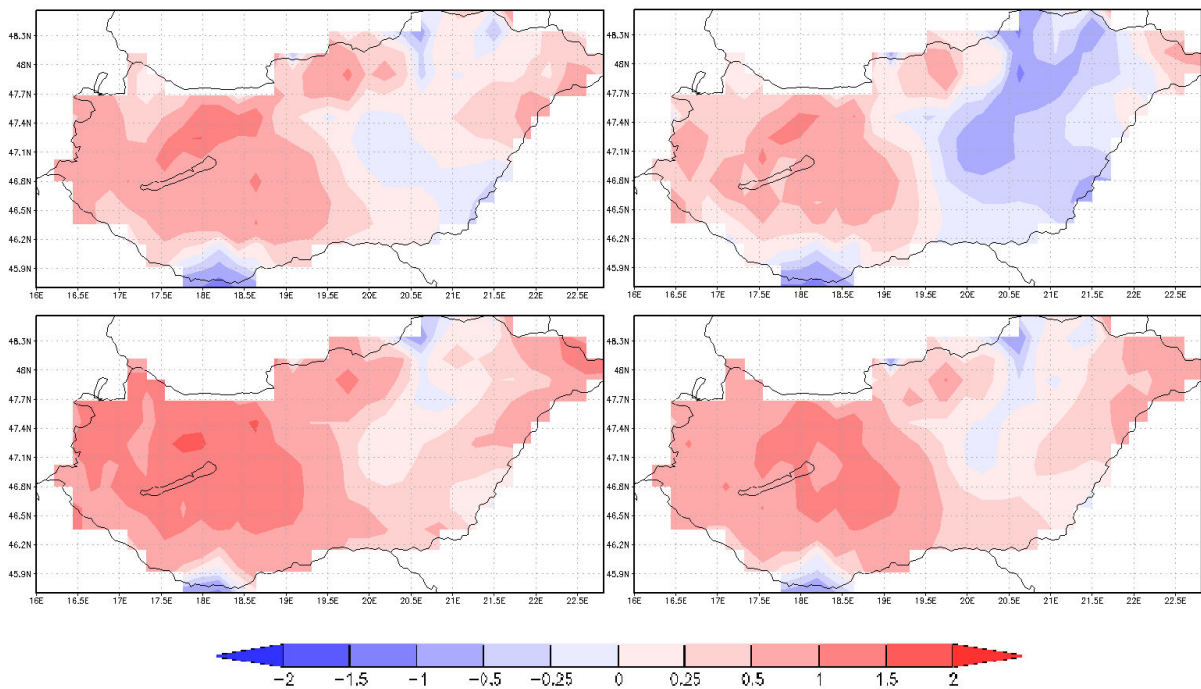
A REMO modellszimuláció validációja során átlagosan nagyobb eltéréseket, de a különböző referenciáktól vett eltérések irányára vonatkozóan egységesebb képet kaptunk. A modell mindkét mérési adatbázis szerint az ALADIN-nál erősebben túlbecsülte a szélsőséget, a legnagyobb felülbecslést a közép-dunántúli területekre adva (12. és 13. ábra). Az egyetlen jelentősebb alulbecslést a tavaszi időszakokra vonatkozóan tapasztaltuk az ország keleti felén (A CARPATCLIM adatokkal összehasonlítva). A CARPATCLIM adataival végzett validáció a REMO esetében is valamivel kisebb átlagos eltéréseket adott, illetve az ország legdélebbi részén megjelent egy új terület (villányi régió), amire az alulbecslés lett a jellemző mind a négy évszak során (14. ábra). A REMO validációs ábráin a hegységek nem emelkedtek ki úgy, ahogyan az ALADIN esetében. A HUGRID adatbázissal végzett validáció szerint az éves átlagos eltérés az ország területére +0,9 m/s, az egri területre +1,0 m/s. A CARPATCLIM adatbázissal végzett validáció éves átlagos értékei az egész országra: +0,4 m/s-ot, Egerre pedig +0,2 m/s-ot adtak (4. táblázat). Ahhoz, hogy az eltéréseket értelmezni tudjuk, megadjuk a modell 30 éves átlagos 10 m-es szélsőségszélének az országra vonatkozó területi átlagát, ami a REMO esetében 3,4 m/s.



12. ábra A REMO modell 10 m-es átlagos éves szélsőségszélének validációja (m/s). Referencia adatbázisok: HUGRID (fent), CARPATCLIM (lent), referencia időszak: 1961-1990.



13. ábra A REMO modell 10 m-es átlagos szezonális szélesebbégének validációja (m/s).
Referencia adatbázis: HUGRID, referenciaidőszak: 1961-1990.



14. ábra A REMO modell 10 m-es átlagos szezonális szélesebbégének validációja (m/s).
Referencia adatbázis: CARPATCLIM, referenciaidőszak: 1961-1990

4. táblázat A modellek 10 m-es szélességének átlagos éves eltérései a mérési adatbázisoktól

10 m-es szélesség átlagos éves eltérései (m/s)		
Modell/Referencia	Éves	
	M.o.	Eger
ALADIN/HUGRID	0,4	-0,2
ALADIN/CARPATCLIM	-0,3	-0,9
REMO/HUGRID	0,9	1,0
REMO/CARPATCLIM	0,4	0,2

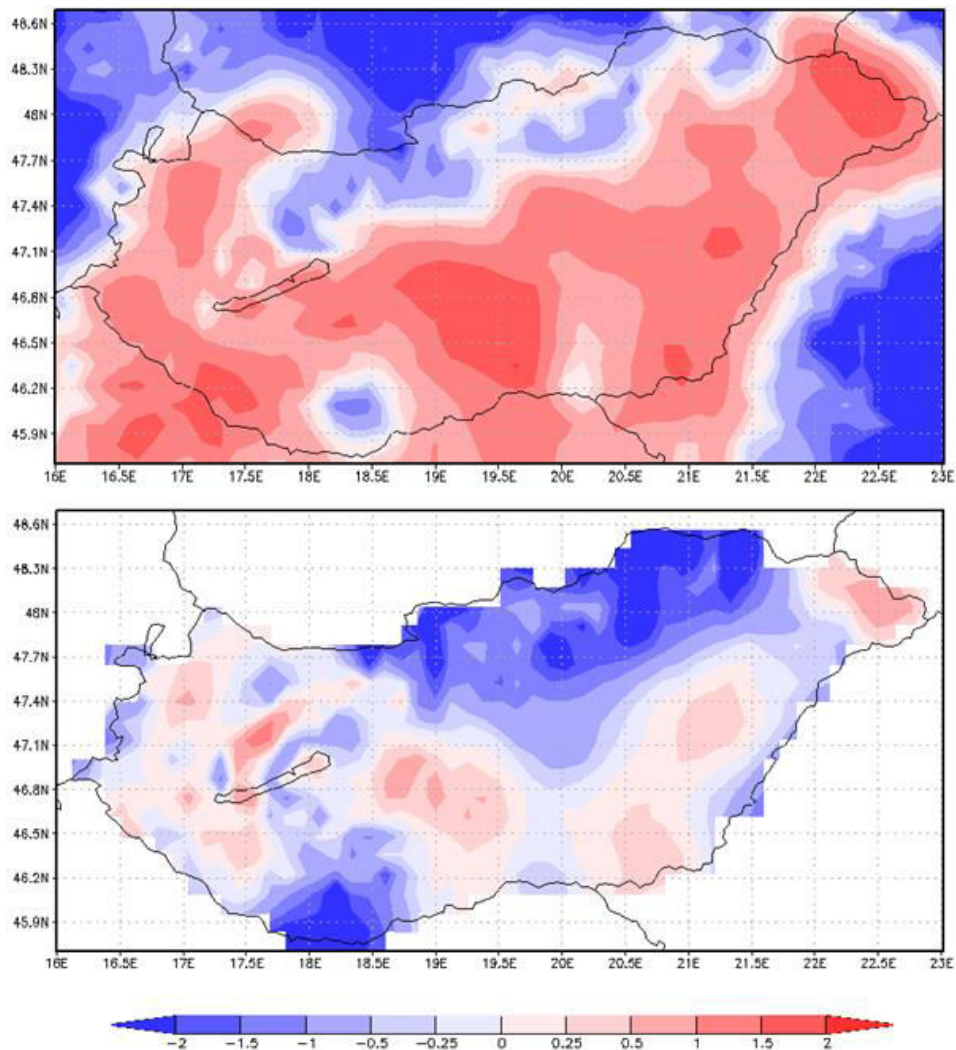
5. táblázat A modellek 10 m-es szélességének átlagos évszakos eltérései a mérési adatbázisoktól

10 m-es szélesség átlagos évszakos eltérései (m/s)									
Modell/Referencia	Tél		Tavaszi		Nyár		Ősz		
	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger	
ALADIN/HUGRID	0,8	0,1	0,4	-0,3	0,1	-0,4	0,4	-0,1	
ALADIN/CARPATCLIM	0,2	-0,4	-0,5	-1,3	-0,6	-1,1	-0,2	-0,9	
REMO/HUGRID	0,1	0,1	0,9	0,9	1,3	1,1	1,1	1,0	
REMO/CARPATCLIM	0,3	0,3	0,1	-0,1	0,7	0,4	0,5	0,2	

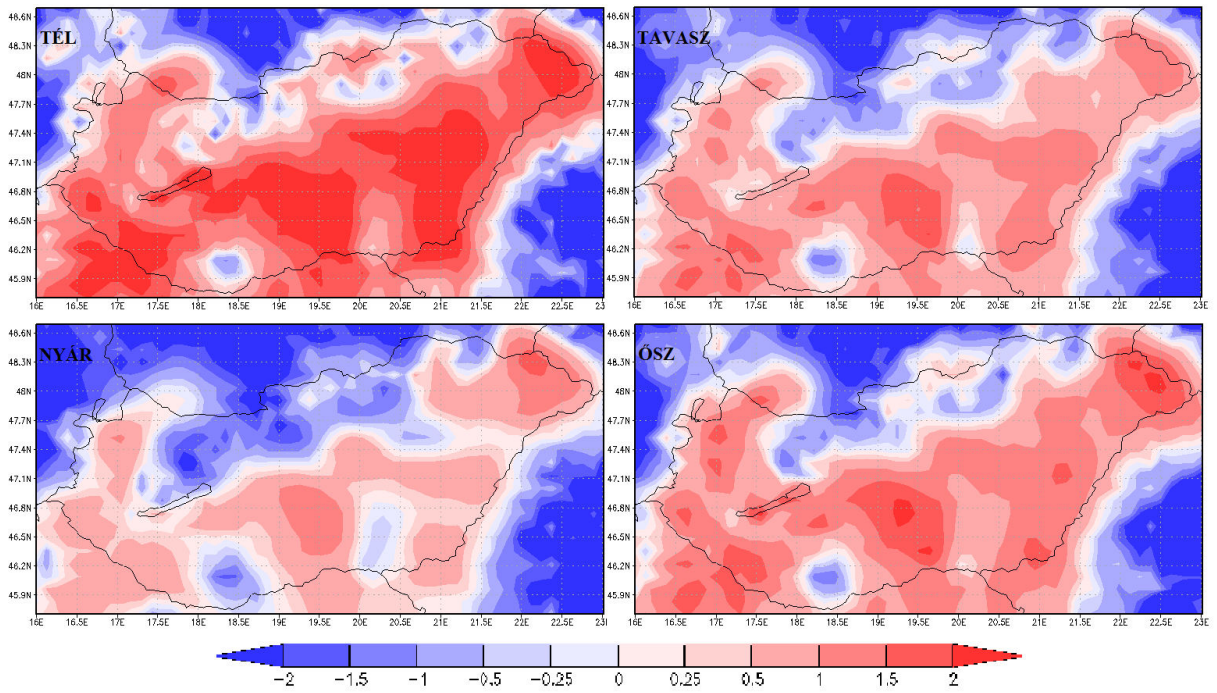
5.1.2. 100 m-es szélesség

A második validációval vizsgált elem a 100 m-es szélesség volt. Mivel a 100 m-es szélesség-mezőket a modellek illetve a mérési adatbázisok felszínre vonatkozó értékeiből állítottuk elő egyazon szélprofil alkalmazásával, ezért a validációs mezők térbeli és időbeli tendenciája nagy hasonlóságot mutat a felszíni esettel. A modelleredmények és a megfigyelési adatbázisok eltérése a 100 m-es szélességet illetően általánosságban magasabb volt, mint amit a felszíni szélességeknél tapasztaltunk, adódtak 2 m/s-ot jóval meghaladó értékek is. Az ALADIN esetében a hegyvonulatok még erőteljesebben, még nagyobb alulbecslést jelezve rajzolódtak ki a térképen, mint a felszíni szélességnél, és a

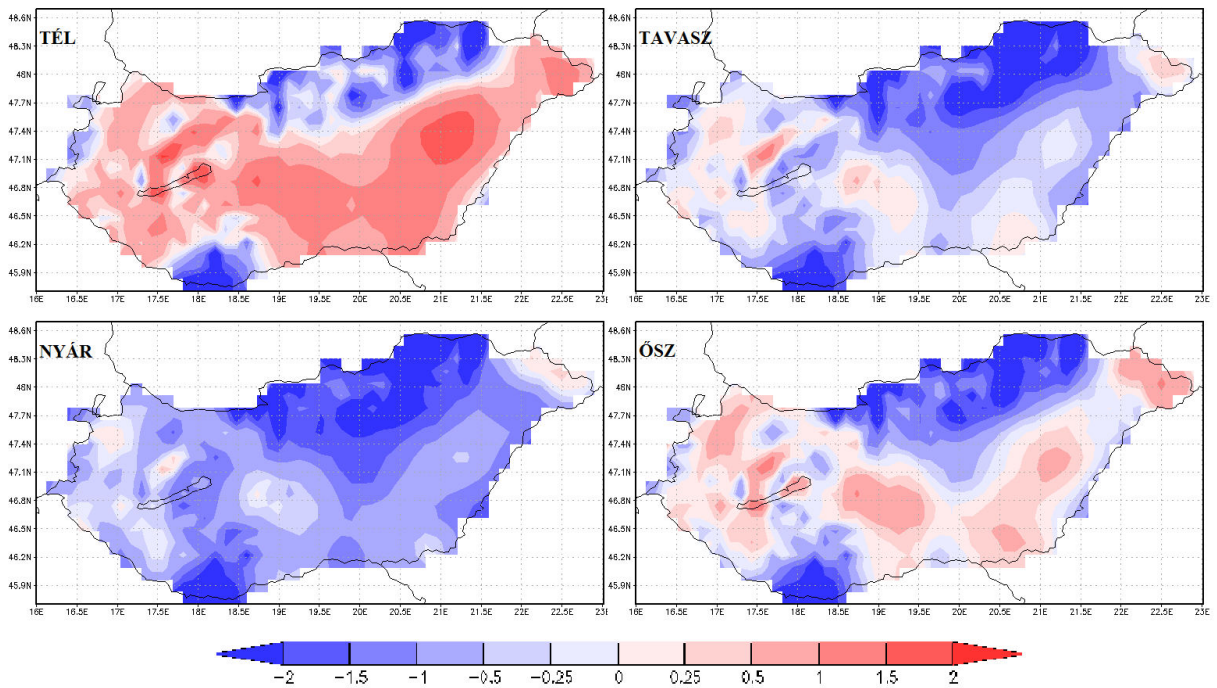
téli felülbecslés is erőteljesebb lett mind a HUGRID, mind a CARPATCLIM mérési adatbázis szerint (15. ábra). A HUGRID-dal végzett validáció itt is egész évben felülbecslést eredményezett, a maximumokat a Duna-Tisza-köze és a Tiszántúl déli részeire adva (16. ábra). A harminc éves periódus átlagos eltérése a HUGRID adataiból előállított magassági széltől: +0,7 m/s országos szinten és -0,4 m/s az egri régióban. A CARPATCLIM adatbázis szerint a modellre a 100 m-es szélsébség alulbecslése jellemző (a téli évszakot kivéve), az átlagos eltérés országos szinten -0,6 m/s és Eger környékén -1,7 m/s (17. ábra). Ahhoz, hogy az eltéréseket értelmezni tudjuk, megadjuk a modell 30 éves átlagos 100 m-es szélsébségének az országra vonatkozó területi átlagát, ami az ALADIN esetén 4,8 m/s. Az eltéréseket a 6. és 7. táblázatban foglaltuk össze.



15. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos éves szélsébségének validációja (m/s). Referencia adatbázisok: HUGRID (fent), CARPATCLIM (lent), referencia időszak: 1961-1990.

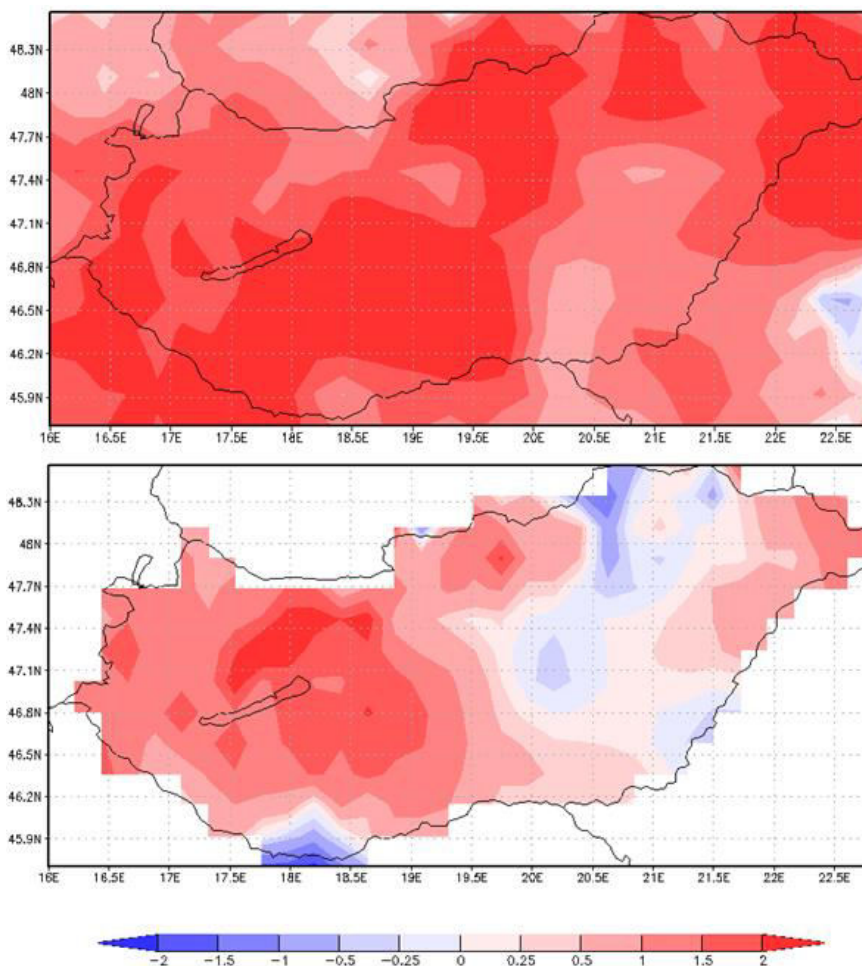


16. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos szezonális szélességének validációja (m/s).
Referencia adatbázis: HUGRID, referenciaidőszak: 1961-1990

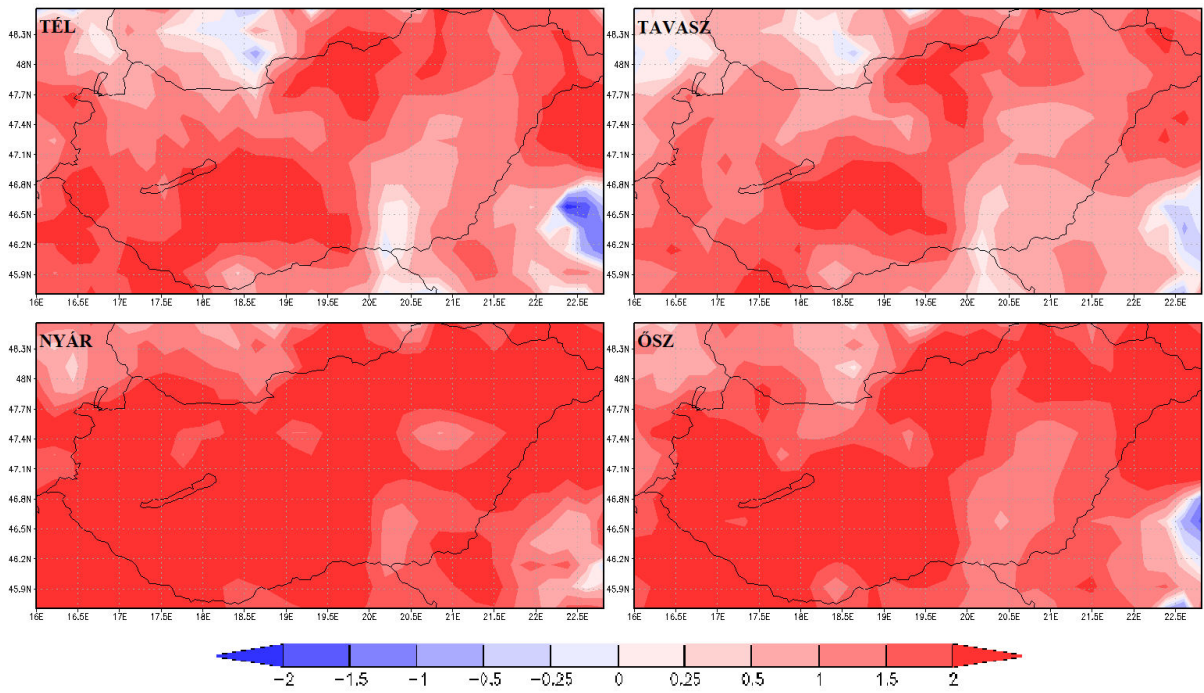


17. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos szezonális szélességének validációja (m/s).
Referencia adatbázis: CARPATCLIM, referenciaidőszak: 1961-1990

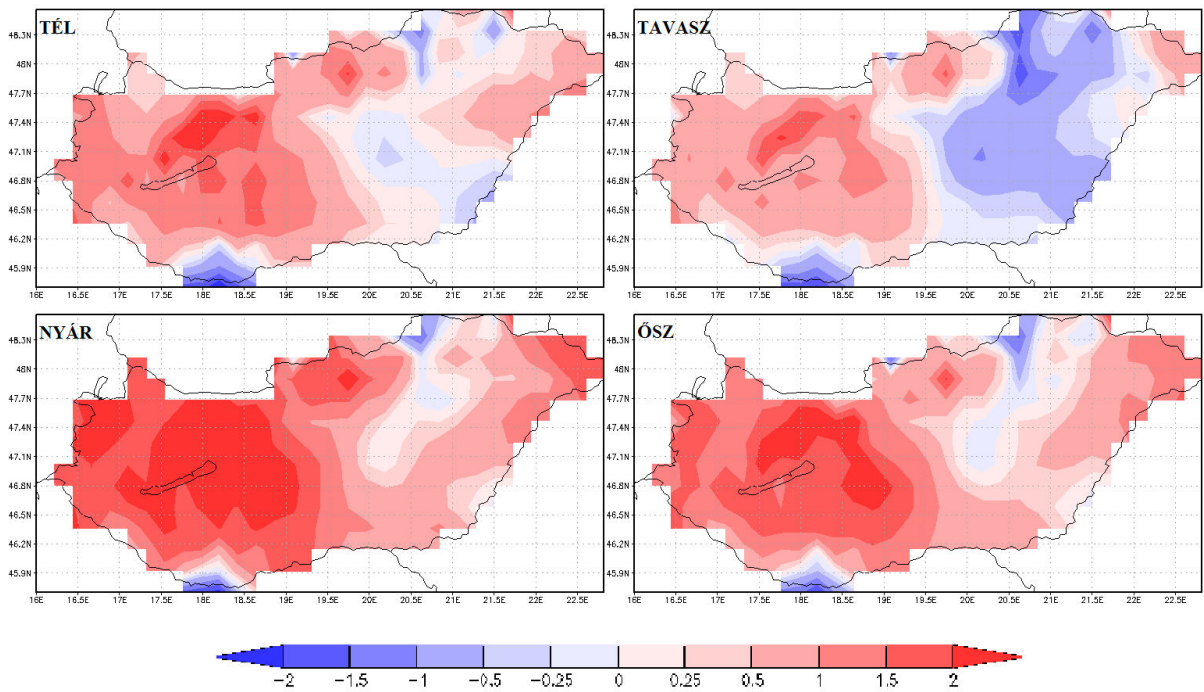
A REMO szimulációs adataiból előállított magassági szélmező ismét erőteljesebben eltért a referenciáktól, mint az ALADIN. A HUGRID adataihoz képest a REMO az egész év során felülbecsülte a 100 m-es szelet, különösen Magyarország középső területein, de a nyári időszakban már az egész országra az erős felülbecslés lett a jellemző (18. és 19. ábra). Az átlagos éves eltérés az egész országra vonatkozóan +1,9 m/s, illetve Egerre vonatkozóan +1,8 m/s. A CARPATCLIM adatait használva referenciaként a felülbecslések inkább az ország nyugati és északi területein voltak jellemzőek, és a tavaszi évszakban megjelent egy alulbecslés az ország keleti régiójában (20. ábra). Az átlagos eltérés Magyarországon +0,7 m/s, az egri régióban pedig +0,4 m/s volt (6. táblázat). Ahhoz, hogy az eltéréseket értelmezni tudjuk, megadjuk a modell 30 éves átlagos 100 m-es szélességének az országra vonatkozó területi átlagát, ami a REMO esetében 6,0 m/s.



18. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos éves szélességének validációja (m/s). Referencia adatbázisok: HUGRID (fent), CARPATCLIM (lent), referencia időszak: 1961-1990.



19. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos szezonális szélességének validációja (m/s).
Referencia adatbázis: HUGRID, referenciaidőszak: 1961-1990



20. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos szezonális szélességének validációja (m/s).
Referencia adatbázis: CARPATCLIM, referenciaidőszak: 1961-1990

6. táblázat A modellek 100 m-es szélességének átlagos éves eltérései a mérési adatbázisokból előállított adatoktól

100 m-es szélesség átlagos éves eltérései (m/s)		
Modell/Referencia	Éves	
	M.o.	Eger
ALADIN/HUGRID	0,7	-0,4
ALADIN/CARPATCLIM	-0,6	-1,7
REMO/HUGRID	1,9	1,8
REMO/CARPATCLIM	0,7	0,4

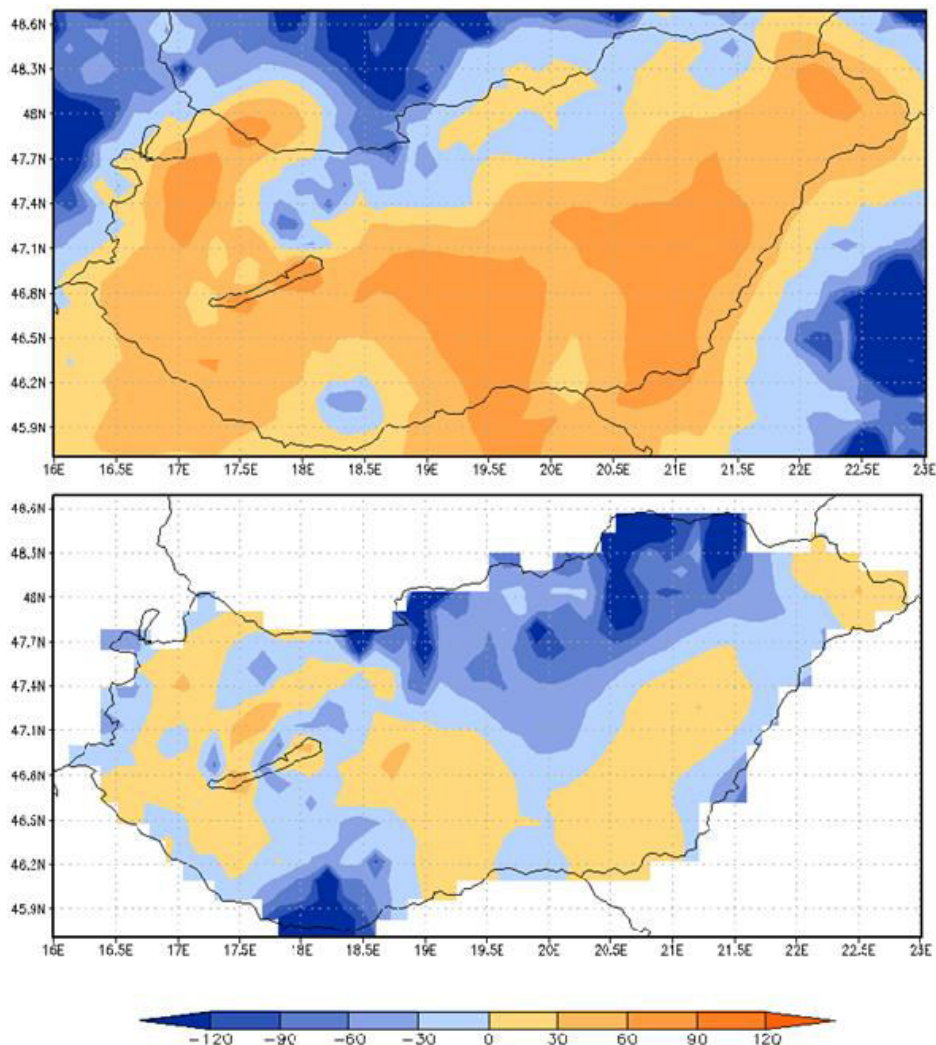
7. táblázat A modellek 100 m-es szélességének átlagos évszakos eltérései a mérési adatbázisokból előállított adatoktól

100 m-es szélesség átlagos évszakos eltérései (m/s)								
Modell/Referencia	Tél		Tavaszi		Nyár		Ősz	
	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger
ALADIN/HUGRID	1,3	0,2	0,6	-0,5	0,1	-0,9	0,8	-0,2
ALADIN/CARPATCLIM	0,2	-0,8	-0,8	-2,1	-1,2	-2,3	-0,4	-1,8
REMO/HUGRID	1,6	1,6	1,5	1,5	2,5	2,2	2,0	1,9
REMO/CARPATCLIM	0,6	0,6	0,1	-1,2	1,2	0,8	0,9	0,4

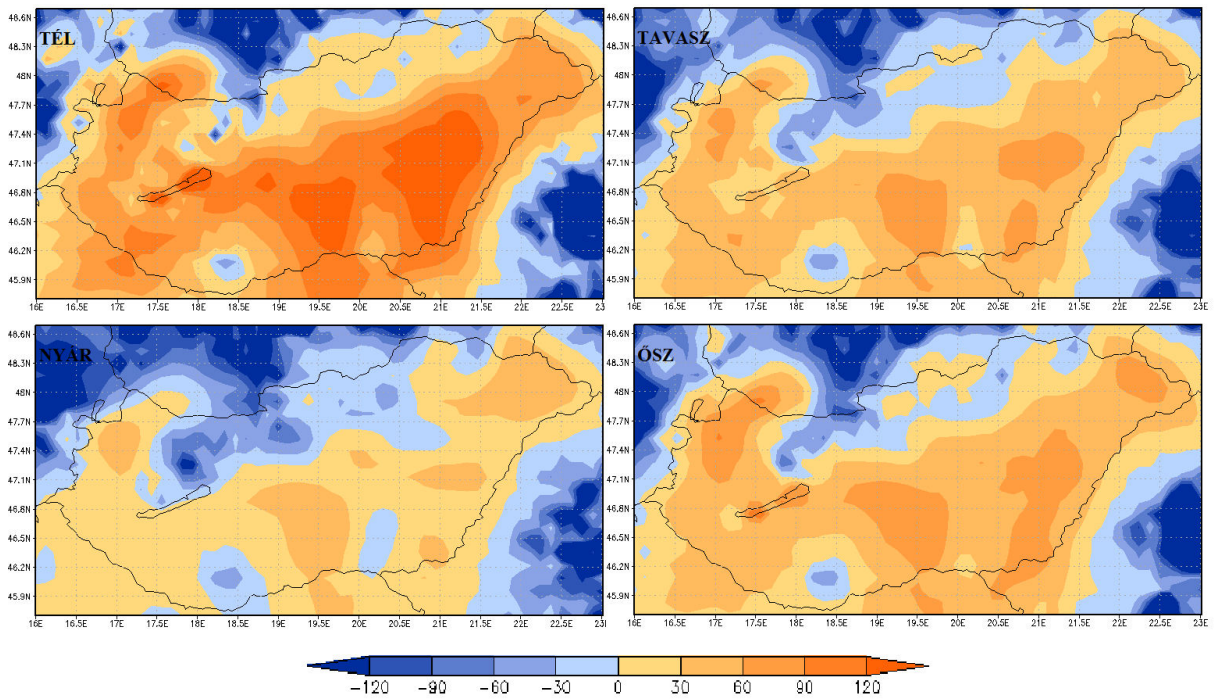
5.1.3. Energiasűrűség

A harmadik validált mennyiség a levegő 100 m-en vett energiasűrűsége. Az energiasűrűséget a (20) összefüggés szerint állítottuk elő a 100 m-es szélességmezőkből konstans sűrűség mellett. Ez az egyszerűsítés, továbbá, hogy az energiasűrűség a sebesség harmadik hatványával arányos, sajnálatos módon nagy mértékben megnövelte a mérési és a szimulációs adatokból számolt energiasűrűségek közötti differenciát. Az eddigiekkel megszokott módon az ALADIN eredményeit a HUGRID adataiból előállított értékekkel validálva az ország döntő többségében felülbecslést tapasztaltunk, a hegységekben, különösképp a Balaton-felvidéken, az Északi-középhegységben illetve a Mecsek és a Villányi-hegység közelében pedig alulbecslést (21. és 22. ábra). Az ország területére számított átlagos éves eltérés $+35 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$, Eger környékére pedig $-17 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$.

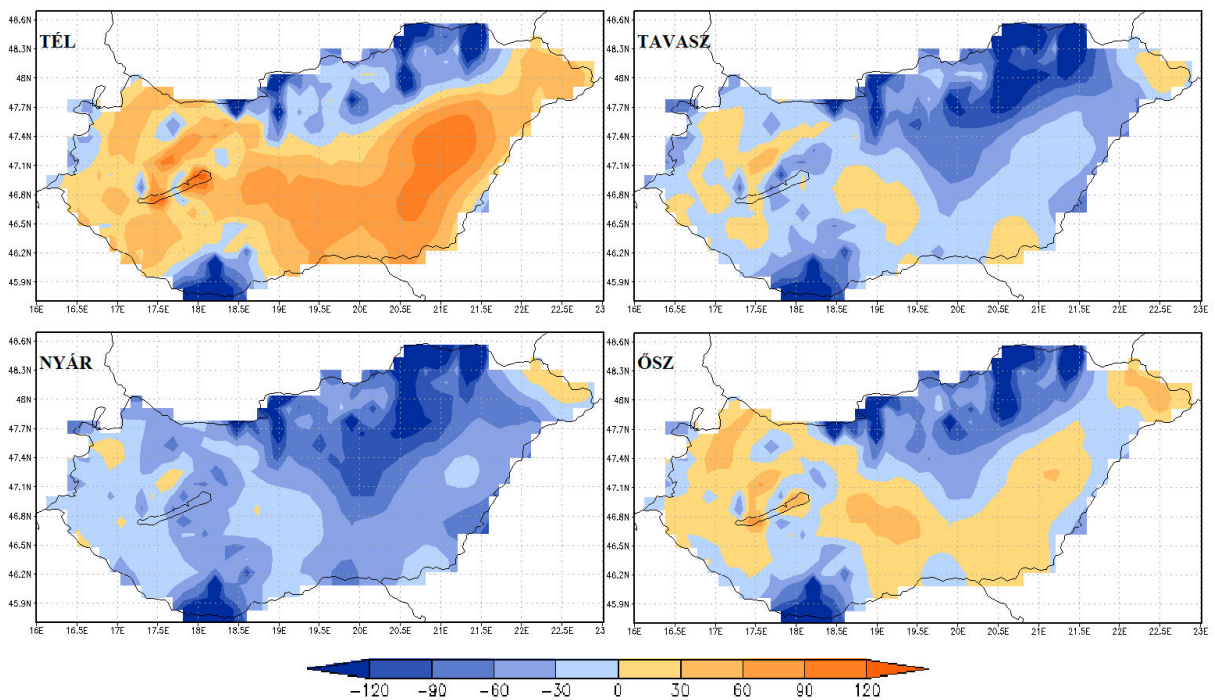
Abban az esetben, amikor a CARPATCLIM mérési adataiból előállított energiasűrűséggel validáltuk az ALADIN eredményeit, ismét döntően alulbecslést, illetve a téli hónapban felülbecslést tapasztaltunk. Az Északi-középhegység vonulatai és az ország legdélebbi része erőteljes alulbecslésként jelentek meg a térképeken mind a négy évszakban (23. ábra). A CARPATCLIM adatbázissal végzett validáció szerint az éves átlagos eltérés az ország területén $-28 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$, az egri területen $-78 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ volt. Ahhoz, hogy az eltéréseket értelmezni tudjuk, megadjuk a modell 30 éves átlagos 100 m-es energiasűrűségének az országra vonatkozó területi átlagát, ami az ALADIN esetében $83 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$. Az átlagos eltérések a 8. és a 9. táblázatban vannak összefoglalva.



21. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos éves energiasűrűségének validációja ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$). Referencia adatbázisok: HUGRID (fent), CARPATCLIM (lent), referencia időszak: 1961-1990.

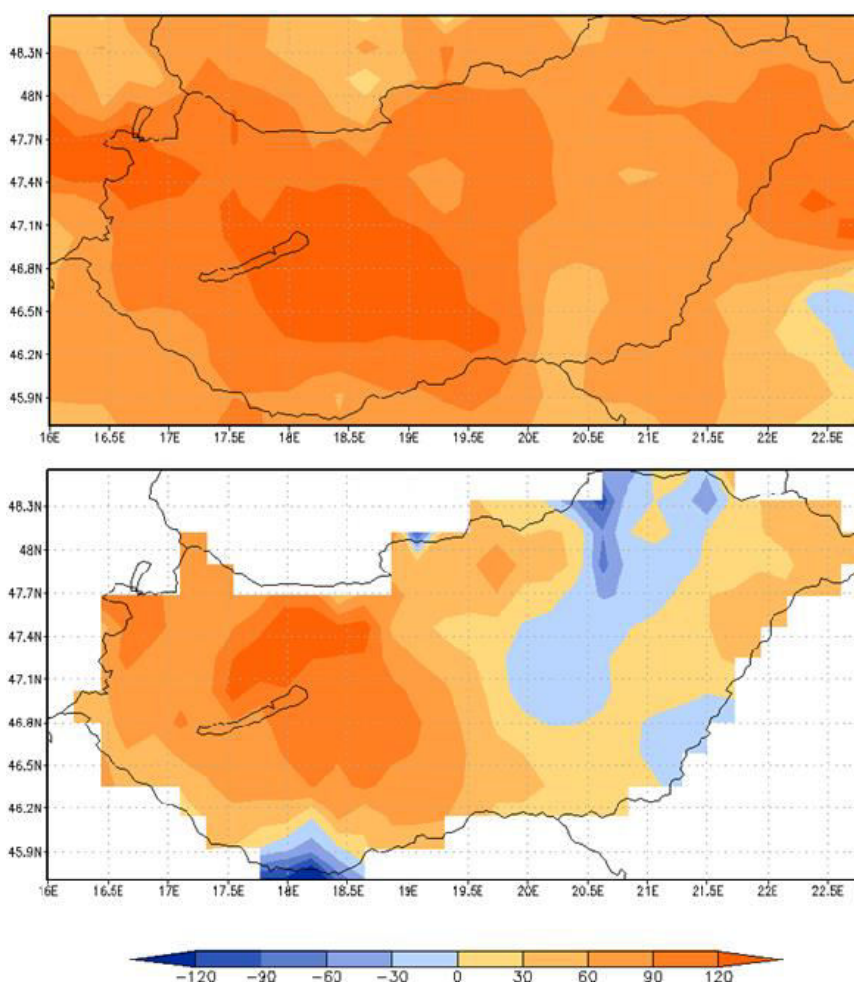


22. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos szezonális energiasűrűségének validációja ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$).
Referencia adatbázis: HUGRID, referencia időszak: 1961-1990.

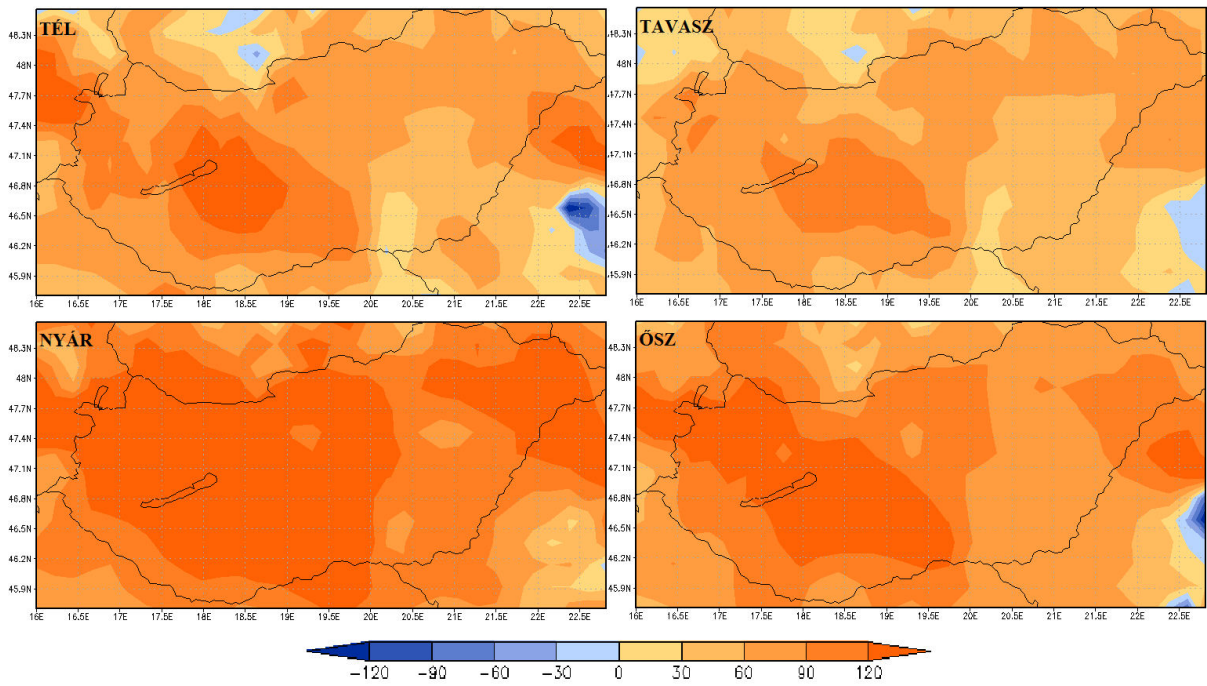


23. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos szezonális energiasűrűségének validációja ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$).
Referencia adatbázis: CARPATCLIM, referencia időszak: 1961-1990.

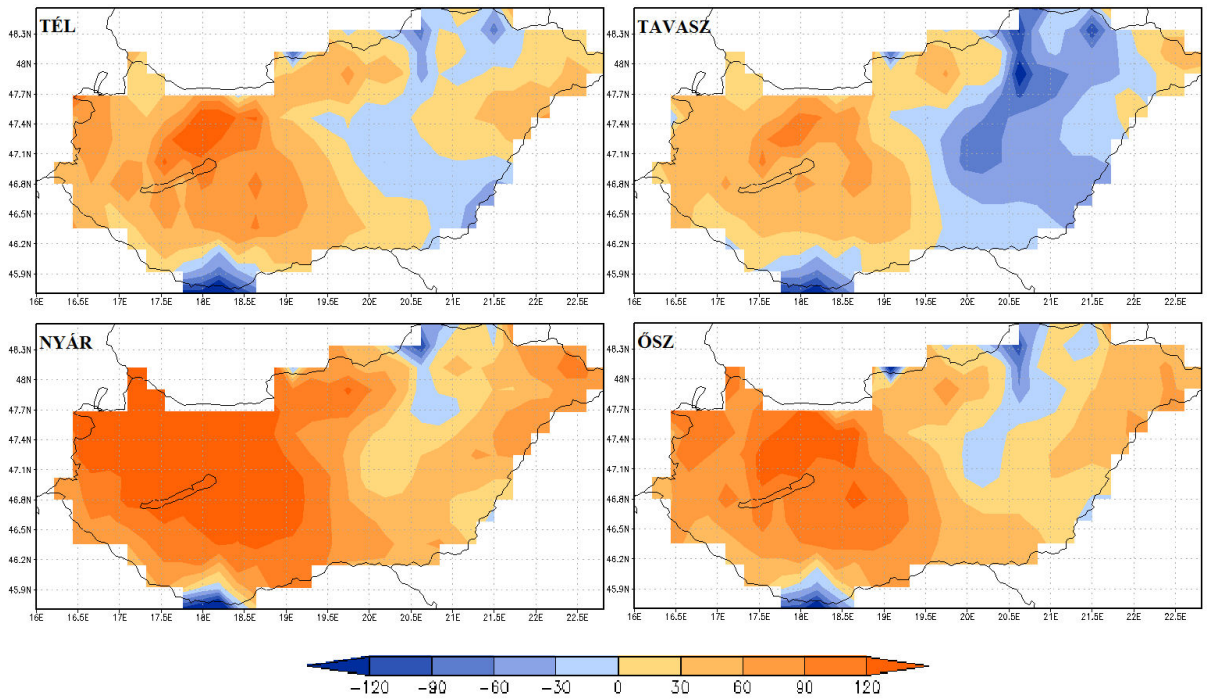
A REMO validációs eredményei ismét valamivel nagyobb átlagos eltéréseket adtak, a HUGRID adatai szerint a modell minden évszakban erőteljesen felülbecsülte az energiasűrűséget. Az eltérés maximumai az ország nyugati, középső felére estek (24. és 25. ábra). Az átlagos eltérések a teljes országra $+98 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ -ot, Egerre pedig $+83 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ -ot adtak. A CARPATCLIM adataival végzett validációban már minden évszakban megjelent egy gyenge alulbecslés az ország keleti, északkeleti régiójában, amely tavasszal volt a legerőteljesebb. Ezen kívül a Villányi-hegység körüli terület az ALADIN-hoz hasonlóan az összes évszak során határozott negatív értékűként jelent meg a térképeken (26. ábra). Az átlagos éves eltérés értékei az országra vonatkozóan $+39 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$, az egri régióra $18 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$. Ahhoz, hogy az eltéréseket értelmezni tudjuk, megadjuk a modell 30 éves átlagos 100 m-es energiasűrűségének az országra vonatkozó területi átlagát, ami a REMO esetében $144 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$. Az átlagos eltérések a 8. és a 9. táblázatban vannak összefoglalva.



24. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos éves energiasűrűségének validációja ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$). Referencia adatbázisok: HUGRID (fent), CARPATCLIM (lent), referencia időszak: 1961-1990.



25. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos szezonális energiasűrűségének validációja ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$).
Referencia adatbázis: HUGRID, referencia időszak: 1961-1990.



26. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos szezonális energiasűrűségének validációja ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$).
Referencia adatbázis: CARPATCLIM, referencia időszak: 1961-1990.

8. táblázat A modellek 100 m-es energiasűrűségének átlagos éves eltérései a mérési adatbázisokból előállított adatoktól

100 m-es energiasűrűség átlagos éves eltérései ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$)		
Modell/Referencia	Éves	
	M.o.	Eger
ALADIN/HUGRID	35	-17
ALADIN/CARPATCLIM	-28	-78
REMO/HUGRID	98	83
REMO/CARPATCLIM	39	18

9. táblázat A modellek 100 m-es szélességének átlagos évszakos eltérései a mérési adatbázisokból előállított adatoktól

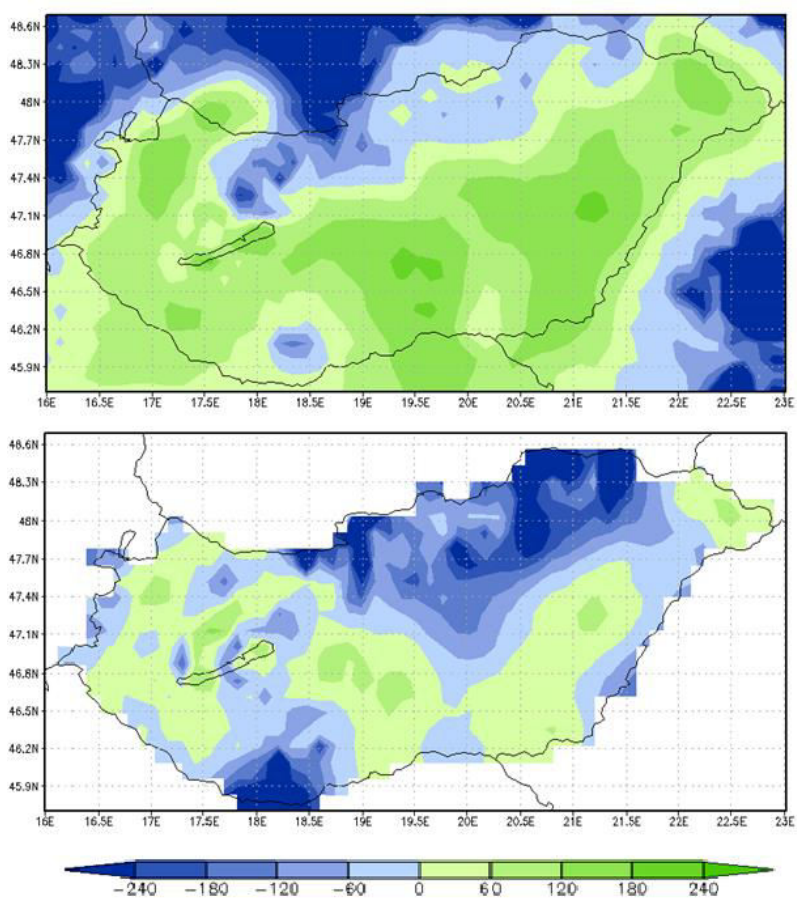
100 m-es energiasűrűség átlagos évszakos eltérései ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$)								
Modell/Referencia	Tél		Tavaszi		Nyár		Ősz	
	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger
ALADIN/HUGRID	69	12	29	-10	7	-23	35	-2
ALADIN/CARPATCLIM	12	-37	-44	-98	-57	-99	-24	-79
REMO/HUGRID	81	68	70	64	138	115	104	86
REMO/CARPATCLIM	27	21	2	-15	77	48	49	17

5.1.4. Potenciális teljesítmény

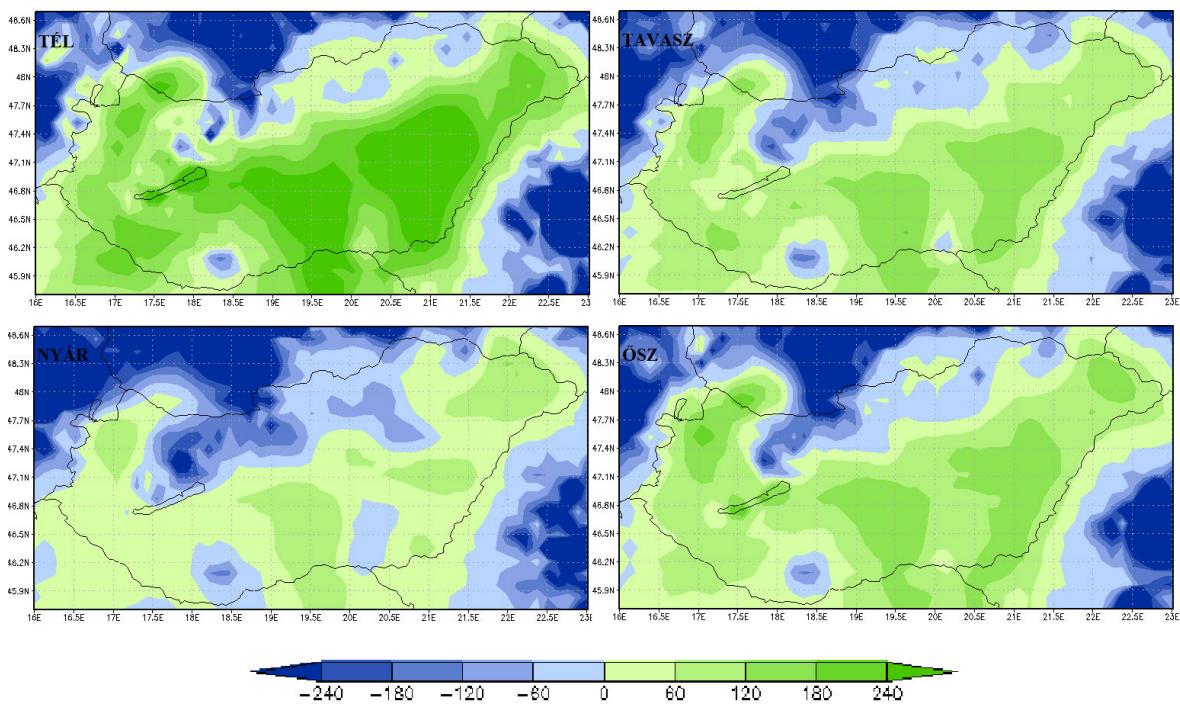
Az utolsó validációval vizsgált elem a potenciális teljesítmény. A potenciális teljesítményt a 100 m-es szélesség-mezők és a teljesítménygörbék felhasználásával állítottuk elő. Az átlagos eltérések relatív értelemben a potenciális teljesítmény validációja során lettek a legnagyobbak. Az energiasűrűséghez hasonlóan a teljesítmény is a szélességnek a harmadik hatványával arányos, ezért 1-2 m/s sebességbeli eltérés már számottevő különbséget generál a mérési és a modelladatokból számított teljesítmény értékei között. Bár a dolgozatban nem a (6) összefüggés szerint számoltuk a teljesítményt, hanem, mint említettük a teljesítménygörbék által megadott értékekkel dolgoztunk, azonban a köbös összefüggés okozta érzékenység a görbék alakjában is jól láthatóan megjelenik. Az alacsony, 5-10 m/s-os szélességeknél a görbe meredeksége igen magas (a teljesítménygörbét a 8. ábrán láthatjuk), tehát a szélesség kis megváltozása nagy

változást okoz a turbina által leadott teljesítményben. Mivel hazánk átlagos szélessége 100 m-es magasságban többnyire ebbe a tartományba esik, így érthető, hogy a validáció során nagy átlagos eltéréseket kaptunk.

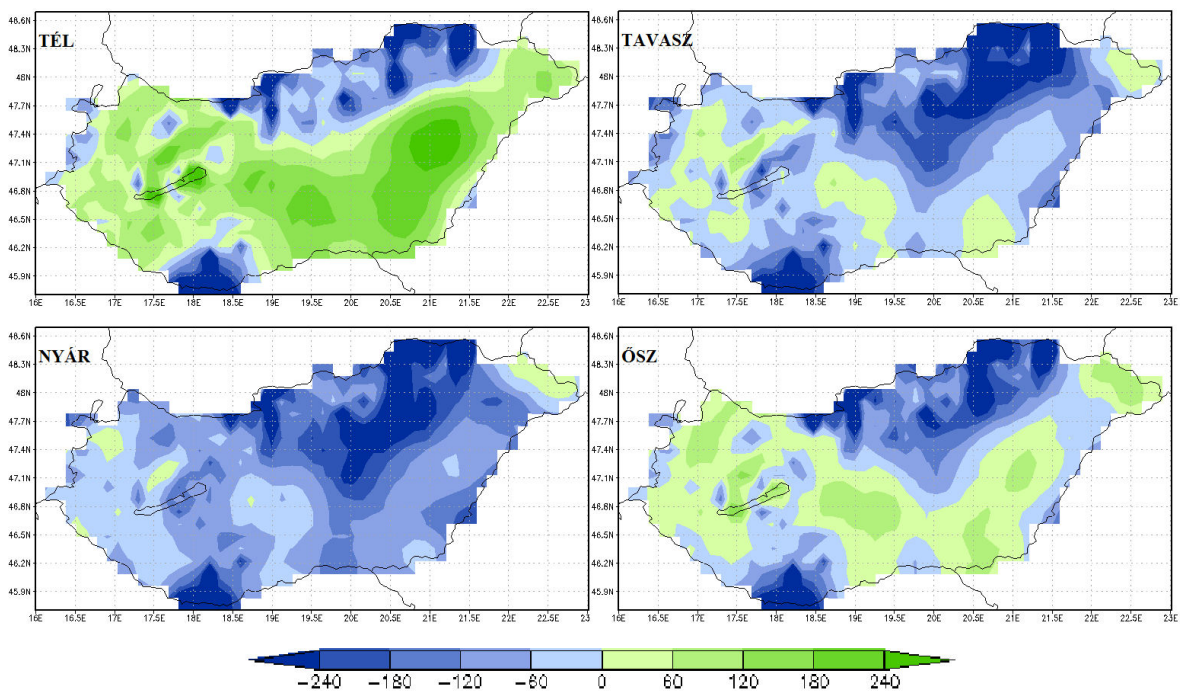
A finomabb felbontású ALADIN modell a potenciális teljesítmény terén is jobban illeszkedett a mérési adatokból előállított teljesítményhez, mint a REMO. A HUGRID adatival való validálás során az ország nagyobb részén felülbecslést, az Északi-középhegység területén pedig alulbecslést tapasztaltunk. A legerősebb felülbecslés a téli évszakra esett a Duna-Tisza köze és a Tiszántúl középső, illetve déli részeire (27. ábra). Az átlagos éves eltérés az ország területén +68 kW-nak, Eger környékén pedig -22 kW-nak adódott. A CARPATCLIM mérési adatsorral való validáció eltérő eredményt adott, ebben az esetben a modell alulbecslése dominált a téli és az őszi évszakot kivéve. A legerősebb alulbecslés a nyári időszakokra esett (28. és 29. ábra). Az átlagos éves eltérés az ország területén -59 kW, az egeri régióban pedig -183 kW (10. táblázat). Az ALADIN modell 30 éves átlagos potenciális teljesítményének az országra vonatkozó területi átlaga: 154 kW.



27. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos éves potenciális teljesítményének validációja (kW). Referencia adatbázisok: HUGRID (fent), CARPATCLIM (lent), referencia időszak: 1961-1990.

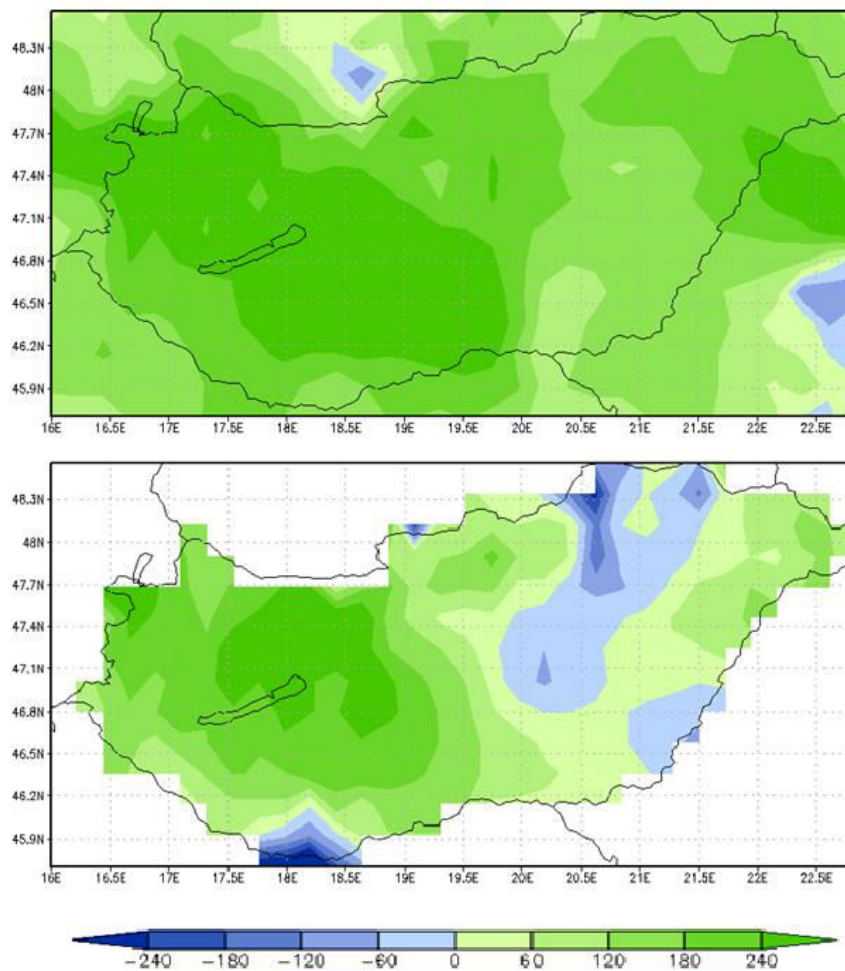


28. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos szezonális potenciális teljesítményének validációja (kW). Referencia adatbázis: HUGRID, referencia időszak: 1961-1990.

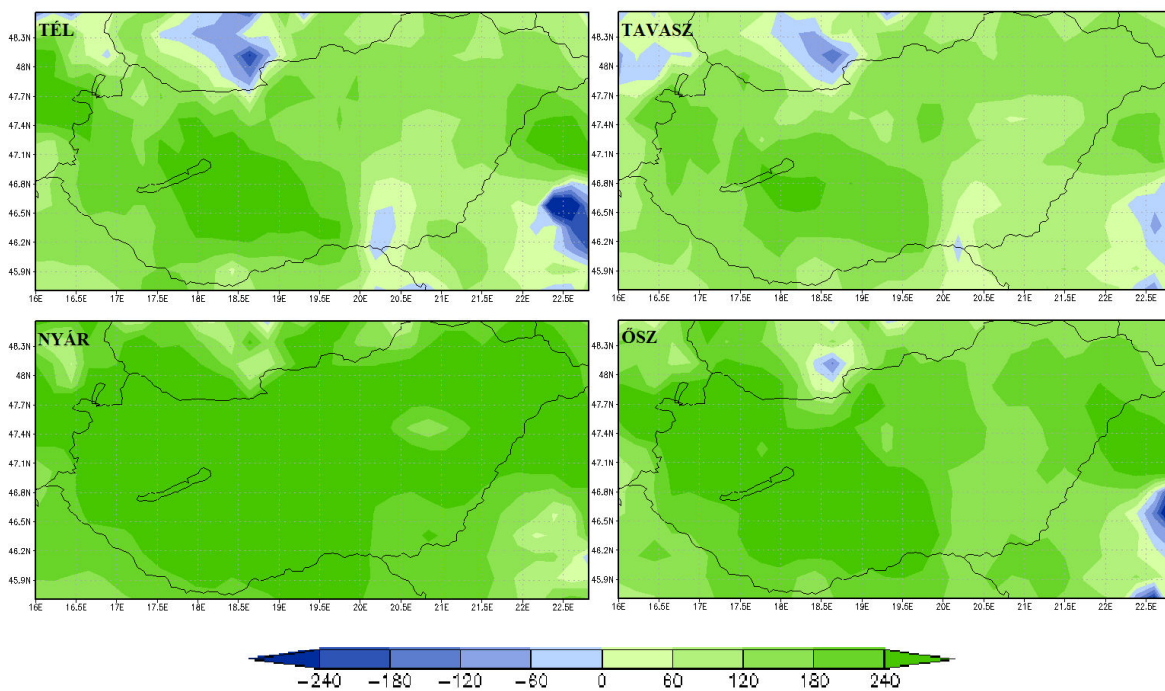


29. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos szezonális potenciális teljesítményének validációja (kW). Referencia adatbázis: CARPATCLIM, referencia időszak: 1961-1990.

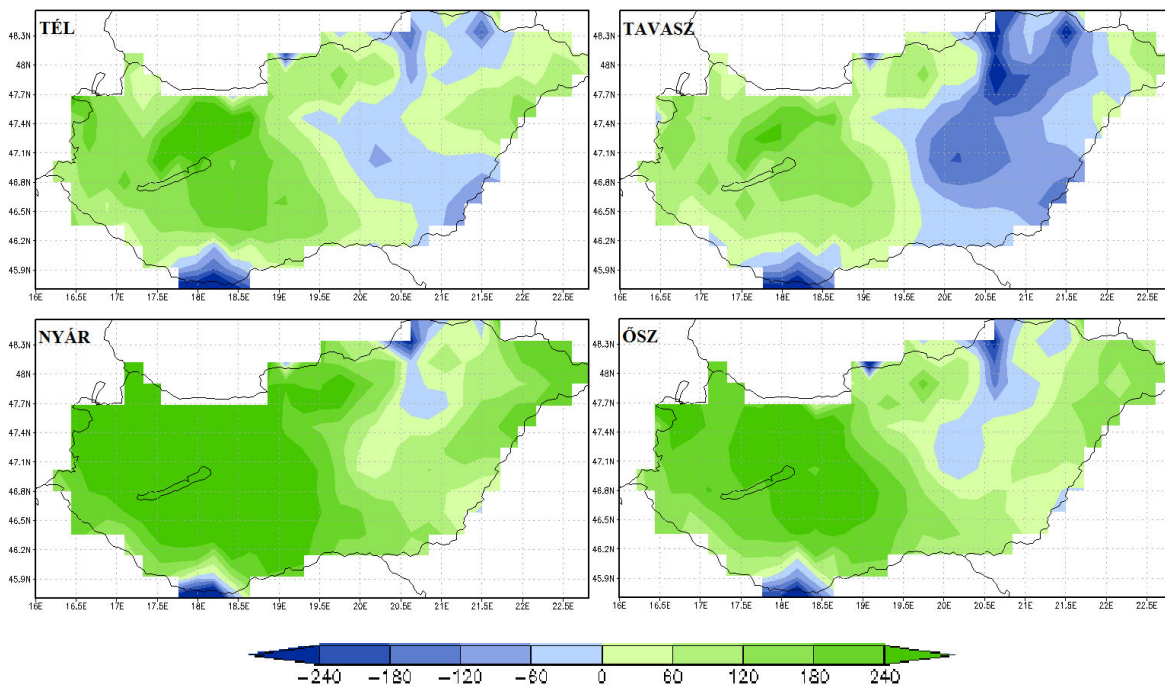
A REMO szimulációs eredményeit a HUGRID adatbázisból előállított teljesítménnyel összehasonlítva azt tapasztaltuk, hogy a modell mind a négy évszakban felülbecsli a potenciális teljesítményt. Az eltérések maximumát nyáron és ősszel láthatjuk az ország északnyugati részén, illetve a Dunántúli déli területein (30. ábra). A nyári évszakban a modell egész Magyarország területén erősen felülbecsülte a potenciális teljesítményt (31. ábra). Az átlagos éves eltérés az ország területén: +219 kW, Eger térségében pedig +183 kW. A CARPATCLIM adataival történő validáció változatosabb képet adott. Az ország nyugati felében ebben az esetben is a modell felülbecslése volt a jellemző, de a keleti országrészben télen, és kiváltképp tavasszal jelentős alulbecslést adott a validáció (32. ábra). Az átlagos éves eltérés az ország területén: 105 kW, Eger térségében pedig 39 kW. A REMO modell 30 éves átlagos potenciális teljesítményének az országra vonatkozó területi átlaga: 299 kW. Az átlagos eltérések a 10. és a 11. táblázatban vannak összefoglalva.



30. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos éves potenciális teljesítményének validációja (kW). Referencia adatbázisok: HUGRID (fent), CARPATCLIM (lent), referencia időszak: 1961-1990.



31. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos szezonális potenciális teljesítményének validációja (kW). Referencia adatbázis: HUGRID, referencia időszak: 1961-1990.



32. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos szezonális potenciális teljesítményének validációja (kW). Referencia adatbázis: CARPATCLIM, referencia időszak: 1961-1990.

10. táblázat A modellek 100 m-es potenciális teljesítményének átlagos éves eltérései a mérési adatbázisokból előállított adatoktól

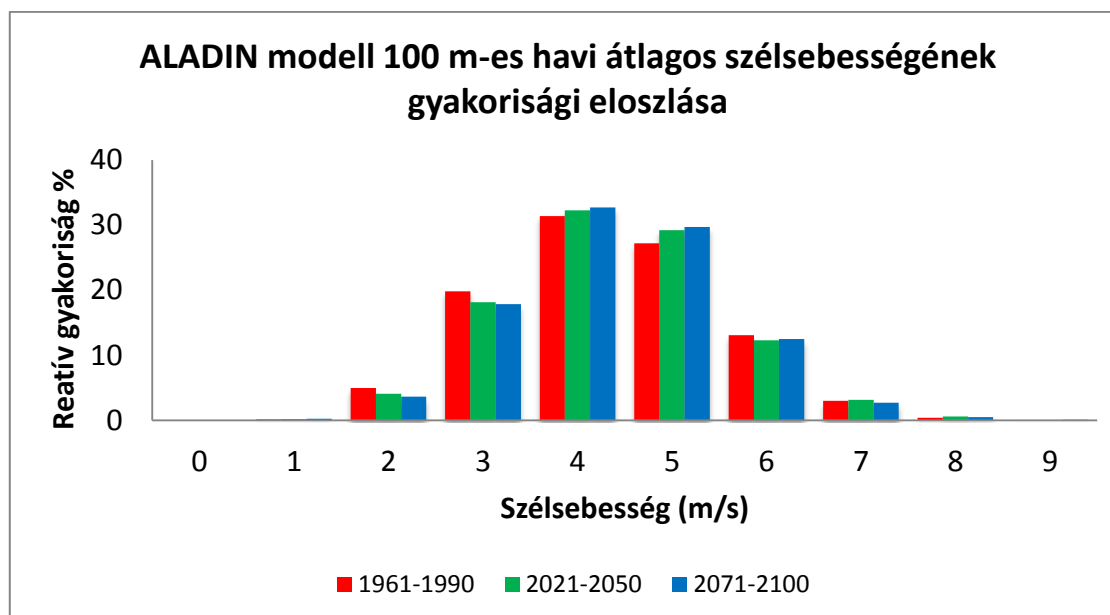
100 m-es potenciális teljesítmény átlagos éves eltérései (kW)		
Modell/Referencia	Éves	
	M.o.	Eger
ALADIN/HUGRID	68	-22
ALADIN/CARPATCLIM	-59	-183
REMO/HUGRID	219	183
REMO/CARPATCLIM	105	39

11. táblázat A modellek 100 m-es potenciális teljesítményének átlagos évszakos eltérései a mérési adatbázisokból előállított adatoktól

100 m-es potenciális teljesítmény átlagos évszakos eltérései (kW)								
Modell/Referencia	Tél		Tavaszi		Nyár		Ősz	
	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger
ALADIN/HUGRID	144	14	57	-26	5	-62	66	-12
ALADIN/CARPATCLIM	43	-87	-100	-229	-130	-231	-48	-185
REMO/HUGRID	170	141	152	140	323	262	231	188
REMO/CARPATCLIM	75	45	8	-41	206	117	129	36

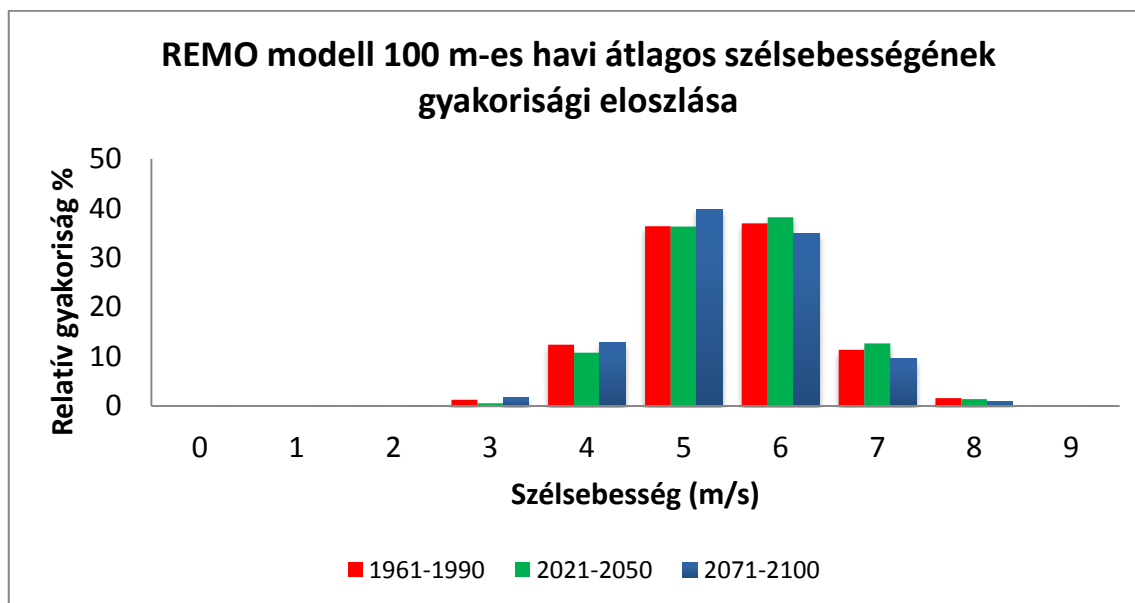
5.2. Projekciók

A dolgozatban két éghajlati normálidőszakra, a 2021-2050-ig, illetve a 2071-2100-ig tartó periódusokra vonatkozó projekciókat vizsgáltuk mindkét éghajlati modell esetén. A projekciós eredmények tárgyalásánál nem az egyes szélklimatológiai elemek konkrét szimulált jövőbeli értékét mutatjuk be, hanem azoknak a várható megváltozását. A vizsgálat során előállítottuk az elemek átlagos megváltozását az 1961-1990-es időszakhoz képest, illetve ezekből a mezőkből területi átlagolással meghatároztuk a teljes országra és az Eger környéki régióra vonatkozó átlagos megváltozások értékét is, éves évszakos és havi szinten. Tehát minden esetben az adott modell jövőre vonatkozó projekciójából vontuk ki a múltira (1961-1990-es referencia-időszakra) vonatkozó szimuláció eredményét, így kiküszöbölve a modell szisztematikus hibáit. Az energiasűrűséget és a potenciális teljesítményt is a 100 m-es szélességből számítottuk ki a korábban már bemutatott módon, ezért annak érdekében, hogy képet kapjunk az eltérések relatív mértékéről, előállítottuk a 100 m-es szélességek gyakorisági eloszlását mindkét modell mindhárom vizsgált időszakára (havi szimulációs adatok alapján). Az ALADIN modell szerint a 4m/s alatti szélességek gyakorisága az 1961-1990-es időszakhoz képest várhatóan csökkenni, a 4-6 m/s közötti értékek relatív gyakorisága pedig növekedni fog mindkét projekciós időszakban (33. ábra).



33. ábra Az ALADIN modell havi átlagos 100 m-es szélességeinek gyakorisági eloszlása a három vizsgált időszakban.

A REMO modellszimuláció szerint az alacsony szélsőségek gyakorisága a 2021-2050-es időszakban kisebb, a magasabb értékeké (6-8 m/s) pedig nagyobb lehet, mint az 1961-1990-es időszakban. A század végére vonatkozó projekciók értelmében a köztes, 4-5 m/s-os szélsőségek relatív gyakorisága növekedhet a referencia időszakhoz képest (34. ábra).

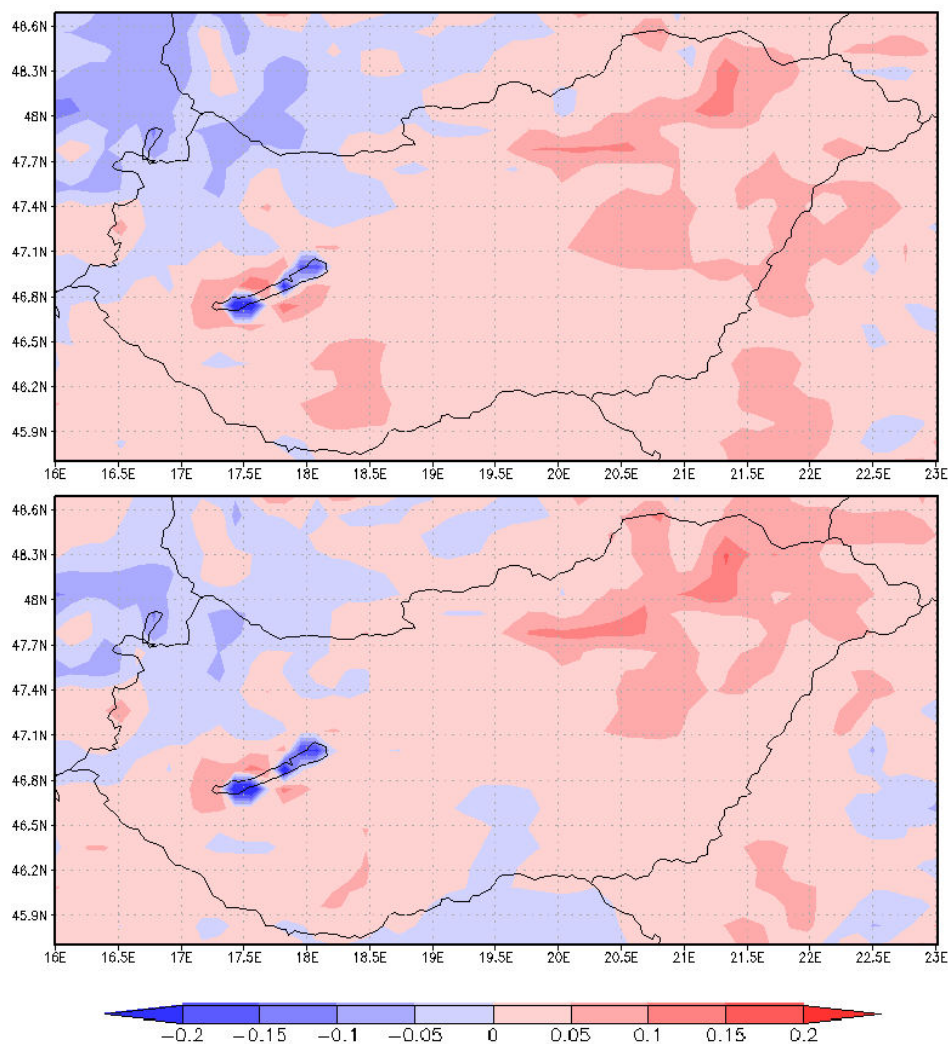


34. ábra A REMO modell havi átlagos 100 m-es szélsőségeinek gyakorisági eloszlása a három vizsgált időszakban.

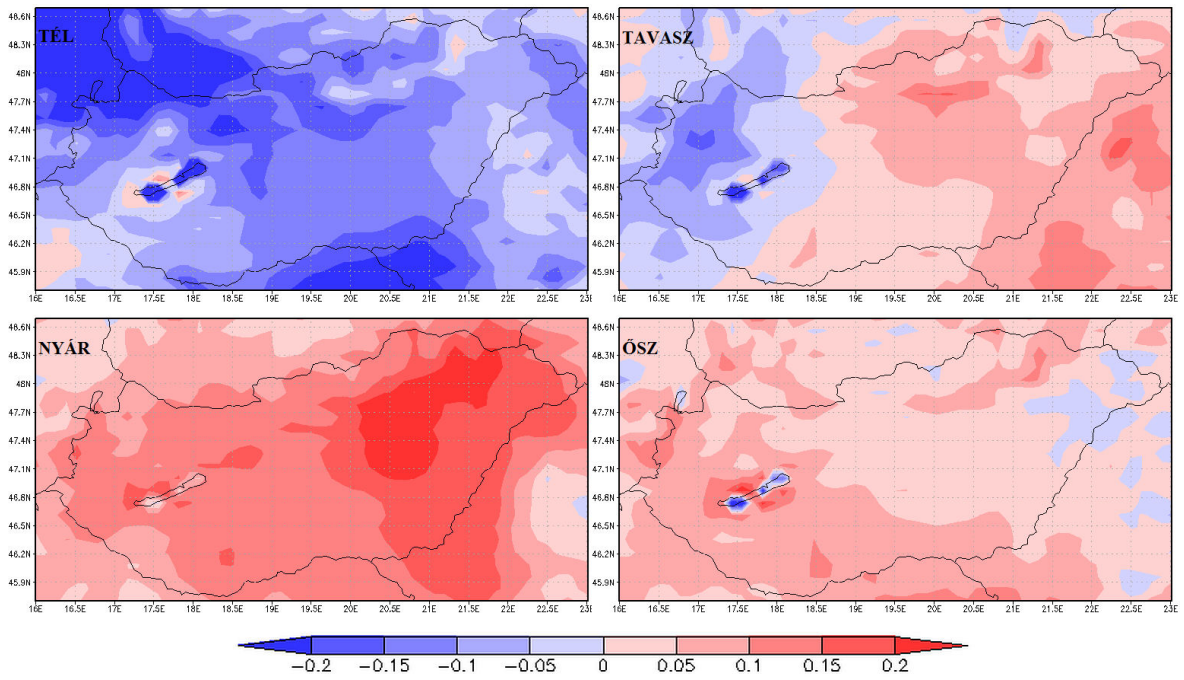
5.2.1. 10 m-es szélsőség

Az ALADIN modell jövőre vonatkozó projekciói mind a 2021-2050-es, mind a 2071-2100-as periódusra az átlagos éves 10 m-es szélsőség enyhe növekedését adták eredményül, melynek maximuma az ország északkeleti részére esett. Magyarország legszelesebb, északnyugati részére egy ezzel ellentétes, és valamivel gyengébb csökkenő tendenciát eredményezett a szimuláció (35. ábra). Hozzá kell tennünk, hogy a változások jellemzően század m/s nagyságrendűek, így kérdéses, hogy mennyire tekinthetők szignifikánsnak. Évszakos szinten a változások már nem mutatnak ennyire egységes képet. Az ALADIN modell a 2021-2050-es időszakban nyáron és ősszel a szélsőség növekedését, télen csökkenését, tavasszal pedig a Dunántúlon csökkenést, a többi területen

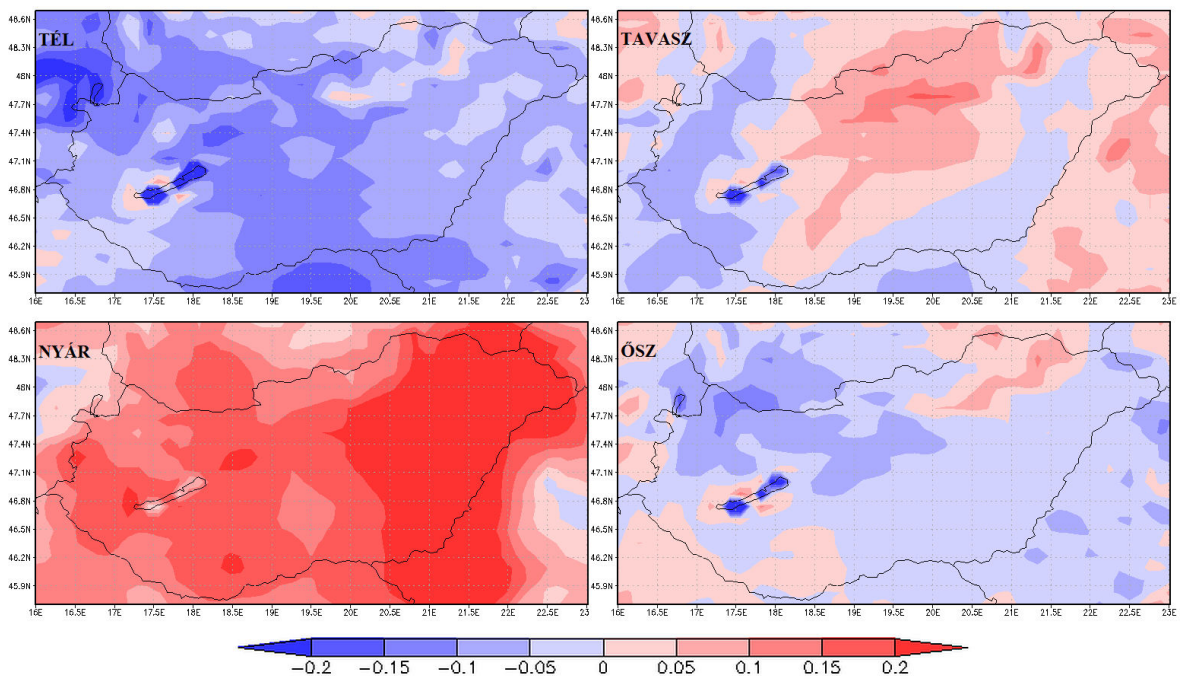
növekedést szimulált. A 2071-2100-as időintervallumra a nyári növekedés erősödött, a téli csökkenés gyengült, de az őszi évszak során a korábbival ellentétben már a csökkenő tendencia lett a hangsúlyosabb (36. és 37. ábra). Az átlagos éves megváltozások területi átlaga az országra vonatkozóan mindkét időintervallumra $+0,03$ m/s (tehát összességében a 21. században nem várható lényeges változás), Egerre vonatkozóan pedig valamivel magasabb, $+0,07$ m/s lett (12. táblázat). Érdeemes még megemlítenünk, hogy a Balaton térségében a nyári évszakot kivéve mindkét projekciós időszakban a szélesebbesség jelentős csökkenését szimulálta a modell.



35. ábra Az ALADIN modell 10 m-es átlagos éves szélesebbességének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (fent) és a 2071-2100-as időszakra (lent) (m/s). Referencia időszak: 1961-1990

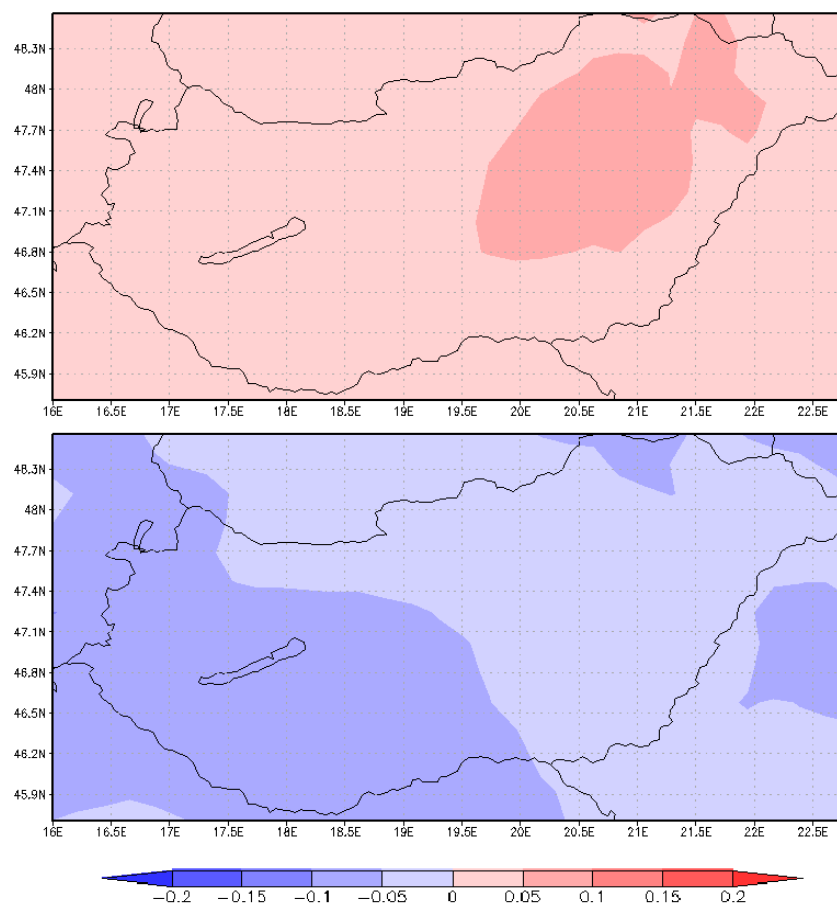


36. ábra Az ALADIN modell 10 m-es átlagos évszakos szélességének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (m/s). Referencia időszak: 1961-1990



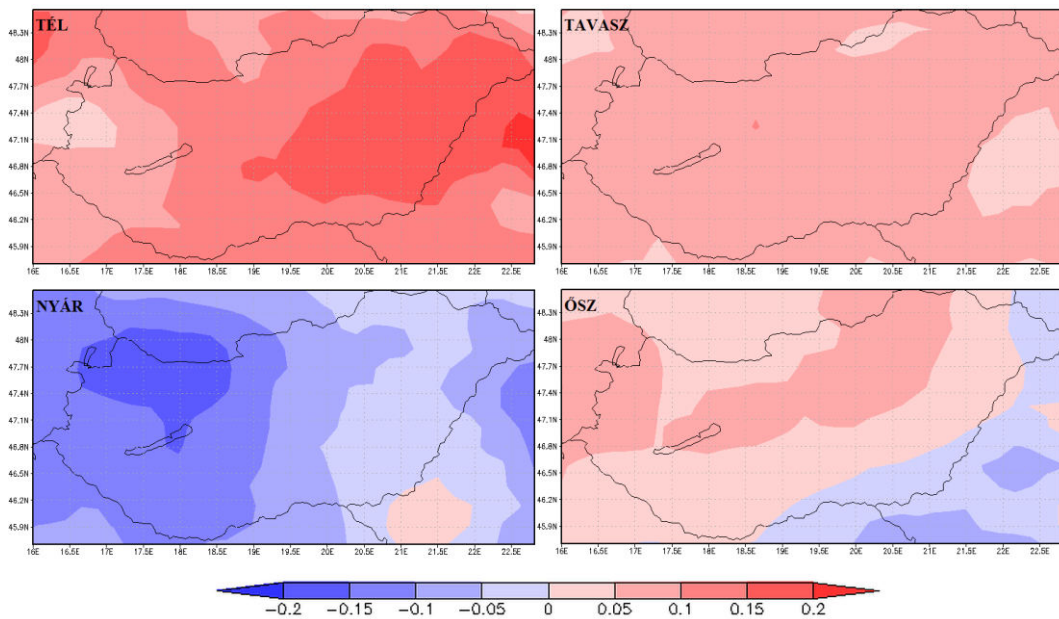
37. ábra Az ALADIN modell 10 m-es átlagos évszakos szélességének megváltozása a 2071-2100-as időszakra (m/s). Referencia időszak: 1961-1990

A REMO modellszimuláció az ALADIN-tól meglehetősen különböző szimulációs eredményeket adott, de a szélsőségek átlagos megváltozásai a REMO esetében is tized m/s alattiak, tehát itt is kérdéses a változás szignifikanciája. A 2021-2050-es időszakra a REMO is az éves átlagos szélsőség növekedését jelezte, de a század végére a növekedés egy csökkenő tendenciába fordult át az ország egész területén. Bár a változások területileg egységes képet mutatnak, mértékük olyan csekély, hogy valószínűsíthetően nem szignifikánsak (38. ábra). A két modell annyiban közös eredményt adott, hogy a 2021-2050-es szélsőség növekedés maximuma mindkét esetben Magyarország északkeleti régiójára esett. A REMO szimulációs eredményeit évszakok szerint vizsgálva láthatjuk, hogy a szél növekedése télen, a csökkenése pedig nyáron lett a legerőteljesebb (39. és 40. ábra), ami az ALADIN projekciójának éppen az ellentettje. Az átmeneti évszakok projekciós eredményei nagyobb hasonlóságot mutatnak. A REMO tavasszal az átlagos szélsőség enyhe erősödését jelezte mindkét időintervallumban, ősszel pedig az első periódusban növekedést, a század végére pedig csökkenést.

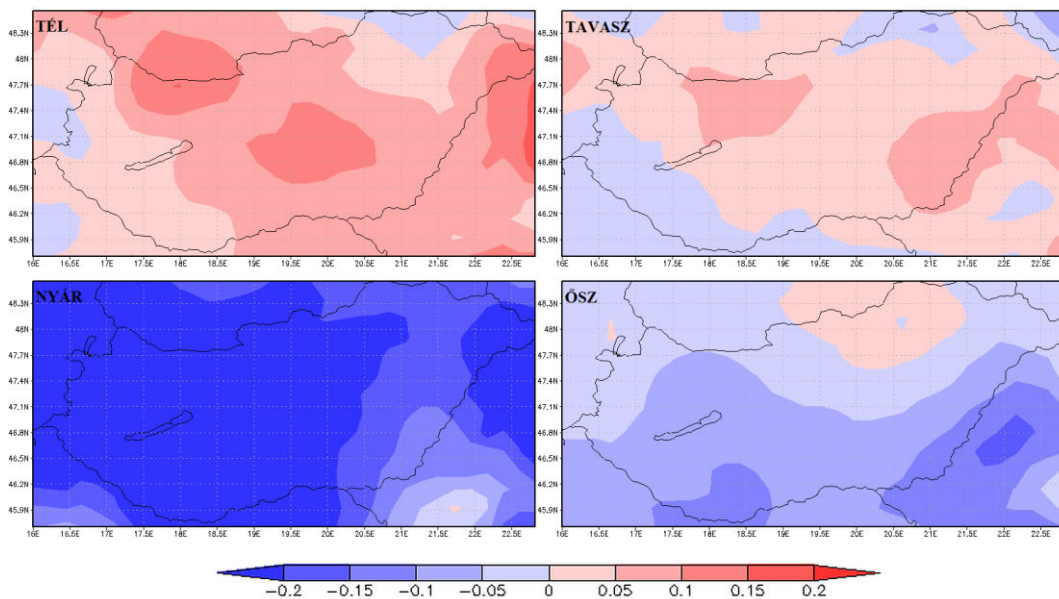


38. ábra A REMO modell 10 m-es átlagos éves szélsőségének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (fent) és a 2071-2100-as időszakra (lent) (m/s). Referencia időszak: 1961-1990

A REMO esetében az ALADIN-nál tapasztalt Balaton környéki régió szélsőségeinek csökkenése nem jelent meg, amit többek közt a modell durvább térbeli felbontása is magyarázhat. A REMO modellszimuláció alapján számolt átlagos éves megváltozások 2021-2050-re az ország területén +0,03 m/s-nak, Eger környékén +0,1 m/s-nak adódtak. Az átlagos megváltozások 2071-2100-ra vonatkozó értékei -0,1 m/s illetve -0,04 m/s (12. és 13. táblázat).



39. ábra A REMO modell 10 m-es átlagos évszakos szélsőségeinek megváltozása a 2021-2050-es időszakra (m/s). Referencia időszak: 1961-1990



40. ábra A REMO modell 10 m-es átlagos évszakos szélsőségeinek megváltozása a 2071-2100-as időszakra (m/s). Referencia időszak: 1961-1990

12. táblázat A modellek 10 m-es szélességének átlagos éves megváltozásai

10 m-es szélesség átlagos éves megváltozásai (m/s)		
Modell/Időszak	Éves	
	M.o.	Eger
ALADIN 2021-2050	0,03	0,07
ALADIN 2071-2100	0,03	0,08
REMO 2021-2050	0,03	0,06
REMO 2071-2100	-0,05	-0,04

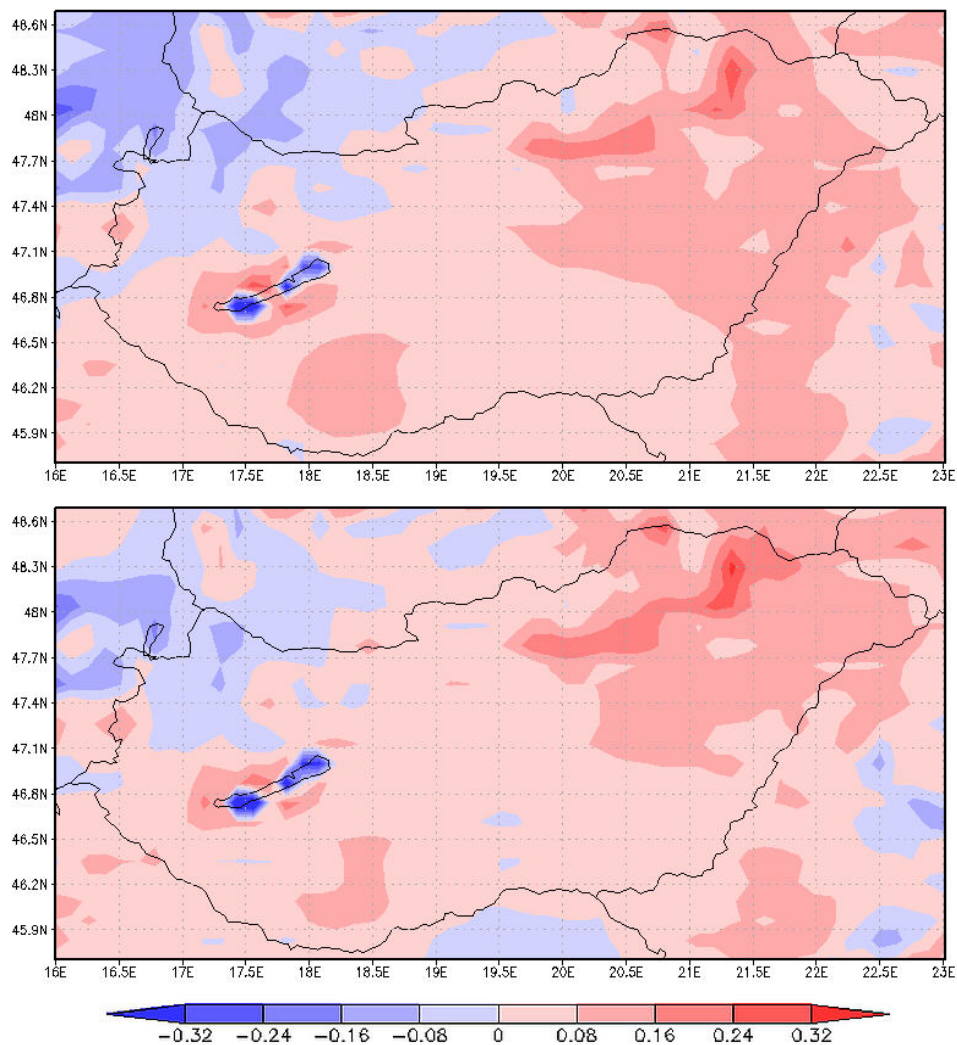
13. táblázat A modellek 10 m-es szélességének átlagos évszakos megváltozásai

10 m-es szélesség átlagos évszakos megváltozásai (m/s)								
Modell/Időszak	Tél		Tavaszi		Nyár		Ősz	
	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger
ALADIN 2021-2050	-0,11	-0,1	0,02	0,11	0,15	0,20	0,05	0,05
ALADIN 2071-2100	-0,09	-0,05	0,01	0,10	0,19	0,23	-0,02	0,17
REMO 2021-2050	0,13	0,15	0,07	0,07	-0,1	-0,06	0,04	0,08
REMO 2071-2100	0,07	0,05	0,03	0,01	-0,24	-0,22	-0,05	0,01

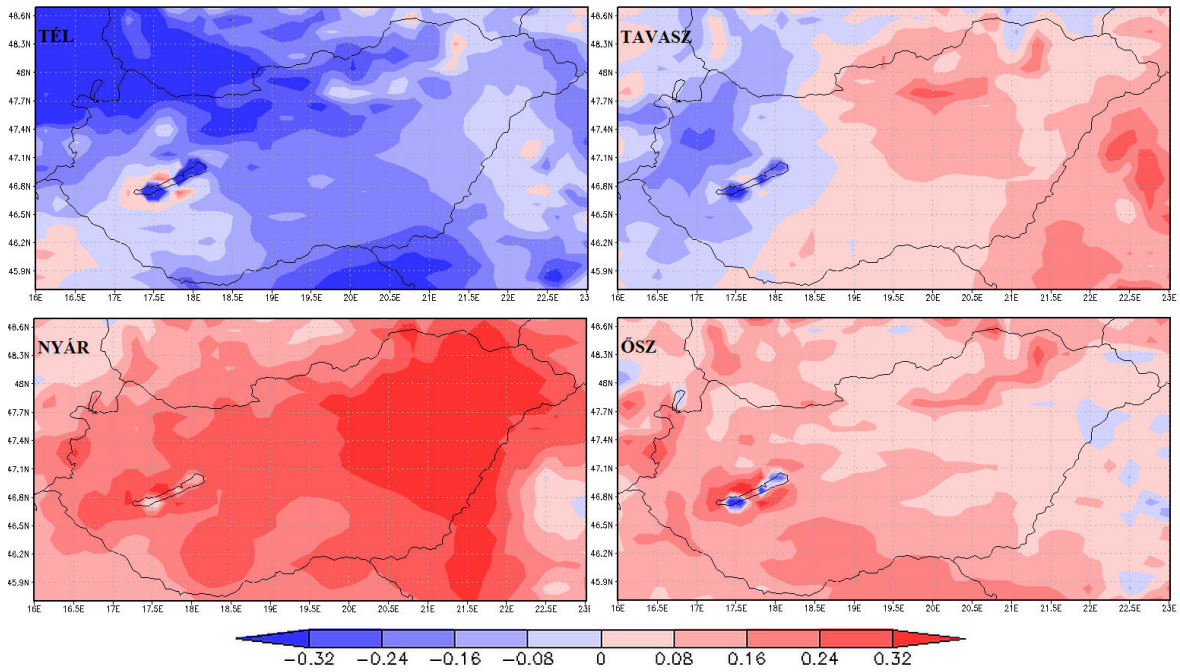
5.2.2 100 m-es szélesség

A 100 m-es szélesség megváltozása a modellek projekciója alapján nagyobb mértékű lett, mint a felszíni szél változása (de még itt sem mondhatjuk minden esetben, hogy a változás szignifikáns). A tendenciák és a területi jellemzők természetesen megegyeznek, mivel a magassági szelet a felszíni szélességből állítottuk elő. Az ALADIN projekciója a 100 m-es szélesség éves átlagának növekedését jelezte előre mindkét időintervallumra (41. ábra). Évszakos szinten a felszíni esethez hasonlóan a modell erős nyári és enyhe őszi növekedést, illetve erős téli csökkenést adott. Az őszi növekedés a XXI. század második felében átfordul csökkenéssé, tavasszal pedig mindkét

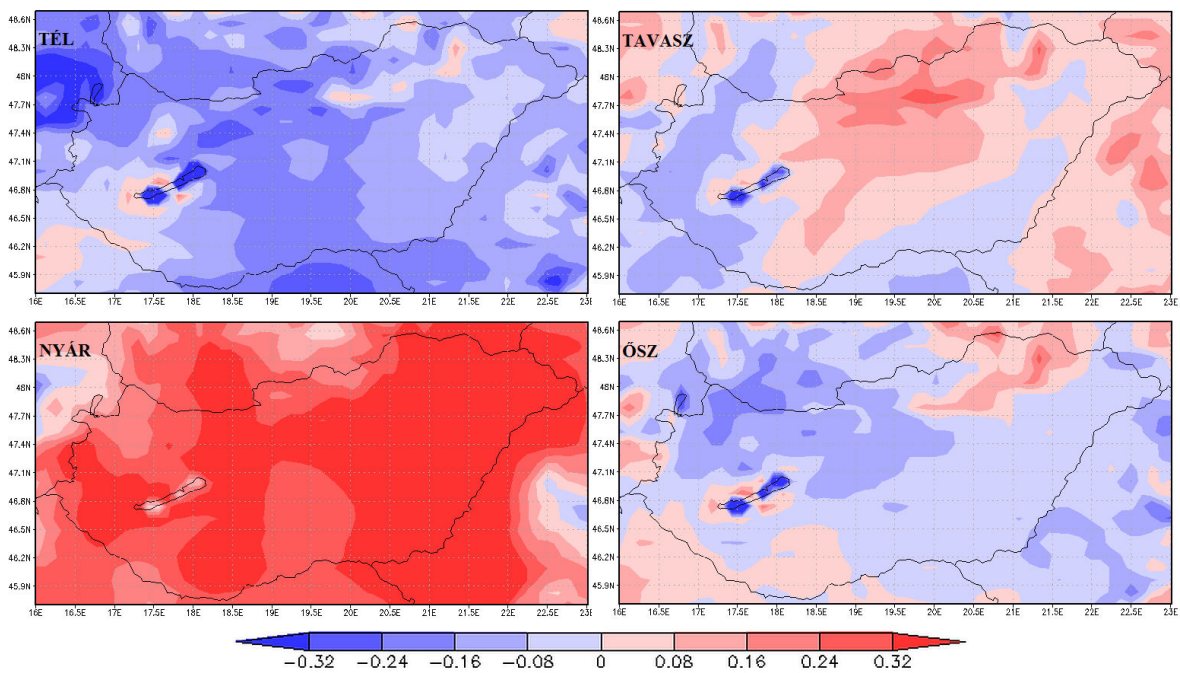
időszakban az ország keleti felén csökkenést, a nyugati felén növekedést szimulált a modell (42. és 43. ábra). Az ALADIN modellszimuláció alapján számolt átlagos éves megváltozások 2021-2050-re az ország területén +0,03 m/s-nak, Eger környékén +0,06 m/s-nak adódtak. Az átlagos megváltozások 2071-2100-ra vonatkozóan +0,05 m/s és +0,15 m/s. (Az ALADIN 1961-1990-es időszakra vonatkozó 100 m-es szélességének az országra számolt területi átlaga 4,84 m/s.) Az átlagos megváltozásokat a 14. és a 15. táblázatban foglaltuk össze.



41. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos éves szélességének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (fent) és a 2071-2100-as időszakra (lent) (m/s). Referencia időszak: 1961-1990

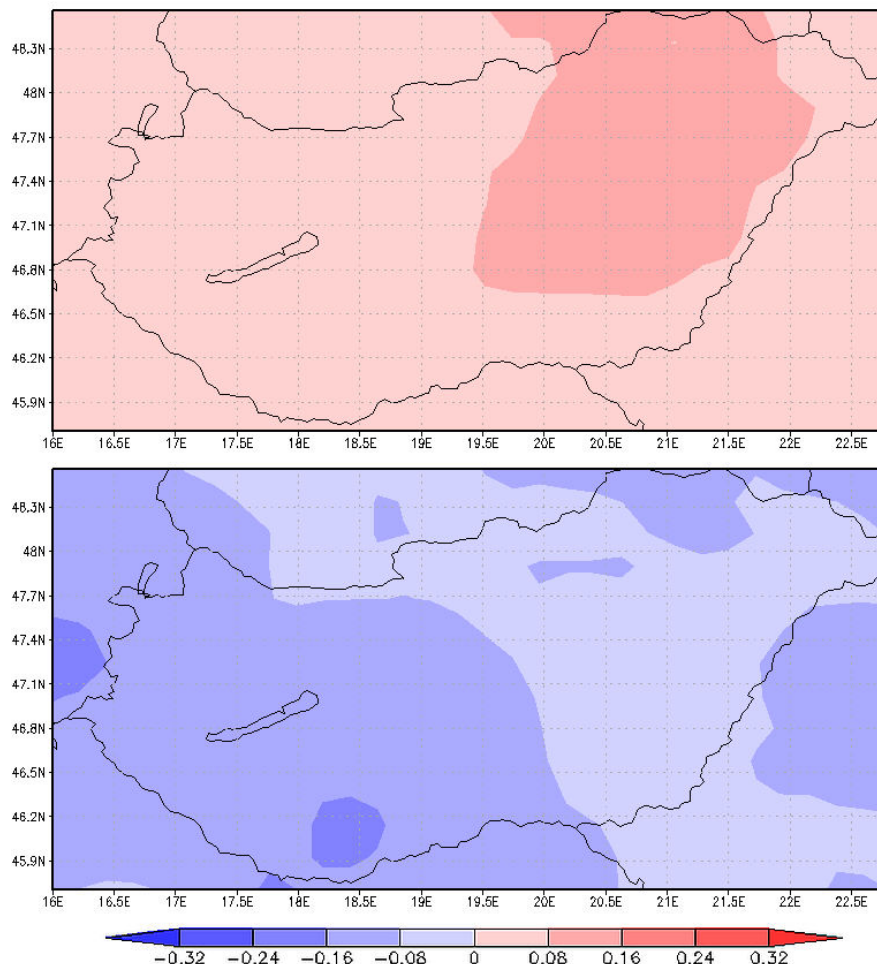


42. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos évszakos szélsebességének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (m/s). Referencia időszak: 1961-1990

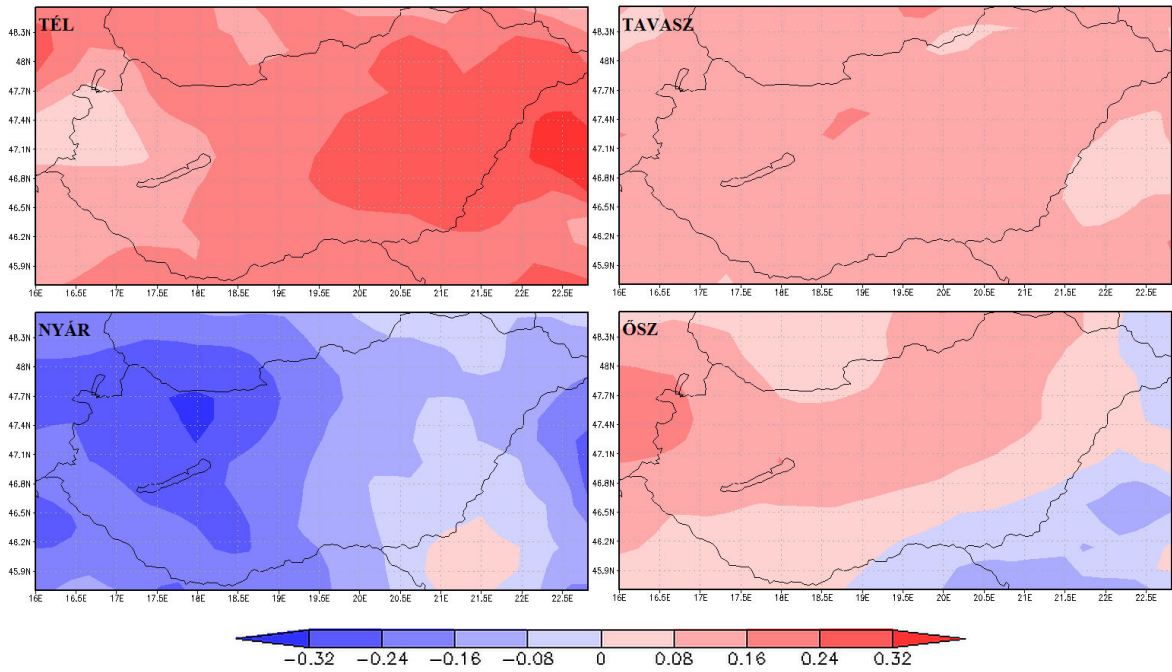


43. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos évszakos szélsebességének megváltozása a 2071-2100-as időszakra (m/s). Referencia időszak: 1961-1990

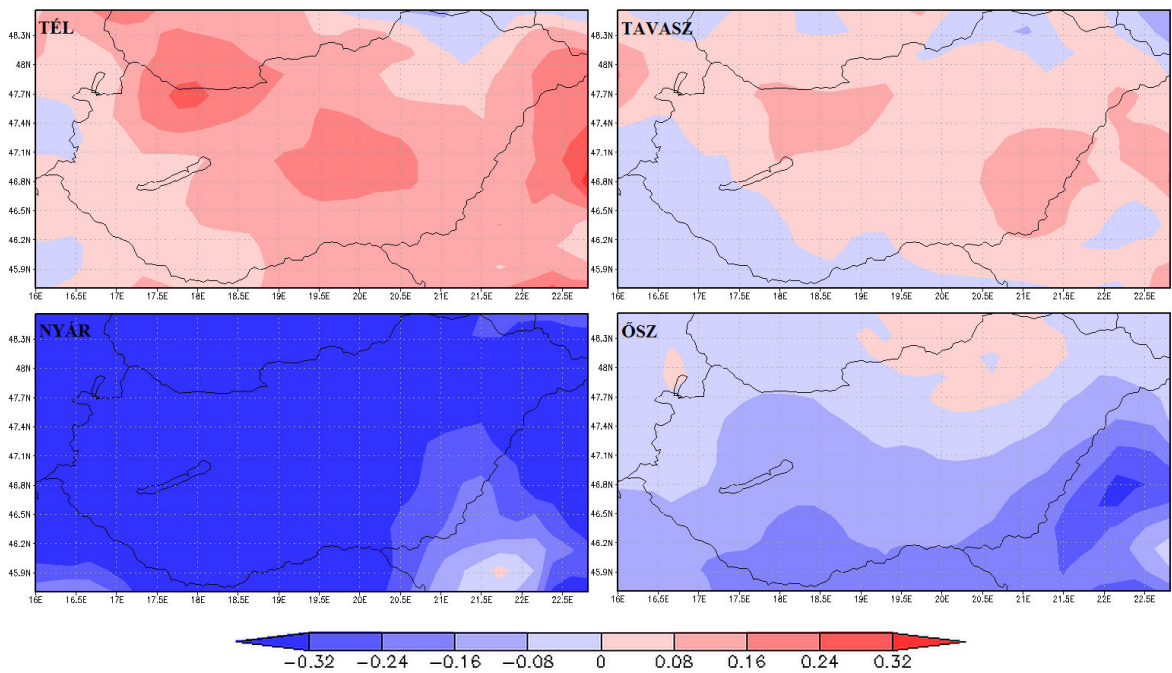
A REMO projekciójával kapcsolatban ugyan azt mondhatjuk el, mint amit a 10 m-es szél esetében. A modellszimuláció eredménye szerint a 100 m-es szélesség éves átlaga a 2021-2050-es periódusban magasabb, a 2071-2100-as periódusban pedig alacsonyabb lett mint az 1961-1990-es periódus átlagos értékei (44. ábra). Évszakos szinten ismét az erős téli növekedés (mely a század végére már kisebb mértékű) és az erős nyári csökkenés a jellemző. A tavaszi évszakra egy gyenge növekvő, az őszire pedig előbb (2021-2050-re) növekvő, majd (2071-2100-ra) csökkenő tendenciát kaptunk (44. és 45. ábra). A REMO modellszimuláció alapján számolt átlagos éves megváltozások 2021-2050-re az ország területén +0,06 m/s-nak, Eger környékén +0,1 m/s-nak adódtak. Az átlagos megváltozások 2071-2100-ra vonatkozóan -0,1 m/s és -0,08 m/s. (A REMO 1961-1990-es időszakra vonatkozó 100 m-es szélességének az országra számolt területi átlaga 6 m/s.) Az átlagos megváltozásokat a 14. és a 15. táblázatban foglaltuk össze.



44. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos éves szélességének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (fent) és a 2071-2100-as időszakra (lent) (m/s). Referencia időszak: 1961-1990



45. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos évszakos szélességének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (m/s). Referencia időszak: 1961-1990



46. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos éves szélességének megváltozása a 2071-2100-as időszakra (m/s). Referencia időszak: 1961-1990

14. táblázat A modellek 100 m-es szélesebbségének átlagos éves megváltozásai

100 m-es szélesebbség átlagos éves megváltozásai (m/s)		
Modell/Referencia	Éves	
	M.o.	Eger
ALADIN 2021-2050	0,03	0,13
ALADIN 2071-2100	0,05	0,15
REMO 2021-2050	0,06	0,1
REMO 2071-2100	-0,1	-0,08

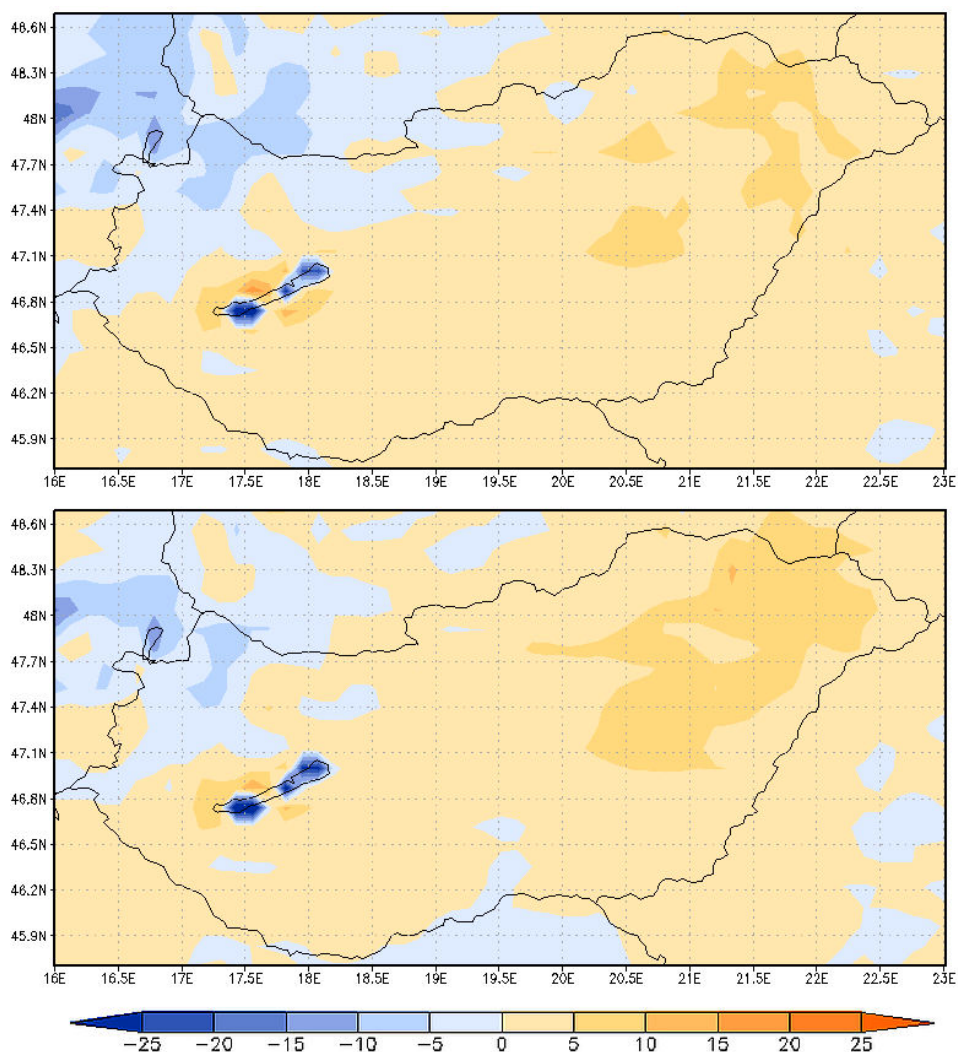
15. táblázat A modellek 100 m-es szélesebbségének átlagos évszakos megváltozásai

100 m-es szélesebbség átlagos évszakos megváltozásai (m/s)								
Modell/Időszak	Tél		Tavasz		Nyár		Ősz	
	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger
ALADIN 2021-2050	-0,17	-0,16	0,02	0,17	0,28	0,41	0,1	0,11
ALADIN 2071-2100	-0,13	-0,08	0,03	0,18	0,37	0,45	-0,04	0,03
REMO 2021-2050	0,20	0,24	0,12	0,11	-0,17	-0,09	0,08	0,04
REMO 2071-2100	0,11	0,13	0,04	0,04	-0,45	-0,37	-0,09	-0,09

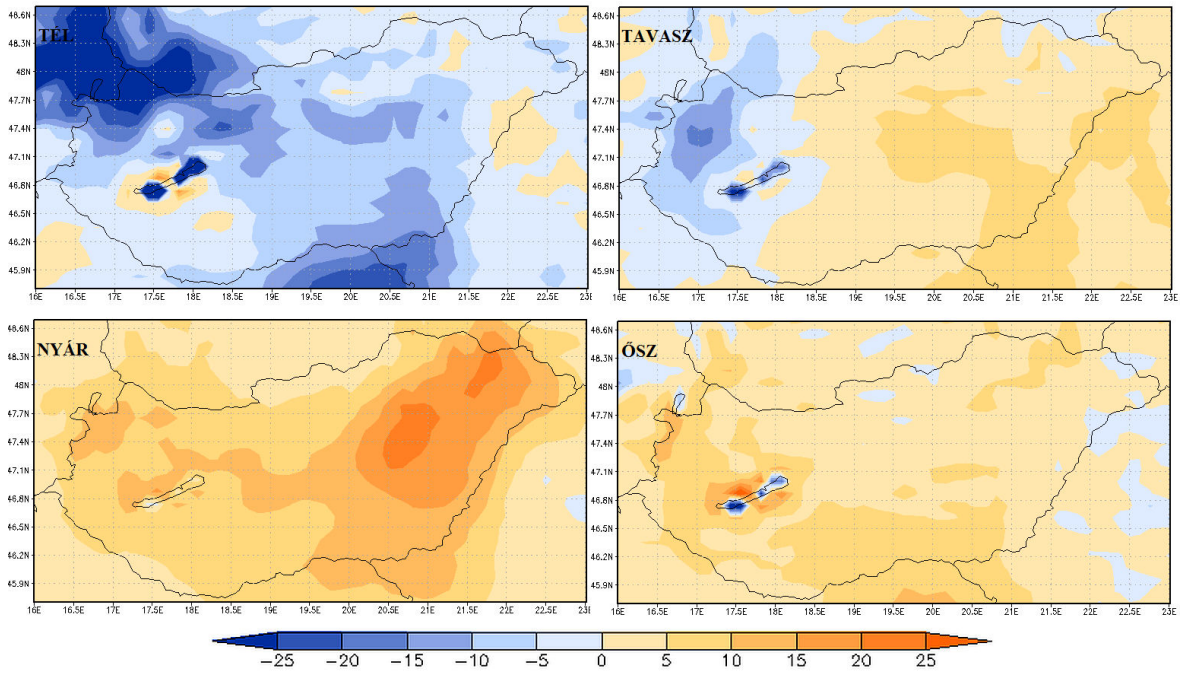
5.2.3. Energiasűrűség

Az ALADIN modell projekciós eredményeiből előállított 100 m-es éves átlagos energiasűrűség mindkét vizsgált jövőbeli időintervallumban magasabb lett az 1961-1990-es értékeknél (47. ábra). Az energiasűrűség növekedésének maximuma az ország északkeleti térségére esett. A növekedés a nyári évszakban lett a leghatározottabb, tavasszal és ősszel pedig valamivel mérsékeltebb. Télen az ALADIN az energiasűrűség csökkenését szimulálta mindkét vizsgált időintervallumban, mely a Kisalföld és az Alföld déli részén volt a legerőteljesebb (48. és 49. ábra). Ezt a csökkenő értéket éves szinten

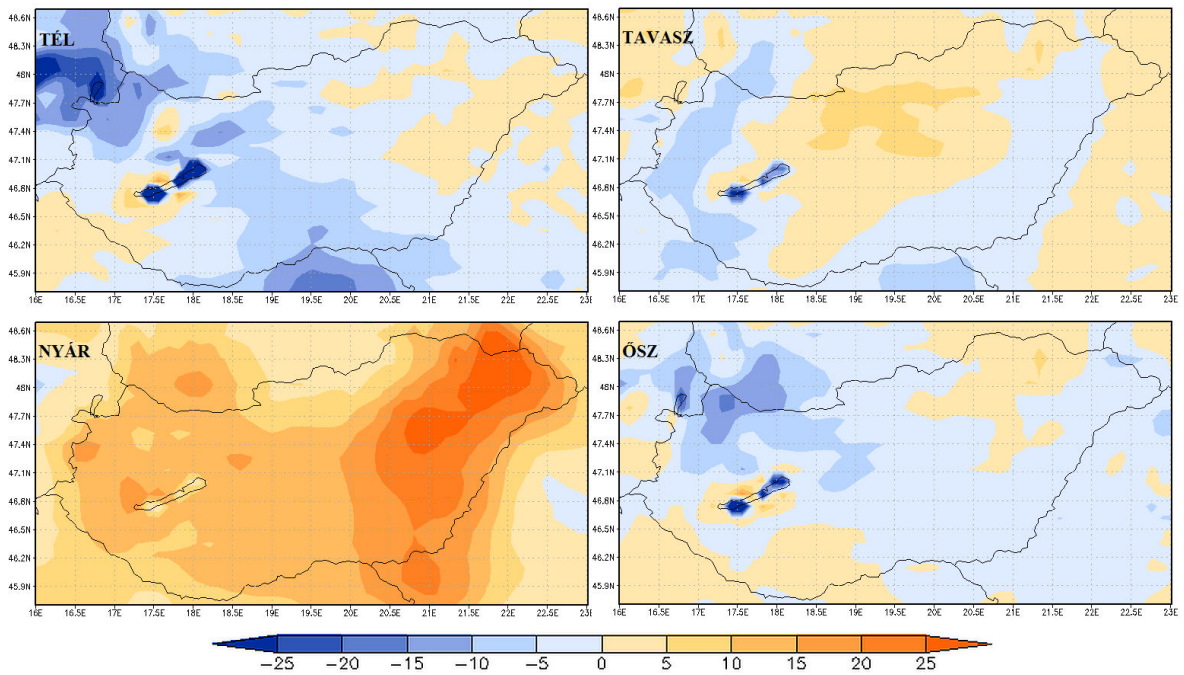
azonban ellensúlyozza a többi évszakhoz tartozó növekedés így az országra vonatkozó átlagos éves megváltozás pozitív előjelű maradt. Az ALADIN modellszimuláció alapján számolt átlagos éves megváltozások 2021-2050-re az ország területén $+2,1 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ -nek, Eger környékén $+3,4 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ -nek adódtak. Az átlagos megváltozások 2071-2100-ra vonatkozóan $+2,2 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ és $+4,4 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ (16. táblázat). Az ALADIN 1961-1990-es időszakra vonatkozó 100 m-es energiasűrűségének Magyarországra vonatkozó területi átlaga $83 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$, aminek alapján az országra vonatkozó változások százalékos formában a következőek: 2021-2050-re $+2,5 \%$, 2071-2100-ra pedig $+2,7 \%$.



47. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos éves energiasűrűségének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (fent) és a 2071-2100-as időszakra (lent) ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$). Referencia időszak: 1961-1990

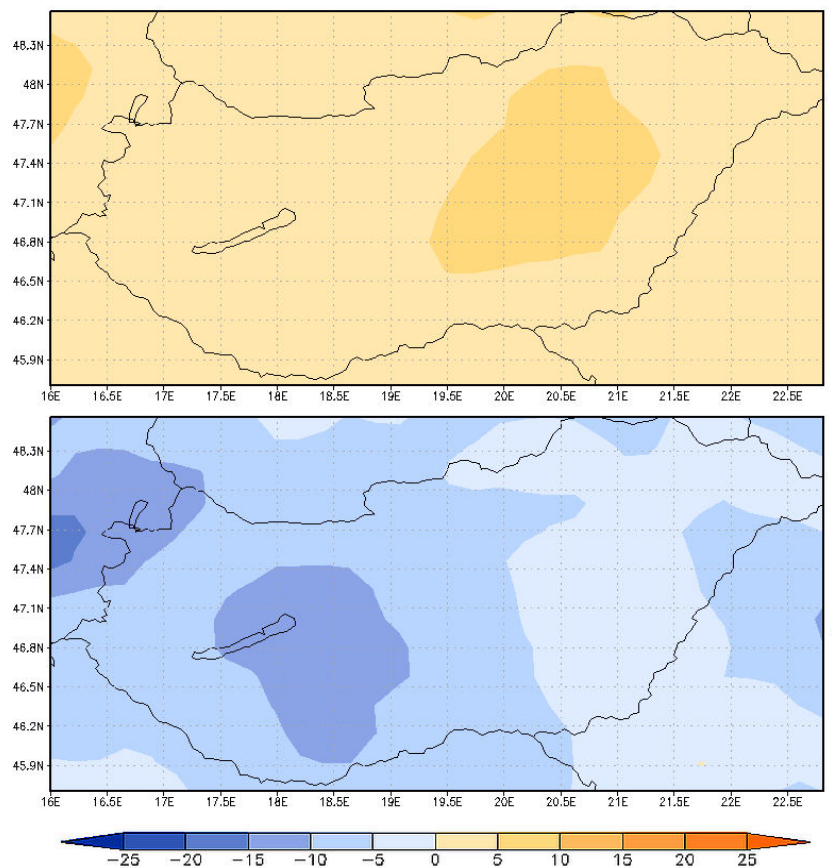


48. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos évszakos energiasűrűségének megváltozása a 2021-2050-es időszakra ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$). Referencia időszak: 1961-1990

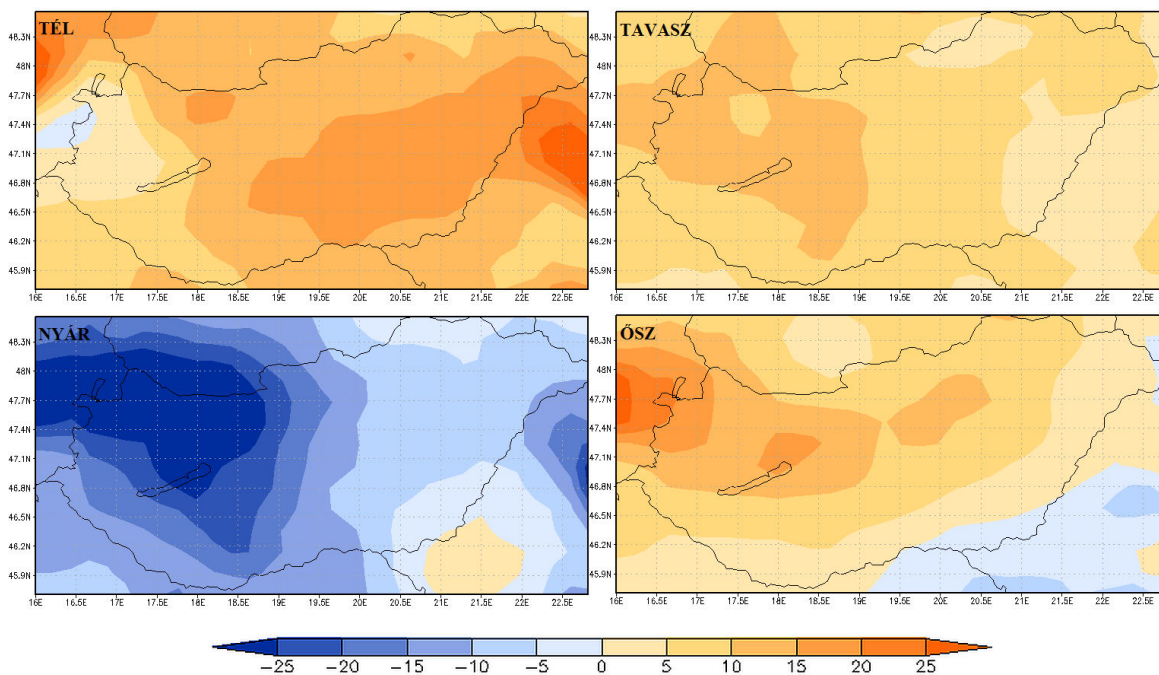


49. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos évszakos energiasűrűségének megváltozása a 2071-2100-as időszakra ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$). Referencia időszak: 1961-1990

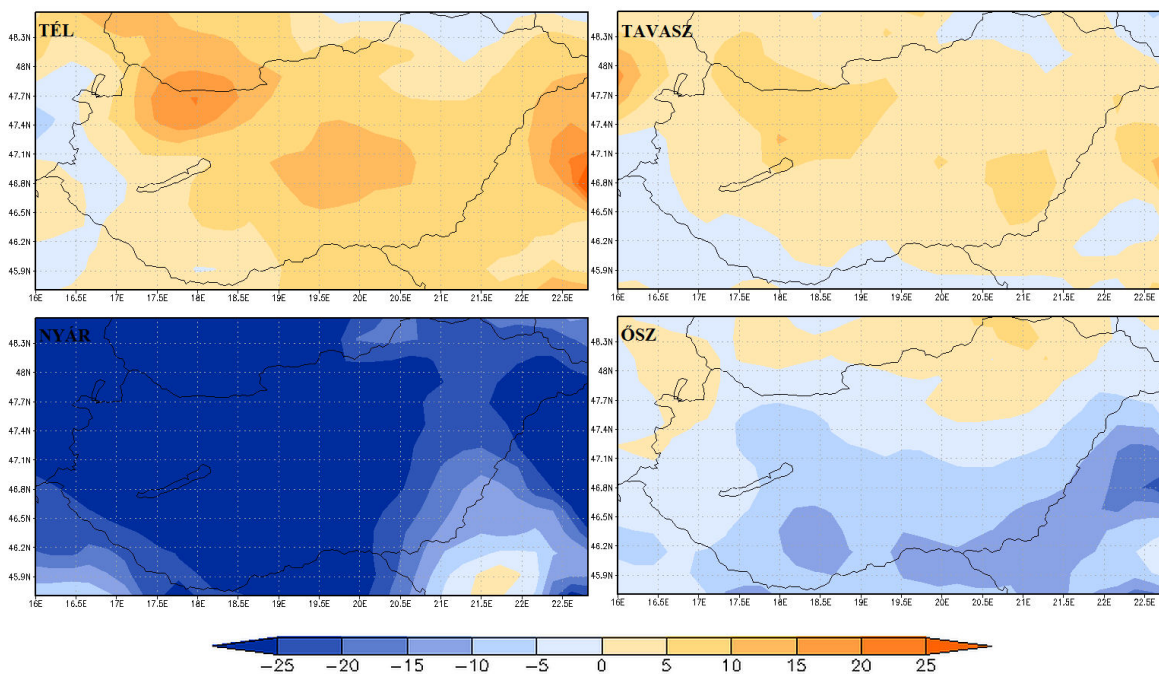
A REMO modellszimulációkból származó átlagos eltérések éves szinten a 2021-2050-es időszakra növekedést, a 2071-2100-as időszakra pedig csökkenést eredményeztek Magyarország teljes területén (50. ábra). A század közepére szimulált energiasűrűség-növekedés nagyobb lett, mint az ALADIN esetében, azonban a század végi csökkenés még ezt is meghaladta. Az átlagos megváltozásokat évszakos szinten vizsgálva azt tapasztaltuk, hogy a REMO a nyári évszakra, (különösképp a század végi időszakban) erős csökkenést, a többi évszakra enyhébb növekedést adott. A 2071-2100-as időszakban már csak a téli és a tavaszi évszakra vonatkozóan dominált a növekedés, és a nyári csökkenés tovább fokozódott (51. és 52. ábra). A REMO modellszimuláció alapján számolt átlagos éves megváltozások 2021-2050-re az ország területén $+3,4 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ -nek, Eger környékén $+5,5 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ -nek adódtak. Az átlagos megváltozások 2071-2100-ra vonatkozóan $-7,2 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ és $-5,3 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ (16. táblázat). A REMO 1961-1990-es időszakra vonatkozó 100 m-es energiasűrűségének az országra számolt területi átlaga $144 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$, aminek alapján az országra vonatkozó változások százalékos formában a következők: 2021-2050-re $+2,4 \%$, 2071-2100-ra pedig $-5,0 \%$.



50. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos éves energiasűrűségének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (fent) és a 2071-2100-as időszakra (lent) ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$). Referencia időszak: 1961-1990



51. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos évszakos energiasűrűségének megváltozása a 2021-2050-es időszakra ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$). Referencia időszak: 1961-1990



52. ábra REMO modell 100 m-es átlagos évszakos energiasűrűségének megváltozása a 2071-2100-as időszakra ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$). Referencia időszak: 1961-1990

16. táblázat A modellek 100 m-es energiasűrűségének átlagos éves megváltozásai

100 m-es energiasűrűség átlagos éves megváltozásai ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$)		
Modell/Referencia	Éves	
	M.o.	Eger
ALADIN 2021-2050	2,1	3,4
ALADIN 2071-2100	2,2	4,4
REMO 2021-2050	3,4	5,5
REMO 2071-2100	-7,2	-5,3

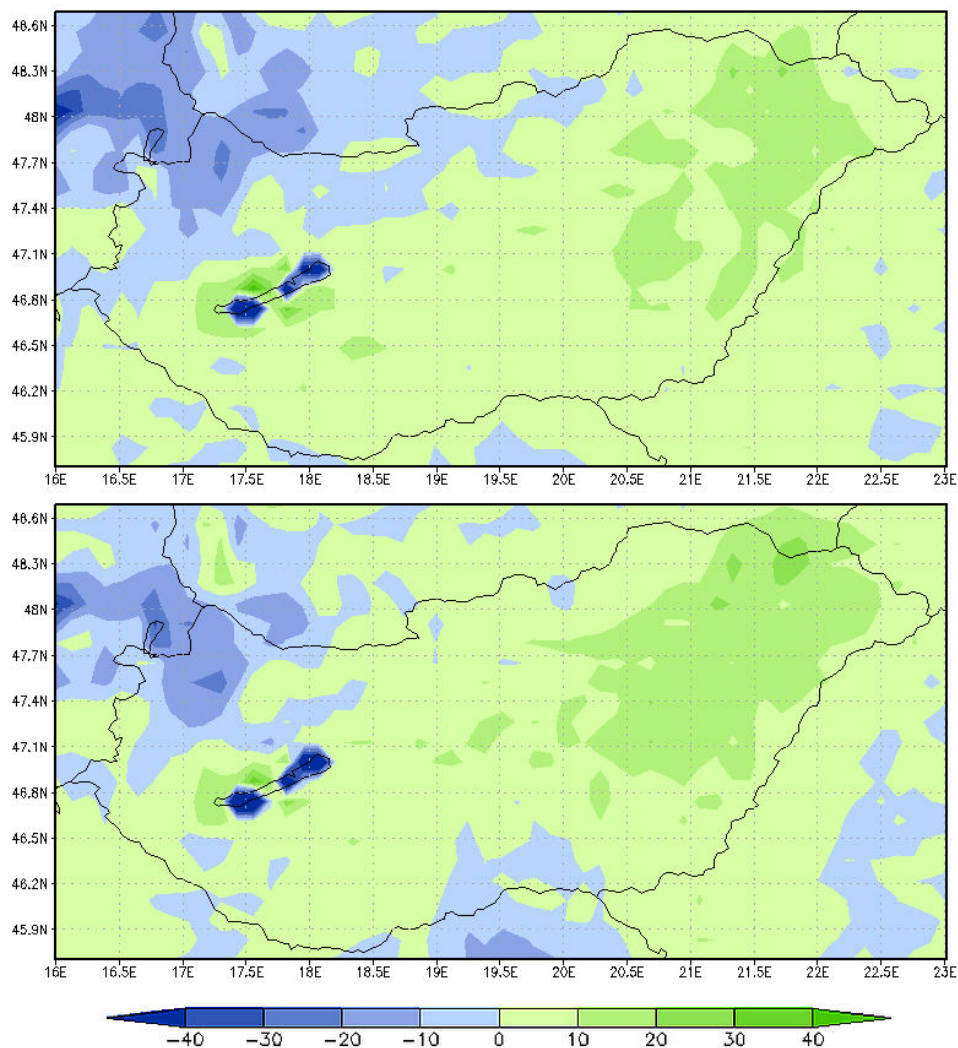
17. táblázat A modellek 100 m-es energiasűrűségének átlagos évszakos megváltozásai

100 m-es energiasűrűség átlagos évszakos megváltozásai ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$)								
Modell/Időszak	Tél		Tavaszi		Nyár		Ősz	
	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger
ALADIN 2021-2050	-7,6	-4,5	0,9	4,0	10,9	11,2	4,2	2,8
ALADIN 2071-2100	-3,6	-0,2	-0,1	4,2	14,5	12,4	-2,0	1,0
REMO 2021-2050	12,7	13,9	7,9	6,2	-14,6	-0,6	7,6	10,5
REMO 2071-2100	6,7	5,1	3,0	1,6	-34,0	-29,4	-4,3	1,6

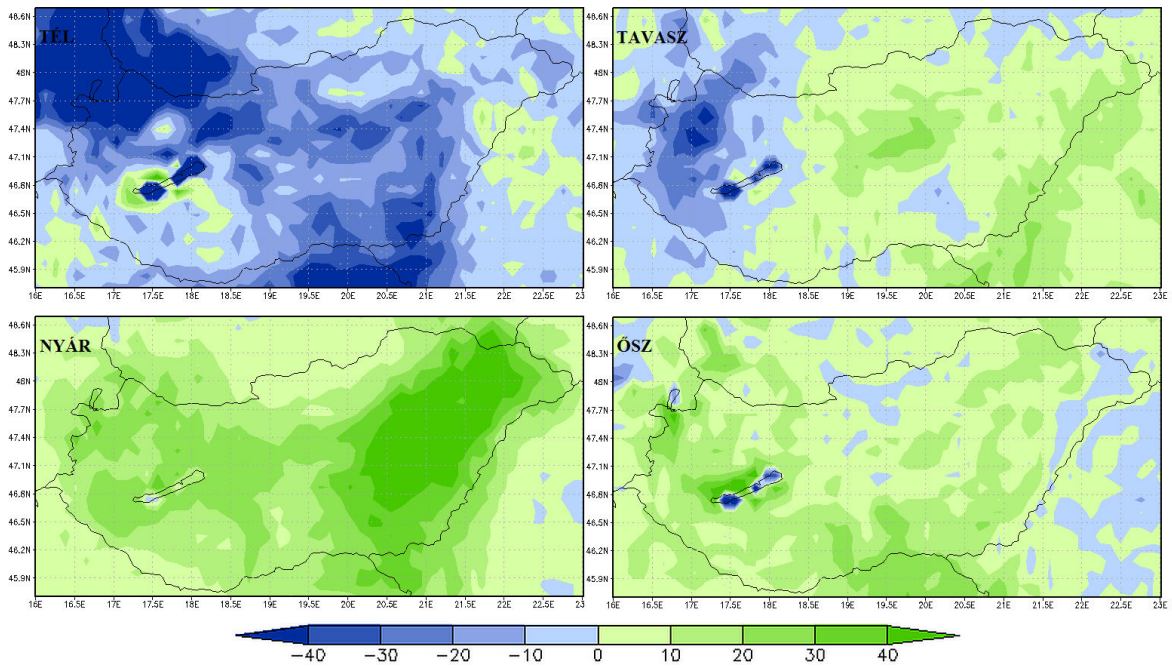
5.2.4. Potenciális teljesítmény

Az ALADIN potenciális teljesítményre vonatkozó projekciói a többi vizsgált elemhez hasonlóan pozitív átlagos éves megváltozás értéket adtak az ország túlnyomó többségére, melynek maximuma az ország északkeleti régiójára esett. Csökkenést éves szinten csak hazánk északnyugati részén, illetve a 2071-2100-es időszakban a Duna-Tisza-közének déli részén tapasztaltunk (53. ábra). A legerősebb változásokat évszakos szinten a téli csökkenés és a nyári növekedés jelentette. Az őszi évszak esetében a század közepére vonatkozó projekcióban még teljesítmény növekedést, a század végére vonatkozóban pedig

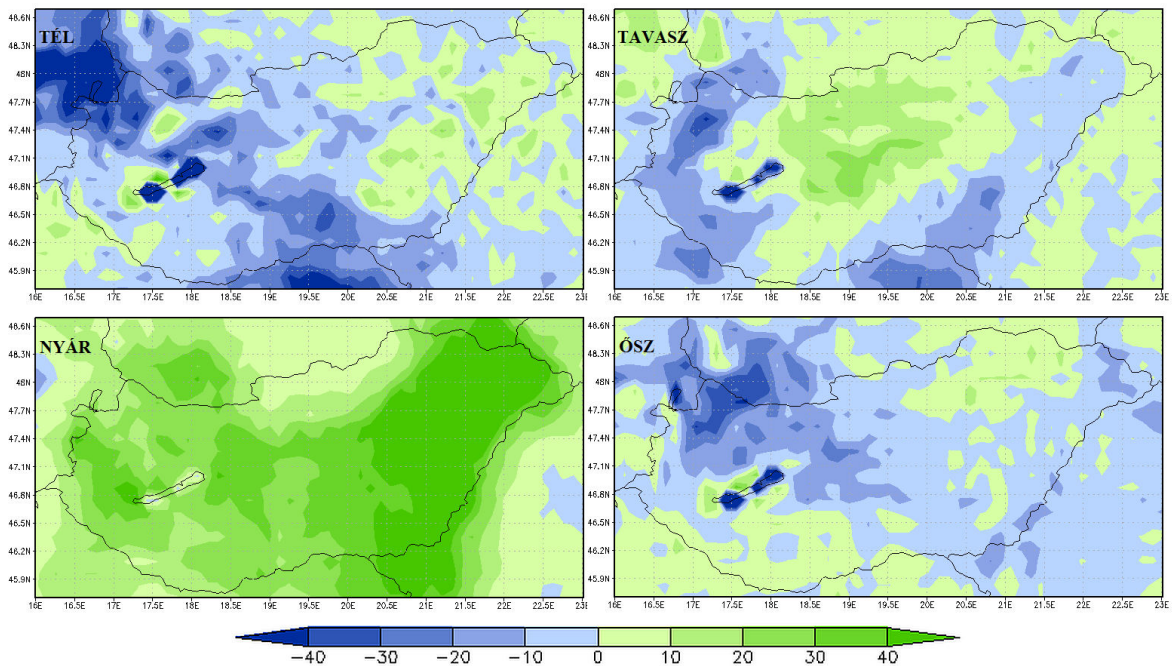
már csökkenést kaptunk (54. és 55. ábra). Az ALADIN modellszimuláció alapján számolt átlagos éves megváltozások 2021-2050-re az ország területén +4 kW-nak, Eger környékén +7 kW-nak adódtak. Az átlagos megváltozások 2071-2100-ra vonatkozóan +5 kW és +10 kW (18. táblázat). Az ALADIN 1961-1990-es időszakra vonatkozó 100 m-es potenciális teljesítményének az országra számolt területi átlaga 153 kW, aminek alapján az országra vonatkozó változások százalékos formában a következők: 2021-2050-re +2,6 %, 2071-2100-ra pedig +3,3 % (20. táblázat).



53. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos éves potenciális teljesítményének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (fent) és a 2071-2100-as időszakra (lent) (kW). Referencia időszak: 1961-1990

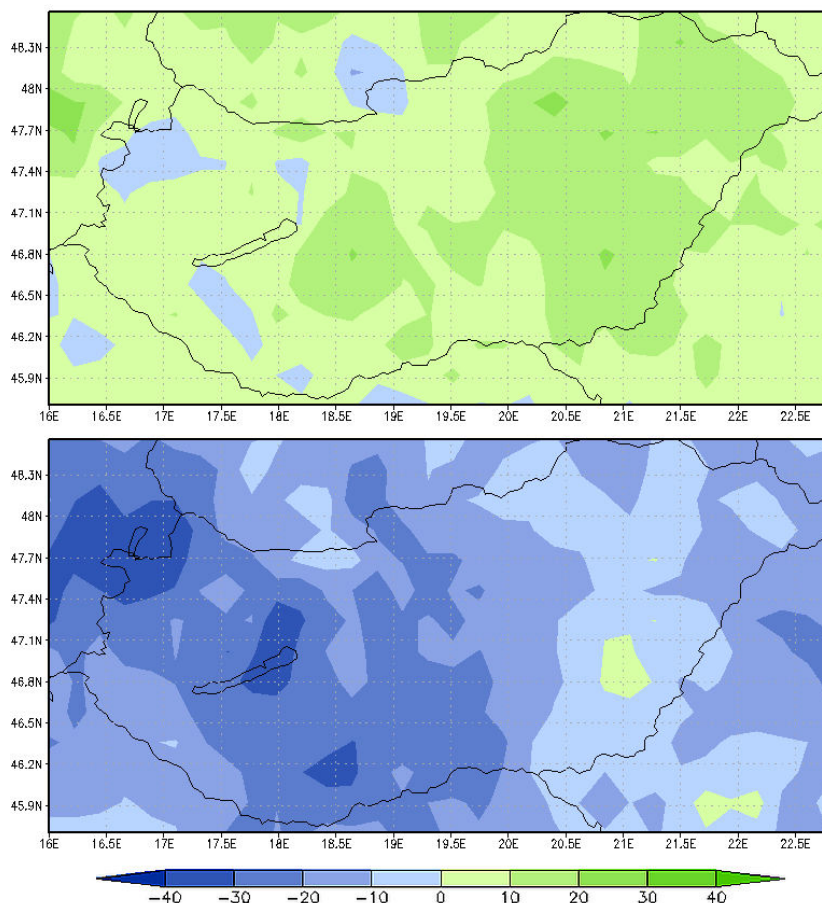


54. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos évszakos potenciális teljesítményének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (kW). Referencia időszak: 1961-1990

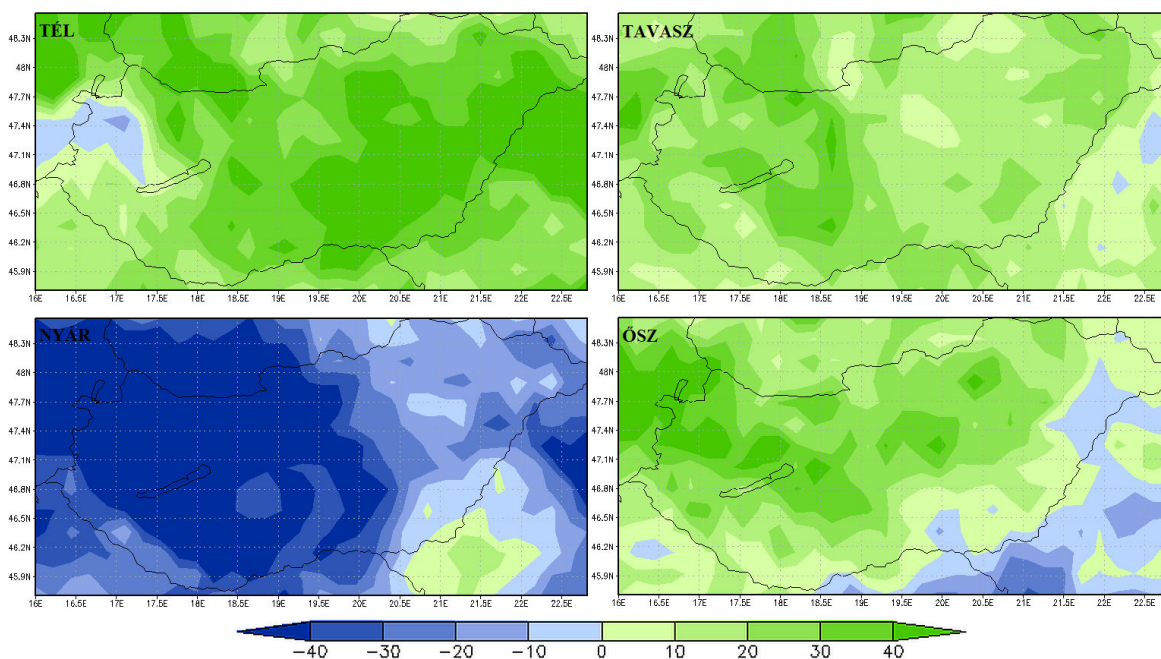


55. ábra Az ALADIN modell 100 m-es átlagos évszakos potenciális teljesítményének megváltozása a 2071-2100-as időszakra (kW). Referencia időszak: 1961-1990

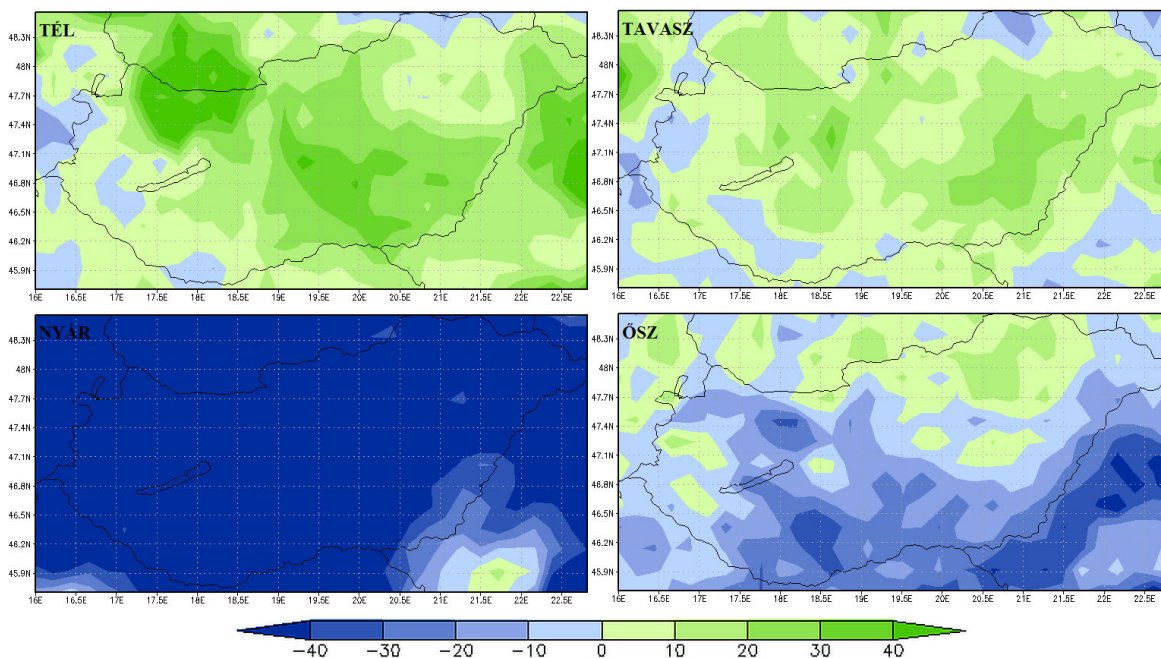
A REMO projekciós eredményei a potenciális teljesítmény megváltozására a többi elemhez hasonlóan a 2021-2050-es időszakra pozitív változást, a 2071-2100-as időszakra negatív változást adtak. A növekedés inkább a keleti, a csökkenés inkább a nyugati országrészben lett határozottabb (56. ábra). Az évszakos átlagos megváltozások jellegét ebben az esetben az erős nyári csökkenés és a többi évszak során kapott növekedés határozza meg. A 2021-2050-es periódusban az őszi évszakra vonatkozó egyértelmű növekedés a század végére csökkenésbe ment át, különösen az ország déli részein (57. és 58. ábra). A REMO modellszimuláció alapján számolt átlagos éves megváltozások 2021-2050-re az ország területén +9 kW-nak, Eger környékén +19 kW-nak adódtak. Az átlagos megváltozások 2071-2100-ra vonatkozóan -16 kW és -11 kW (18. táblázat). A REMO 1961-1990-es időszakra vonatkozó 100 m-es potenciális teljesítményének az országra számolt területi átlaga 299 kW, aminek alapján az országra vonatkozó változások százalékos formában a következők: 2021-2050-re +3 %, 2071-2100-ra pedig -5,4 %.



56. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos éves potenciális teljesítményének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (fent) és a 2071-2100-as időszakra (lent) (kW).
Referencia időszak: 1961-1990



57. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos évszakos potenciális teljesítményének megváltozása a 2021-2050-es időszakra (kW). Referencia időszak: 1961-1990



58. ábra A REMO modell 100 m-es átlagos évszakos potenciális teljesítményének megváltozása a 2071-2100-as időszakra (kW). Referencia időszak: 1961-1990

18. táblázat A modellek 100 m-es potenciális teljesítményének átlagos éves megváltozásai

100 m-es potenciális teljesítmény átlagos éves megváltozásai (kW)		
Modell/Referencia	Éves	
	M.o.	Eger
ALADIN 2021-2050	4	7
ALADIN 2071-2100	5	10
REMO 2021-2050	9	19
REMO 2071-2100	-17	-11

19. táblázat A modellek 100 m-es potenciális teljesítményének átlagos évszakos megváltozásai

100 m-es potenciális teljesítmény átlagos évszakos megváltozásai (kW)								
Modell/Időszak	Tél		Tavaszi		Nyár		Ősz	
	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger	M.o.	Eger
ALADIN 2021-2050	-18	-8	1	7	25	22	9	4
ALADIN 2071-2100	-7	3	-1	9	33	24	-5	3
REMO 2021-2050	32	45	20	16	-38	-19	20	33
REMO 2071-2100	17	10	9	9	-85	-70	-9	8

Mivel szélenergetikai szempontból a legjelentősebb a vizsgált elemek közül a potenciális teljesítmény, ezért ennek az országra vonatkozó, átlagos éves relatív megváltozását külön táblázatban foglaltuk össze százalékos formában. A potenciális teljesítmények megváltozása mellett, a hozzájuk tartozó 100 m-es szél relatív megváltozását is föltüntettük. Ezek alapján látható, hogy a fentiekben bemutatott változások kismértékűek, és nem haladják meg 6 %-ot sem a szélesség sem a potenciális teljesítmény esetében (20. táblázat).

20. táblázat A modellek 100 m-es szélességének és potenciális teljesítményének átlagos éves relatív megváltozása a két projekciós időszakban (Magyarországra vonatkozóan).

100 m-es szélesség és potenciális teljesítmény átlagos relatív megváltozásai (%)		
Modell/Referencia	100 m-es szélesség	100 m-es potenciális teljesítmény
ALADIN 2021-2050	0,6	2,6
ALADIN 2071-2100	1	3,3
REMO 2021-2050	1	3
REMO 2071-2100	-1,7	-5,4

6. Összefoglalás

A dolgozatban két kitűzött célunk volt. Egyrészt megvizsgálni, hogy a globális klímaváltozásnak várhatóan milyen lokális hatása van Magyarország egyes szélklimatológiai jellemzőire, másrészt becsléseket adni a szélenergetikai szempontból jelentős paraméterek várható megváltozására a XXI. században. A vizsgálatokhoz és a becslések készítéséhez két regionális éghajlati modell szimulációs eredményeit, továbbá két különböző megfigyelési adatokból előállított referenciaadatbázist használtunk fel. A módszertanban részletesen ismertetett módon a felszíni szélességből 100 m-es magassági szélességet, 100 m-es energiasűrűséget, illetve 100 m-es potenciális teljesítményt állítottunk elő.

A modellek validációja során megvizsgáltuk, hogy a két alkalmazott regionális modell 1961-1990-es időintervallumra vonatkozó szimulációi milyen pontossággal képesek visszaadni az ugyan ezen időintervallumra vonatkozó mérési eredményekből készült adatsorokat. A validációs vizsgálatok eredményét összefoglalva elmondhatjuk, hogy az ALADIN szimulációs eredményei minden esetben közelebb álltak a mérésekből készített adatbázisokhoz, mint a REMO szimulációs eredményei. A REMO mind a négy évszakban mindkét referencia adatbázis szerint jellemzően felülbecsülte a felszíni szélességet (bár a felülbecslés a CARPATCLIM adatait használva kisebb volt, mint a HUGRID esetében). Ez a felülbecslés megjelent az összes többi vizsgált elem

validációjánál is, hiszen a magassági szélesség, az energiasűrűség és a potenciális teljesítmény előállítása során is a felszíni szélességet használtuk fel a számítások elvégzéséhez. Az ALADIN validációja során átlagosan kisebb eltéréseket tapasztaltunk a modelleredmények és a referencia adatok között, ám az eltérések a HUGRID- dal való összehasonlítás során jellemzően pozitív, a CARPATCLIM-mel való összehasonlítás során pedig jellemzően negatív értéket vettek fel.

Meg kell jegyeznünk, hogy az átlagos eltérések az energiasűrűség és a potenciális teljesítmény validációjánál esetenként igen magas értékeket (magasabb mint 100 %-os relatív eltéréseket a modell éves területi átlagaihoz képest) adtak. Ez minden bizonnyal részben a dolgozatban végzett számítások során alkalmazott egyszerűsítéseknek köszönhető. A levegő sűrűségét konstans értéknek vettük, ám ha a szélességhez hasonlóan időben és térben változó mezőként kezeljük az bizonyosan pontosítaná a validációs eredményeket. Egy másik lehetséges módszertani fejlesztés a kiindulási adatokkal kapcsolatos. Mindkét alkalmazott modell és a megfigyelési adatbázisok esetében is a havi átlagos szélesség-mező képezték a kiindulási adatokat. A szélesség időben és térben is igen változékony meteorológiai elem, melynek a változékonyságát az átlagolások elsimítják. Ha a magassági szélességet, illetve ennek felhasználásával az energiasűrűséget és a potenciális teljesítményt is napi átlagokból számolnánk, majd ezekből állítanánk elő a havi, évszakos és éves átlagos mezőket növelhetnénk a vizsgálatok pontosságát.

A projekciós eredményeket összegezve elmondhatjuk, hogy a 2021-2050-es időszakra mindkét regionális éghajlati modell a 10 m-es szélesség éves átlagának növekedését szimulálta, amiből kifolyólag a felszíni szélességből előállított további 3 vizsgált paraméter is növekedést mutatott a század közepi projekciókban. A XXI. század végére, tehát a 2071-2100-as időszakra a modellek szimulációi már eltérő eredményeket adtak. Az ALADIN projekciójában a vizsgált szélparaméterek jelentősen nem változtak meg a 2021-2050-es állapothoz képest, a REMO ellenben azok csökkenését jelezte. További fontos eltéréseket tapasztaltunk a két modell projekciói között a változások évszakos szinten történő vizsgálata során. Az ALADIN az elemek erőteljes téli csökkenését és erős 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, továbbá az a tendencia is egyezik a két projekcióban, hogy az őszi évszakra a 2021-2050-es időszakban még növekedést, majd a 2071-2100-as időszakra már többnyire csökkenést szimuláltak. Ha a változások területi jellegét vizsgáljuk, a pozitív változások inkább az ország keleti, északkeleti régióira, a negatívak pedig a nyugati országrészre jellemzőek. Ennek köszönhetően a külön vizsgált kisebb, Eger körüli régió átlagos megváltozásai majd minden esetben magasabbak az egész országra vonatkozó átlagnál, illetve csökkenés esetén a csökkenés enyhébb, mint a teljes ország területére számolt átlag.

Az átlagos eltérések vizsgálata mellett, kiszámoltuk azok relatív mértékét is a 100 m-es szélesség, az energiasűrűség és a potenciális teljesítményre vonatkozóan. Az ALADIN szimulációs eredményei szerint a relatív változás a magassági szélességre nagyságrendileg +1 %, a potenciális teljesítményre és az energiasűrűségre +2-3 % mindkét vizsgált jövőbeli időszakban. A REMO modellszimuláció szerint a 100 m-es szélesség relatív változása a század közepére vonatkozóan még pozitív, +1% körül van, de a század végére már -1,7 %-o csökkenést adott a modell. Ennek megfelelően az energiasűrűségre és a potenciális teljesítményre vonatkozó relatív megváltozások +2-3 %-os illetve a század végére -5 %-os eredményt adtak.

Megjegyezzük, hogy a tisztán modellszimulációk eredményein alapuló magassági projekciók esetében vitatható a felszíni adatok használatának szükségessége. Ugyanis a szélesség 3 dimenziós prognosztikai változó, azaz nemcsak a felszínen, hanem a modellszinteken is minden időlépésben közvetlenül kiszámításra kerül. Így a vizsgálatok további fejlesztési lehetősége a magassági információk közvetlen használata.

Mindent összevetve úgy véljük, a dolgozat kitűzött céljait teljesítettük. Tapasztalataink szerint a modellek képesek realiztikusan leírni a hazai szélviszonyokat, így jó kiindulási alapot szolgáltatnak a jövőbeli változások vizsgálatához. A széllel és szélenergiával kapcsolatos jövőbeli projekciókat illetően a modelleredmények mutattak eltéréseket, ami rávilágít arra, hogy a vizsgálatokba érdemes kettőnél több regionális modellszimulációt bevonni. A további vizsgálatok során ajánlott a fent említett módszertani fejlesztési lehetőségeket figyelembe venni.

Irodalomjegyzék

- Bartholy J., Breuer H., Pieczka I., Pongrácz R., Radics K., 2013: Megújuló energiaforrások. ELTE TTK E-learning tankönyv.
- Bartholy J., Horányi A., Krüzselyi I., Pieczka I., Pongrácz R., Szabó P., Szépszó G., Torma Cs., 2011: A várható éghajlatváltozás dinamikus modelleredmények alapján. In: Klímaváltozás – 2011: Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére, 170–234.
- Bartholy J., Radics K., 2001: Selected wind characteristics and potential use of wind energy in Hungary. Part I. Időjárás 105, 109-126.
- Betz A., 1966: Introduction to the Theory of Flow Machines. (D. G. Randall, Trans.) Oxford, Pergamon Press.
- Götz, G., Rákóczi, F., 1988: A dinamikus meteorológiai alapjai. Tankönyvkiadó, Budapest, 484 p.
- Hartmann B., 2012: Szélérőművek integrálása a villamosenergia-rendszerbe Doktori disszertáció, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos Energetika Tanszék.
- Hawkins, Sutton, 2009: The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90, 1095–1107.
- Horányi A., Bartholy J., Krüzselyi I., Pieczka I., Pongrácz R., Szabó P., Szépszó G., Torma Cs., 2010: A hazai regionális klímamodellek eredményeinek együttes kiértékelése. 36. Meteorológiai Tudományos Napok beszámolókötet 113-129.
- Jacob, D., 2001: A note on the simulation of the annual and inter-annual variability of The water budget over the Baltic Sea drainage basin, Met. Atmos. Phys. 77, 61-73.
- Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z., 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, 1, 143–158.
- Ledács K. A., 1963: A szélenergia hasznosítása. Budapest, Műszaki Könyvkiadó.
- Ledács K. A., 1977: A szélenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon. Budapest, Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület.
- Ledács K. A., 1982: A szélenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon – II. Tanulmány. Budapest, Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület.

- Majewski, D., 1991: The Europa-Modell (EM) of the Deutscher Wetterdienst. ECMWF Seminar on numerical methods in atmospheric models. Vol.2, 147-191.
- Mortensen, N.G., Landsberg, L., Troen, I., Petersen, E.L., 1993: Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP). Riso Nat. Labs, Roskilde, Denmark, 126p.
- Radics K., 2004: A szélenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon: hazánk szélklímája a rendelkezésre álló szélenergia becslése és modellezése. Doktori értekezés, ELTE Meteorológiai Tanszék.
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U., and Schulzweida, U., 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. Report No. 18, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany.
- Royer, J.F., Cariolle, D., Chauvin, F., Déqué, M., Douville, H., Planton, S., Rascol, A., Ricard, J.L., Salas y Melia, D., Sevault, F., Simon, P., Somot, S., Tyteca, S., Terray, L., Valcke, S., 2002: Simulation of climate changes during the 21st century including stratospheric ozone. *Géosciences* 334 (3), 147-154.
- Spiridonov, V., Déqué, M., Somot, S., 2005: ALADIN-Climate: from the origins to present date. ALADIN Newsletter 29.
- Szabó P., Horányi A., Krüzselyi I., Szépszó G., 2010: Az Országos Meteorológiai Szolgálat regionális klímamodellezési tevékenysége: ALADIN-Climate és REMO. 36. Meteorológiai Tudományos Napok beszámolókötet 88-102.
- Szentimrey T., Bihari Z., Birszki B., 2006: Széltérkép fejlesztés állomások adatsoraiból, statisztikai klimatológiai eljárással. Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei (in print)
- Szentimrey, T., 2006: „Development of MASH homogenization procedure for daily data”, Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, Hungary.
- Szentimrey, T., Bihari, Z. and Szalai, S., 2005: Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis (MISH). *Geophysical Research Abstracts* 7.
- Szépszó G., Zsebeházi G., 2010: Az ENSEMBLES projekt regionális modelleredményeinek alkalmazhatósága Magyarország éghajlatának jellemzésére. 36. Meteorológiai Tudományos Napok beszámolókötet, 60-77.

Szépszó G., Horányi A., Kertész S. Lábó E., 2006: Magyarországi szélklimatológia előállítása globális mezők dinamikai leskálázásával. Magyar Meteorológiai Társaság előadássorozata, beszámolókötet, 82–93.

Tar K., 2011: A Kárpátok és a Magyar Alföld légcseréjének szélenergetikai vonatkozásai. A Nagyalföld Alapítvány kötetei 7. Környezeti változások és az Alföld. 379-388.

van der Linden, P. and Mitchell, J.F.B. (eds.), 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter EX1 3PB, UK.

WMO, 2008: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8 page I.5-12

Internetes hivatkozások

<http://www.enercon.de>

<http://www.gamesacorp.com>

<http://www.mszt.hu>

<http://www.origo.hu/idojaras>

<http://www.vestas.com>

Köszönetnyilvánítás

Elsőként szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Szépszó Gabriellának, hogy lehetővé tette számomra, hogy a témával foglalkozhassak, segített a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges ismeretek elsajátításában, irányította a munkámat, tanácsaival és észrevételeivel pedig mindvégig segítette azt. Ugyancsak köszönöm a segítséget, a tanácsokat és a türelmet belső konzulensemnek, Pieczka Ildikónak. Szeretnék továbbá köszönetet mondani Brajnovits Brigittának a szélérőművek potenciális teljesítményének kiszámításához nélkülözhetetlen adatokért, Krüzselyi Ilonának pedig a felhasznált ALADIN modell adatokért. Szeretném még megköszönni Szentimrey Tamásnak, hogy megválaszolta az általa kifejlesztett szélprofilal kapcsolatos kérdéseimet, és elmagyarázta az adathomogenizációs eljárás alapvető funkcióit. Végül megköszönném Kiss Borbálának a nyelvi korrekcióban nyújtott segítségét.