

Hadnagy István

A FELSZÍNKÖZELI SZÉLMEZŐ
ENERGETIKAI JELLEMZÉSE KÁRPÁTALJÁN

Monográfia

SCREENED BY



Hadnagy István

**A FELSZÍNKÖZELI SZÉLMEZŐ
ENERGETIKAI JELLEMZÉSE KÁRPÁTALJÁN**

Monográfia



II. RF KMF – „RIK-U” Kft.
Beregszász–Ungvár
2023

ETO 621.548(477.87)

H 10

Az elmúlt évtizedben az ukrán energiaszektor szénhidrogén-mentessé tételében a szélenergia-felhasználás egyre nagyobb szerephez jutott. Az ország 2030-ig tartó energetikai stratégiájában a szélenergia ipar kapacitásbővítése terén, a déli és délkeleti tengerparti területek mellett, a nyugati országrész hátságaira és a Kárpátok régiójára került a hangsúly. A szélenergia hasznosítás folyamatában a helyi szélviszonyok és az alkalmazott energiaátalakító rendszer együttesen szabják meg az előállítható energiamennyiséget. A monográfiánk célja, hogy a meteorológiai állomások adataira alapozva átfogó képet nyújtsunk a szélmező statisztikai és energetikai sajátosságairól, szerkezetéről, lehatárolva azokat a területeket és időszakokat, amelyek Kárpátalján a szélenergia hasznosítás számára legalkalmasabbak lehetnek. A tudományos kiadványt kutatóknak, ágazati szakembereknek, döntéshozóknak, egyetemi és főiskolai oktatóknak, hallgatóknak, valamint a téma iránt érdeklődőknek egyaránt ajánljuk.

*Kiadásra javasolta a II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola
Tudományos Tanácsa (2022.05.24., 4. számú jegyzőkönyv).*

Kiadásra előkészítette a II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola Kiadói Részlege,
Fodor István Kutatóközpontja, valamint Biológia és Kémia Tanszéke.

Szerző:

Hadnagy István

Lektorálták:

Dr. Molnár József PhD, tanszékvezető, docens (Földtudományi és Turizmus Tanszék,
II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola, Beregszász)

Dr. Lázár István PhD, egyetemi adjunktus (Meteorológiai Tanszék, Földtudományi
Intézet, Természettudományi és Technológiai Kar, Debreceni Egyetem, Debrecen)

Dr. Csáky Imre PhD, egyetemi docens (Épületgépészeti és Létesítménymérnöki
Tanszék, Műszaki Kar, Debreceni Egyetem, Debrecen)

Műszaki szerkesztés és tördelés: *Dobos Sándor és Hadnagy István*

Korrektúra: *a szerző és Gricza-Varcaba Ildikó*

Borítóterv: *Hadnagy István és Vezsdel László*

ETO-besorolás: *a II. RF KMF Apáczai Csere János Könyvtára*

A kiadásért felel:

Dobos Sándor (a II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola
Kiadói Részlegének vezetője)

A monográfia tartalmáért a szerző a felelős.

A tudományos kiadvány tartalmát az „iThenticate”
online plágium-ellenőrző program segítségével ellenőriztük.

A monográfia megjelentetését a Magyar Tudományos Akadémia támogatta.

Kiadó: a II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola (cím: 90 202, Beregszász,
Kossuth tér 6. E-mail: foiskola@kmf.uz.ua) és a „RIK-U” Kft. (cím: 88 000 Ungvár,
Gagarin u. 36. E-mail: print@rik.com.ua)

Nyomdai munkálatok: „RIK-U” Kft.

ISBN 978-617-8046-94-1

© Hadnagy István, 2023

© II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola, 2023

TARTALOM

ELŐSZÓ.....	9
BEVEZETÉS	11
1. A MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOK SAJÁTOSSÁGAI ÉS A SZÉLENERGIA	15
1.1. A megújuló energiaforrások sajátosságai és a szélenergia	15
1.2. A megújuló energiaforrások felhasználása a világban, Európában és a Kárpát-medence országaiban	17
1.3. A szélenergia helyzete a világban.....	23
1.4. A szélenergia helyzete Európában.....	24
1.5. Ukrajna megújuló energia potenciálja és szélenergia ipara.....	25
1.6. Szélenergetikai kutatások áttekintése	35
1.6.1. A hasznosítható szél erő vizsgálata és feltérképezése.....	35
1.6.2. Kárpátalja szélklímája és szélenergetikai készlete, eddiggi kutatásának összefoglalása.....	41
2. A FELHASZNÁLT ADATOK ÉS ALKALMAZOTT MÓDSZEREK.....	49
2.1. A kárpátaljai meteorológiai állomások széladatai	49
2.2. A CarpatClim éghajlati adatbázis	52
2.3. A vizsgálatba vont meteorológiai állomások jellemzői.....	53
2.4. A szélsébség statisztikai és energetikai elemzése	59
2.4.1. A mért szélsébségek magassági korrekciója	59
2.4.2. Alapstatisztikai műveletek és a mért szélsébségek gyakorisági eloszlása.....	65
2.4.3. A mért szélsébség empirikus gyakorisági eloszlásának közelítése elméleti eloszlásokkal.....	66
2.4.4. Illeszkedésvizsgálat χ^2 próbával.....	71

2.4.5. A lineáris korrelációs együttható meghatározása	72
2.4.6. A lineáris korrelációs együttható szignifikanciája.....	72
2.4.7. A lineáris regressziós egyenes paramétereinek meghatározása.....	74
2.4.8. A szélteljesítmény meghatározása.....	74
2.4.9. A Weibull-eloszlás alkalmazása a szélteljesítmény becslésére különböző magasságokban	77
2.4.10. Egy adott időszak egy napjára átlagosan jutó fajlagos szélteljesítmény meghatározása közelítő függvénnyel	78
2.5. A szélirányok statisztikai, energetikai elemzése	80
2.5.1. A jellemző szélirányok meghatározása	80
2.5.2. A legnagyobb energiatartalommal bíró jellemző szélirányok meghatározása.....	81
3. A FELSZÍNKÖZELI SZÉLMEZŐ ENERGETIKAI JELLEMZŐI	83
3.1. A felszínközeli szélmező statisztikai jellemzése	83
3.1.1. A mérőállomások szélesebességeinek alapstatisztikai mutatói.....	83
3.1.2. Az átlagos szélesebességek térbeli eloszlása	86
3.1.3. Az éves, évszakos és havi szélesebességek jellemzői	88
3.1.4. A szélesebesség jellemzői a CarpatClim éghajlati adatbázis alapján.....	92
3.1.4.1. A mért és a CarpatClim éghajlati adatbázis adatainak összehasonlítása.....	95
3.1.5. A szélesebesség napi menetének jellemzői.....	97
3.1.6. A szeles napok statisztikai szerkezete	102
3.2. A napi átlagos szélesebességek gyakorisági eloszlása és azok közelítése valószínűségi eloszlásokkal.....	105
3.2.1. A Weibull-eloszlás alak- és skálaparaméterének elemzése	110

3.3. A napi átlagos szélesebségek gyakorisági eloszlása különböző magasságokban a Weibull-eloszlás alapján.....	115
3.3.1. <i>A szélesebségek statisztikai jellemzői különböző magasságokban.....</i>	117
3.3.2. <i>Az energetikailag hasznosítható szélesebségek időtartama különböző magasságokban.....</i>	122
3.4. A fajlagos szélteljesítmény különböző magasságokban.....	132
3.5. A havi átlagos fajlagos szélteljesítmény becslése közelítő függvény alapján	139
3.6. A mérőállomások szélesebség értékeinek területi elemzése.....	149
3.7. A szélirányok statisztikai, energetikai jellemzése	154
3.7.1. <i>A szélirányok empirikus relatív gyakorisága és a jellemző szélirányok.....</i>	155
3.7.2. <i>A szélirányok átlagsebességeinek jellemzői</i>	160
3.7.3. <i>A szélirányok relatív energiatartalma</i>	162
ÖSSZEFOGLALÁS.....	169
FELHASZNÁLT FORRÁSOK ÉS IRODALOM.....	175
FÜGGELÉK.....	199

ELŐSZÓ

A világ egyre inkább a fosszilis tüzelőanyagokat felváltó technológiákra és stratégiákra összpontosít. A megújuló vagy alternatív energiaforrások, például a szél- vagy a napenergia, amelyeket nemrégig még alig vettek számításba a modern energiaiparban, már versenyképesek a kőszénrel, földgázzal és kőolajjal. A megújuló energiaforrások költségei évről-évre csökkennek, míg a fosszilis tüzelőanyagok tartalékaik egyre fogynak és az új lelőhelyekről származó készleteket jelentősen nehezebb kitermelni, ami megnöveli azok árát. A fosszilis energiaforrások kora lejárni látszik és valószínűleg a történelem legnagyobb energetikai átállásának korszakában vagyunk.

A tendenciák azt mutatják, hogy a szélenergia az elkövetkező években a globális felmelegedés elleni kezdeményezések élvonalába tartozik majd, összhatását tekintve csak a hűtéssel kapcsolatos megoldások előzik meg. Természetesen a szélenergiának és minden megújuló energiaforrásnak is megvannak a maga korlátai, azonban a globális éghajlati, energetikai és gazdasági változás „szele” minden térséget érint, így Kárpátalját sem kerüli el. Az itt élőknek is mérlegelniük kell, hogy a jövőben miből kerül előállításra a mindennapi gazdasági, infrastrukturális és lakossági szférában szükséges és növekvő energiaigény: a fogyatkozó, sok üvegházhatású gáz kibocsátással járó és egyre dráguló kőszénből, földgázból, kőolajból, esetleg atomenergiából vagy a környezetet nagyságrendekkel kevésbé terhelő és egyben olcsóbb szél, napsugárzás, biomassa, földhő vagy áramló víz energiájának kitermeléséből.

A kiadvány bevezetőjében és első fejezetében illusztrált formában kerülnek bemutatásra a megújuló energiaforrások – azok között főként a szélenergia – sajátosságai, felhasználásának tendenciái a világban, Európában, Ukrajnában és Kárpátalján. A módszertani és eredményeket bemutató fejezetekben a kedves olvasó megismerheti a felszínközeli szélmező azon jellemzőit, amelyek Kárpátalján a szélenergia felhasználás tervezése és fejlesztése során hasznosak lehetnek a kitermelhető energia meghatározása és a legoptimálisabb telephelyek kiválasztása szempontjából.

A szerző ezúton szeretné kifejezni hálás köszönetét és nagyrabecsülését mindazoknak, akik a kutatómunka és a tanulmány elkészítése során segítségére voltak.

Köszönettel tartozom Dr. habil. Tar Károlynak, a Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszéke nyugalmazott egyetemi docensének a munka elkészítése során nyújtott segítőkész tanácsaiért, jóindulatáért, amit egész doktori tanulmányaim alatt is tanúsított felém. Szeretnék köszönetet mondani Dr. Lázár Istvánnak, a hasznos ötleteiért a klimatológiai adatfeldolgozásban. Köszönet illeti Bíróné Dr. Kircsi Andreát, a PhD képzés során nyújtott szakmai és emberi támogatásáért. Hálás szívvel mondok köszönetet Dr. Kohut Erzsébetnek, a II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola Biológia és Kémia Tanszéke vezetőjének, akinek jóindulata, segítőkész hozzáállása és biztatása sokat jelentett a doktori tanulmányaim elvégzése és a kézirat elkészítése során. Köszönet illeti Dr. Molnár Józsefet, aki felkeltette érdeklődésemet a meteorológia iránt és köszönöm mindenkori szakmai támogatását. Köszönöm Dr. Kolozsvári István és Dr. László Elemér baráti támogatását, szakmai tanácsaikat és a doktori tanulmányaim során nyújtott segítségüket. Köszönetet mondok a II. RF KMF Biológia és Kémia Tanszékén, valamint a Földtudományi és Turizmus Tanszékén dolgozó munkatársaimnak. Köszönettel tartozom Dr. McIntosh Richard Williamnek és Vrábel Tamásnak a monográfia alapját képező idegen nyelvű publikációk nyelvi lektorálásáért.

Hálasan köszönöm kedves szüleimnek, öcsémnek és rokonaimnak, akik biztosították számomra a szerető családi háttérrel és lehetővé tették a főiskolai és egyetemi tanulmányaimat.

Hálás és szeretetteljes szívvel mondok köszönetet feleségemnek, Krisztinának, kisfiaimnak, Istvánkának és Mátékának azért, hogy kedvesen viselték a tanulmányaim alatt és sokszor a monográfia megírása közben a hiányomat a családból. Köszönöm erőt adó biztatásukat, öleléseiket és szeretetüket.

Hálás szívvel mondok köszönetet Istennek, amiért megtartott, vezetett és Igéjével biztatott e célom elérésében is: „Megparancsoltam neked, hogy légy erős és bátor. Ne félj, és ne rettegj, mert veled van Istened, az Úr mindenütt, amerre csak jársz.” (Józs. 1,9).

Köszönetemet fejezem ki a kötet megjelentetéséhez nyújtott támogatásért a Magyar Tudományos Akadémia Domus Hungarica Programjának.

A szerző

BEVEZETÉS

A megújuló energiaforrások egyik legjobban felhasználható, leg-hatékonyabban megújuló eleme a szélenergia. A szélenergia hasznosítás lehetősége, módja, területe és mértéke döntő mértékben összefügg az – adott földrajzi helyen – uralkodó szélviszonyokkal, elsősorban a szélsé-besség nagyságával és állandóságával. A szélenergia hasznosítása egy olyan lehetséges energiatermelési mód, mely szerepe a beruházás meg-térülési idejével, az energiatermelés potenciáljával mérhető. A gazdasá-gosságának és tisztaságának köszönhetően a szélenergiát alkalmazó technológia gyorsan terjed és napjainkra a világ energiatermelési piacá-nak egyik „húzóágazatává” vált (GWEC 2021). Emellett az elmúlt két évtizedben a szélerőművek technológiai szempontból is jelentős fejlő-désen mentek keresztül, ez szembeűnő mind a szélerőművek méreté-ben, mind a teljesítményében. A Globális Szélenergia Társaság (Global Wind Energy Council – GWEC) adatai alapján elmondható, hogy a szélenergia hasznosítás teljesítménynövekedése az elmúlt két évtized-ben exponenciális. A következő évekre még ennél is erősebb növeke-dést jósolnak. A szélenergia elérhető forrásként nagyban hozzájárult sok ország energiatermelésének diverzifikálásához, energiabiztonságának növeléséhez és klímavédelmi kötelezettségvállalásainak betartásához.

A 2016-ban életbe lépett párizsi éghajlatvédelmi egyezmény (UNFCCC 2015) fő célja az éghajlatváltozás kedvezőtlen hatásaihoz történő alkalmazkodás képességének növelése, az éghajlatváltozással szembeni ellenálló képesség, és az alacsony üvegházhatású gázkibocsá-tással járó fejlődés elősegítése. A világ villamosenergia termelésének „dekarbonizálása” nemcsak környezetvédelmi szempontból kívánatos, hanem gazdaságilag is versenyképes megoldás lehet.

Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület legfrissebb AR6 (IPCC 2021) jelentése szerint ahhoz, hogy a felszínközeli évi átlaghő-mérséklet-emelkedés az iparosodás előtti értékhez képest 2050-re ne haladja meg a párizsi klímaegyezményben határértékként kitűzött 1,5-2 °C-ot, a század közepére minden országnak el kell érnie a nettó zéró üvegházgáz kibocsátást. E cél elérésében kulcsszerepet játszhat a szélenergia felhasználása, nem csak az áramtermelésben, hanem a hűtési-fűtési és a közlekedési szektorban is. A globális villamosener-gia termelés 7,0%-át 2020-ban már szélerőművek fedezték, és ez az

arány tovább növekszik (GWEC 2021). 2020-ra Európa villamosenergia-felhasználásának 16%-a származott szélenergiából, míg az Európai Szélenergia Szövetség (European Wind Energy Association – EWEA) várakozásai szerint 2030-ra akár 400 GW szélerőmű-kapacitás üzemelhet, mely közel 30%-át fedezheti Európa villamosenergia-igényének.

Ukrajna az elsők között ratifikálta a párizsi éghajlatvédelmi egyezményt, ezzel jelezve, hogy az állam hajlandó a megújuló energiaipar fejlesztésére, a nemzetgazdaság alacsony szén-dioxid-kibocsátású működési modelljének bevezetésére. Az elmúlt évtizedben az ukrán energiaszektor szénhidrogén-mentessé tételében a szélenergia felhasználás egyre nagyobb szerephez jutott. Az ország 2030-ig tartó időszakra vonatkozó Energetikai Stratégiájában a szélenergia felhasználás és kapacitás bővítés tekintetében, a déli és délkeleti tengerparti területek mellett, a nyugati országrész hátságaira és a Kárpátok régiójára fektették a hangsúlyt. Annak ellenére, hogy a hegyvidék jelentős szélenergia potenciállal rendelkezik a Kárpátok ukrainai részén 2021-ig csupán három, egyenként 10-20 MW teljesítményű szélerőmű park üzemelt. A szélenergia hegyvidéki területeken történő hasznosítása és további bővítése során a hálózatra termelő egységek mellett a kis- és közepes szigetüzemű rendszerek kiépítése is perspektivikus lenne, főleg a hegyvidék azon részein, ahol központilag nincs kiépített elektromos és telekommunikációs hálózat, így a mindennapi életben csak az ilyen alternatív energiaforrások jelentik az esélyt többek között a külvilággal történő kommunikáció vagy egészségügyi ellátás kérésének módjára. Az országban a 20 kW-tól kisebb teljesítményű szélturbinák telepítése nincs semmilyen építési engedélyhez vagy licenzálási okmányhoz kötve (Chumanenko et al. 2015).

Kárpátalja geológiai szerkezetének, éghajlatának, vízrajzának, növénytakarójának, főleg az értékes erdőinek köszönhetően a megújuló energiaforrások széles körével rendelkezik. Ezek közül a hegyvidéki területek jelentős szélenergia potenciálját kell megemlítenünk (lásd: *1. függelék*). A szélenergia hasznosítás folyamatában a helyi szélviszonyok és az alkalmazott energia-átalakító rendszer együttesen szabják meg a kinyerhető energia mennyiségét. A kitermelhető szélenergia meghatározását a meteorológiai állomások és a helyszíni mérések szeladatainak statisztikai vizsgálatával és modellszámításokkal lehet elvégezni. E feladat elvégzéséhez azonban hosszú adatsorokra van szükség

nagy területi felbontással. Ezek hiányában csupán elméleti becslési módszerekre támaszkodhatunk.

Mindezek ismeretében fogalmazódik meg a kérdés, hogy Kárpát-alján hol és milyen mértékű szélpotenciállal kell számolnunk? Az említett energiastratégiai és földrajzi tényezők tükrében a felszínközeli szélmező energetikai jellemzésének jelentős gyakorlati haszna lehet Kárpátalján. Ezért a munkánk során az alábbi célokat fogalmaztuk meg:

- jellemezni a meteorológiai állomások szélsébség idősorainak statisztikai mutatóit, a szélsébségek éves, évszakos, havi és napi menetét;
- elemezni az empirikus szélsébségeloszlások szerkezetét, azok elméleti eloszlásokhoz való illeszkedését;
- előállítani a szélsébség eloszlásokat a mérés magasságától eltérő szintekben is;
- meghatározni az energetikailag hasznosítható szélsébségek ($3 \leq v < 25$ m/s) időtartamát;
- jellemezni az egyes extrémumok, pl. a szeles napok ($v_{napi\ max.} \geq 10$ m/s) menetének statisztikai szerkezetét;
- meghatározni az éves, évszakos fajlagos szélteljesítményt különböző magasságokban;
- elemezni az egyes szélirányok empirikus gyakorisági eloszlását, átlagsebességét, relatív energiatartalmát és azok különböző időszakokra vonatkozó menetét;
- meghatározni a jellemző és az energetikailag uralkodó szélirányokat;
- kimutatni a szélmező tulajdonságaiban esetlegesen megjelenő orográfiai hatásokat.

A meteorológiai mérőállomások adatait felhasználva jellemezzük a szélmező statisztikai és energetikai sajátosságait, szerkezetét, lehatárolva azokat a területeket és időszakokat, amelyek kárpátaljai viszonylatban a szélenergia hasznosítás számára a legalkalmasabbak lehetnek.

1. A MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOK SAJÁTOSSÁGAI ÉS A SZÉLENERGIA

1.1. A megújuló energiaforrások sajátosságai és a szélenergia

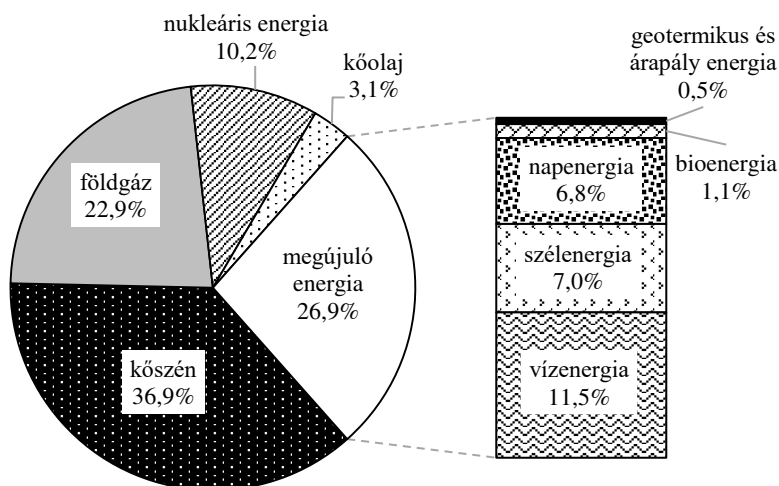
A megújuló energiaforrás megnevezés olyan elsődleges energiahordozókat (közeget, anyagot vagy természeti jelenséget) takar, amelynek hasznosítása közben a forrás nem csökken, hanem újratermelődik, megújul, vagy hosszútávon lehetőség van egy adott területről ugyan olyan jellegű energiát ugyanolyan mennyiségben kinyerni (Bohoczky 2004). Főbb típusai a következők: a Napból származó napenergia, amelynek közvetett felhasználása közé tartozik a bioenergia, a vízenergia, a szélenergia és a hullámenergia, továbbá a Föld belső hőjéből származó geotermikus energia, illetve a Nap és a Hold gravitációs ereje révén előidézett árapály-energia. A megújuló energia előnye a fosszilis energiaforrásokkal szemben, hogy nem fenyeget a készletek kimerülésének veszélye, mivel a források hosszabb-rövidebb ciklus alatt képesek újratermelődni. A megújuló energiafelhasználás önmagában nem jelenti a teljes emissziómentes és környezetbarát működést. Alkalmazásuk, a természetes környezetbe való beavatkozás, az élőhelyek zavarása (hidrológiai viszonyok megváltoztatása, nagy területek leárnyékolása, vonulási útvonalak akadályozása, zajterhelés, talajtakaró bolygatása), a tájesztétikai vonatkozások és a termelő egységek telepítési és karbantartási technológiai és logisztikai hátterének biztosítása tekintetében számos környezeti problémakört vet fel. Mindezek mellett a megújuló energiaforrások környezetszennyező hatása a fosszilis és magfúziós energiahordozókhoz képest lényegesen kisebb (Spellman 2014). A fosszilis energiaforrások égetéséből üvegházhatású gázok (pl. szén-dioxid, dinitrogén-oxid, metán) és más légszennyező anyagok (pl. savas ülepedést okozó kén-dioxid) keletkeznek. Az éghajlatváltozás fő felelősei az energiatermelés és a közlekedés, együttesen az antropogén üvegházhatású gázkibocsátás 45%-át adják (IPCC 2021). Összehasonlítás képen: a fosszilis források vagy az atomenergia alkalmazásával 10-50-szer annyi üvegházhatású gázt bocsátunk ki egységnyi energia előállításakor, mint a megújuló energiákkal (WEC 2021).

időskálája miatt a megújuló energiaforrások közül a vízenergia, a biomassza és geotermikus energia hasznosítása kevésbé körülményes a nap- és szélenergia alkalmazásához képest. Mind a nap- és mind a szélenergiát hasznosító villamos energiát termelő erőművek villamosenergia-rendszerbe illesztése kihívás az energiaforrás időjárás függő változékonysága miatt. Az ipari méretű szélerőművek, környezetvédelmi és költségelőnyeik miatt nagy számban jelennek meg és csatlakoznak a hálózatra. A szélerőgépek gyűjtőfelülete függőleges, ezért a berendezés helyigénye alig számottevő. A több 10-100 berendezés csoportos telepítése révén létrejövő szélfarmok által elfoglalt területnek gyakorlatilag 99%-a érintetlen marad. A kiszolgáló létesítményeket (pl. utakat) beszámítva is a kieső összes terület nem haladja meg az 5%-ot (Patay 2003).

1.2. A megújuló energiaforrások felhasználása a világban, Európában és a Kárpát-medence országában

A világ összes primer energiatermeléséből a megújuló energiaforrások 26,9%-kal részesednek (IEA 2021, IRENA 2021), ezen belül a szélenergia 7,0%-kal rendelkezik (1.2. ábra). Csak a megújuló energiaforrásokat figyelembe véve a vízenergia után a szélenergia a második helyen van, részaránya a megújulók között 26,2%. A szélenergia, különösen az offshore alkalmazásai révén még hatalmas lehetőségeket rejt. A GWEC (2021) jelentése alapján a világszerte telepített teljes szélerőmű kapacitás 95%-a (707,4 GW) volt onshore (szárazföldi) és 5%-a (35,3 GW) offshore (tengeri). Európai viszonylatban ez az arány 89% (194,1 GW) és 11% (24,8 GW) volt 2020-ban. A legnagyobb offshore szélerőmű kapacitással rendelkező országok a világon: Egyesült Királyság 10,2 GW-al (a teljes offshore kapacitás 29%-a), Kína 9,9 GW (28%) Németország 7,8 GW (22%), Hollandia 2,5 GW (7%), Belgium 2,2 GW (6%) és más országok összesen 4,2 GW (18%).

A napenergia, bioenergia (fa, növényi olaj, biodízel, bioetanol, biogáz, biomassza-elfolyósítás (BtL-hajtóanyagok)), a geotermikus energia és a hullám- és árapály-energia a világ összes primerenergia-termelésében 8,1%-kal vesznek részt.



1.2. ábra. Az összes primer energiatermelés megoszlása (%-ban) energiaforrások szerint a világban 2020-ban

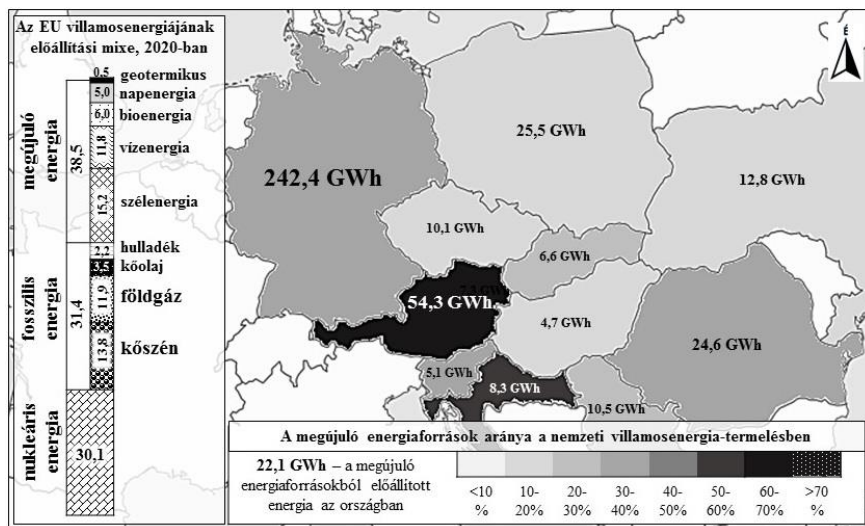
Forrás: saját szerkesztés az IEA 2021 és az IRENA 2021 adatai alapján

Az európai energiamixben a megújuló energiák egyre fontosabb szerepet töltenek be (1.3. ábra). A robbanásszerű növekedést a gyorsan zuhanó technológiai költségek hozták meg, 2010 óta a napenergia technológia költségei 75%-kal csökkentek, a szél pedig 66%-kal. Az Európai Unió (EU) villamosenergia előállításában a megújulók 38,5%-kal vesznek részt. Nagy különbségek vannak a tagállamok között: Hollandiában és Ausztriában 76-78%-át, Svédországban 68%-át, Portugáliában 59%-át teszik ki a megújulók, de csak 17%-át Lengyelországban, 15%-át Magyarországon, 12%-át Csehországban vagy alig 5%-át Luxemburgban és Máltán. A megújuló szektor nagy „munkaadó” lett az EU-ban, amely több mint 1,5 millió munkahelyet kínált 2018-ban. Az egy főre jutó állások tekintetében a megújuló szektorban a világon ötödik helyen áll, Kína, az Egyesült Államok, Japán és Brazília mögött. A legtöbb, megújuló szektorban létrejövő munkahely a szél, a nap és a biomassza alszektorokhoz köthető, mivel az utóbbi években ezek a technológiák estek át leggyorsabban a globális növekedésen és drasztikus költségsökkenésen (Bertram – Primova 2018). A század közepére az EU 80%-al szeretné csökkenteni az üvegházgáz kibocsátását (IEA, 2021, REN21 2021). A párizsi klímaegyezményben (UNFCCC 2015) 2016-ban az iparosodás előtti

értékhez képest 1,5-2 °C-os maximális átlaghőmérséklet-emelkedést fogalmaztak meg. Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC, 2021) legfrissebb AR6 jelentése szerint ahhoz, hogy egyáltalán elérhető legyen a 1,5 °C fokos határ, 2050-re minden országnak el kell érnie a nettó zéró üvegházgáz (különösen a CO₂) kibocsátást. A nettó zéró kibocsátás azt jelenti, hogy egy ország (város, cég, épület, stb.) annyi üvegházhatású gázt bocsát ki, amennyit el is nyel. Ahhoz, hogy az EU ezt elérje, a megújulók arányának jelentősen növekednie kell, nem csak az áramtermelésben, hanem a hűtési-fűtési és a közlekedési szektorban is. A 2005/2015-ös összehasonlításban az EU 16,7%-al csökkentette az üvegházgáz kibocsátását, miközben a megújuló energiák részesedése az energiatermelésben 7,7%-al, a GDP pedig 10,6%-al nőtt. A megújulók kapacitásnövelése segítette az EU-t, hogy 15%-kal csökkentse a fosszilis tüzelőanyagok felhasználását 2005 óta, és 2013-hoz képest ma 35%-kal kevesebb fosszilis tüzelőanyagot importál. A megújulók főleg a szenet és a földgázt váltották fel. A megújulóval helyettesített fosszilis energia 50%-át teszi ki a szén és 28%-át a földgáz (Bertram – Primova 2018). A kőolaj kiváltása eddig kevésbé volt sikeres, mivel a megújulók egyelőre nincsenek széleskörűen használva a közlekedésben, ahol továbbra is az olaj a fő üzemanyag.

Az EU-ban a megújuló energia felhasználás között első helyen áll a széleenergia (15,2%), a második helyen a vízenergia (11,8%), ezt követi a bioenergia (6,0%), a napenergia (5,0%), végül a geotermikus energia és egyéb (hullám-, árapály-) megújuló energiaforrások felhasználása (0,5%). A Kárpát-medencét érintő országokat tekintve a természeti adottságokhoz határozottan kötődő megújuló energiafelhasználás Ausztriát és Horvátországot kivéve csekély mértékű és arányú (1.3. ábra). Összehasonlítás képen, Németországot, Lengyelországot és Csehországot is bevonva látható, hogy a megújuló energiafelhasználás részaránya a térségben átlagosan kevéssel az EU-s érték alatt marad, mintegy 31,6%, azonban széles skálán mozog az országok között: Ausztriában 79,3%, Horvátországban 60,8%, míg Ukrajnában 12,3%, Csehországban pedig 11,3% (IRENA 2021). A klimatikus különbségek következményeire is figyelve megfogalmazható, hogy az energia-felhasználás mértéke főleg a gazdaság szerkezeti jellemzőivel és az ország technikai-műszaki felkészültsé-

gével függ össze (Bank 2008). Az 1.3. ábrán a történelmi fejlődési pálya eltérő sajátosságai is megmutatkoznak. A tájak eltérő primerenergia potenciáljának módosító hatása csak alig-alig érhető tetten. Ez arra utal, hogy sokkal inkább a globalizációs folyamatok lenyomatai a jelenlegi elsődleges energia-felhasználási jellemzők, és csak másodrangú befolyásoló tényezők a tájak eltérő természeti adottságainak következményei. Ezt bizonyítja a megújuló energiaforrásokból előállított energia abszolút értékei az egyes országokban.



1.3. ábra. A megújuló energia felhasználás aránya a nemzeti villamosenergia-termelésben a Kárpát-medence és Közép-Európa egyes országaiban, 2020-ban

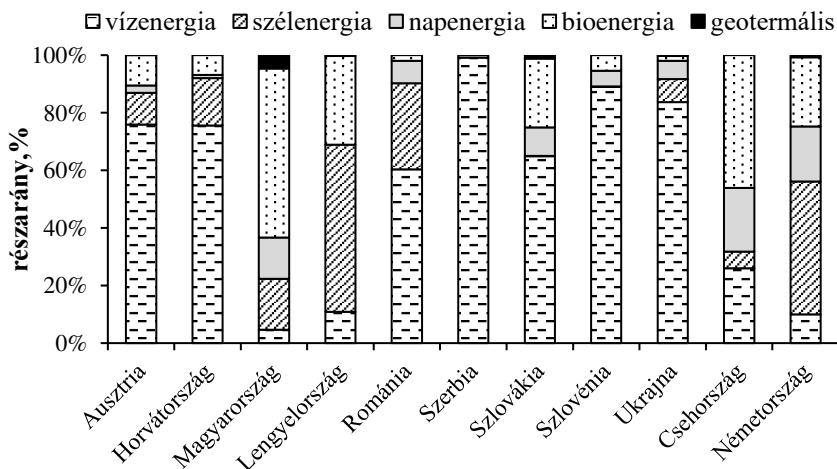
Forrás: saját szerkesztés az IEA 2021 és az IRENA, 2021 adatai alapján

Ha a megújuló primer energiaforrások főcsoportjait is külön megvizsgáljuk (1.4. ábra), a Kárpát-medencében kitűnik a vízenergia túlsúlya, felhasználásának részaránya a nemzeti villamosenergia-termelésben 75,9% (Ausztria) és 0,8% (Magyarország) között van. Kézenfekvő helyzet ez a domborzati adottságok alapján, mert a víz-erőművek a Kárpát-medence természetes határát képező hegyvidékekről a medence erózióbázisa irányába lefutó folyók vízének mozgási energiájára épültek. A Kárpát-medencebeli fekvése miatt Magyarország a vízenergia szempontjából nem tartozik a kedvező adottságú területek közé, a potenciálisan felhasználható vízenergia mennyisége

nem éri el az évi 100 MWh/km² értéket sem (WEC 2004). Itt viszont a biomassza felhasználás az, amely a megújuló energiaforrások hasznosításában élen jár, miközben abszolút értéke roppant csekély. Ausztria az az ország, amely a legtöbb fajtáját hasznosítja a megújuló energiáknak, hiszen a víz és a biomassza mellett a szélenergia is jelentős beépített kapacitással hasznosul. A Global Wind Atlas (lásd: *1a, 1b és 1c. függelék*) alapján elmondható, hogy Kárpát-medence belsejében éghajlati szempontból a szélenergia felhasználás legperspektivikusabb területeit Alsó-Ausztriában és Magyarország észak-nyugati részén (a Kisalföldön) találjuk. Ezt igazolják Tar (1991a), Radics (2004), Truhetz et al. (2012) által elvégzett vizsgálatok is. A magyar Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ 2017a) szélesebb térképén 10 m magasságban a Kisalföldön és a Dunántúli-középhegységben, helytől függően 4-6 m/s átlagsebességű szelek fújnak. A medence orográfiai zártsága miatt a belső területeken az 1-3 m/s-os sebességű szelek a maximális gyakoriságúak, 2000-2500 órán át tartanak, mely az évnek csaknem egynegyede (Bartholy – Radics 2000b). 13 magyarországi mérőállomást figyelembe véve a Kékestető kivételével minden állomáson az 1-2 m/s-os szelek a leggyakoribbak (20-40%) a legkisebb átlagsebességű hónapban. A rendelkezésre álló szélteljesítmény 10 m-es szinten az országban 23 W/m² (Nagykanizsa) és 158 W/m² (Szombathely) között változik. A jellemző átlagos mennyiségek 30-40 W/m² körül vannak (Bartholy – Radics 2000b). Ennél nagyobb szélesebséggel és szélenergia potenciállal bírnak a medencét körül szegő nyitott, 1000 m fölé emelkedő hegygerincek, például: Kárpátalján a Borzsa-havas (4,9 m/s – 270 W/m²) és Csornohora (3,5 m/s – 130 W/m²) (Hadrnag – Tar 2019b), Erdélyben a Háromszéki-havasok (4,9 m/s) (Lázár 2015), Felvidéken a Gömör-Szepesi-érchegység (4,0 m/s) (Galbičková et al. 2014). A Kárpát-medence országaiban és az említett közép-európai államokban a szélenergia felhasználás részaránya a nemzeti villamosenergia termelésben a következő képen alakul: Németország 17,2%, Románia 11,5%, Horvátország 10,0%, Ausztria 8,8%, Lengyelország 7,5%, Magyarország 2,3%, Ukrajna 2,1%, Szerbia, Szlovákia és Szlovénia 0,5% alatti értékkel rendelkezik. Az EU-s átlagot (15,2%) a felsoroltak közül csupán Németország múlja felül. Az országon belüli megújuló energia felhasználás részarányaiban a harma-

dik helyen a bioenergia áll. A térségben a nagyobb felhasználó országok: Németország, Magyarország, Ausztria. Ezt követi a napenergia, amely alkalmazása terén 7,1%-os részaránnyal a térségben szintén Németország az élenjáró, ezt követi Románia (3,0%-kal) és Csehország (2,6%-kal). Bár sokkal kedvezőbb napsugárzási jellemzőkkel bír a medence középső és déli része (Dél-Magyarország, Horvátország és Szerbia), ahol a vízszintes felszínre érkező éves globálisugárzás eléri az 1300-1500 kWh/m²-t (SolarGIS 2014), mégis a napenergia felhasználásának részaránya az energiatermelésben 2% alatt van.

A legkevésbé alkalmazott a geotermikus és egyéb (hullám- és árapály) energia, amelyhez igen specifikus természeti adottságok szükségesek. A geotermikus energia felhasználás szempontjából európai viszonylatban is kedvező geológiai sajátosságokkal rendelkeznek a medence belső, alföldi területei, ahol a hőenergia biztosítására, elérhető mélységekben vannak a magasabb hőmérsékletű termálvizet adó rétegek. Magyarországon a geotermikus gradiens az átlagosnál nagyobb (45-50 °C/km), továbbá az ország területének több mint 70%-án rendelkezésre áll a földhő közvetítő közegeként a termálvíz (vagy más néven hévíz, mely definíció szerint a 30 °C-ot meghaladó hőmérsékletű rétegvíz) (Hurter – Schellschmidt 2003).

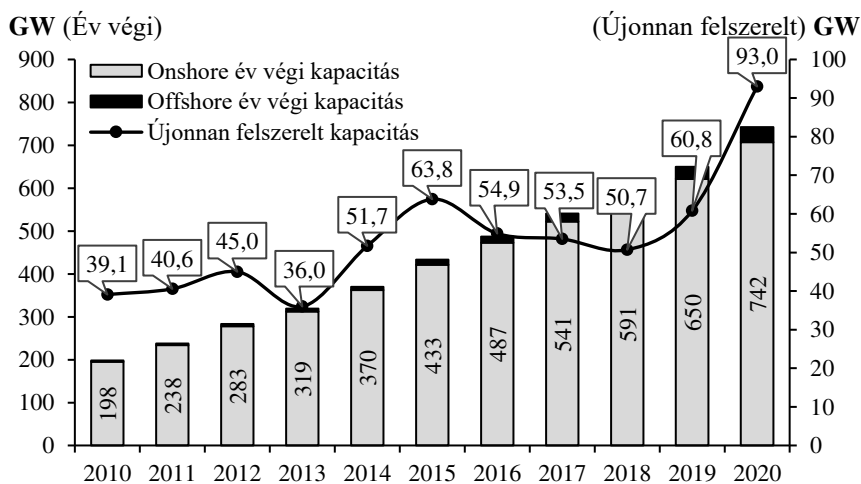


1.4. ábra. A megújuló energia felhasználás forrásösszetétele a Kárpát-medence és Közép-Európa egyes országában, 2020-ban

Forrás: saját szerkesztés az IEA 2021 és az IRENA, 2021 adatai alapján

1.3. A szélenergia helyzete a világban

A szélenergia ember által történő felhasználása több ezer éves múltra tekint vissza. Mégis az elmúlt négy évtized volt az, amikor mint megújuló energiatípus – a fenntartható energiatermelés egyik alternatívája – igen intenzív kutatás-fejlesztés tárgya lett. Ez az 1980-as évektől napjainkig tartó időszak a szélenergia hasznosítás modernizációjának időszaka (Patay 2003, Welch – Venkateswaran 2009). Jelenleg a szélenergetika a vezető, leggyorsabb növekedést, legnagyobb kapacitásbővülést produkáló energetikai technológia a világban. Jelentős technikai és telepített kapacitásbeli ugrás a 2000-es évektől volt megfigyelhető. Az utóbbi 20 év alatt a világszerte telepített szélenergia kapacitás közel 65-szörös növekedést produkált (EurObserv'ER 2020), így a GWEC adatai alapján (1.5. ábra) a világ összességét szélenergia kapacitása 2020 végére elérte az 742,0 GW-t (GWEC 2021), 2001-ben ez az érték csupán 24,0 GW-t volt. A szélenergetikai beruházások eredménye képpen 2020-ban 93,0 GW-al bővült a világon üzembe helyezett szélenergia kapacitás, ez 14,2%-os rekordnövekedést jelentett az előző évről képest, az évente újonnan üzembe helyezett kapacitás terén pedig 53%-os gyarapodás könyvelhető el (REN21 2021).



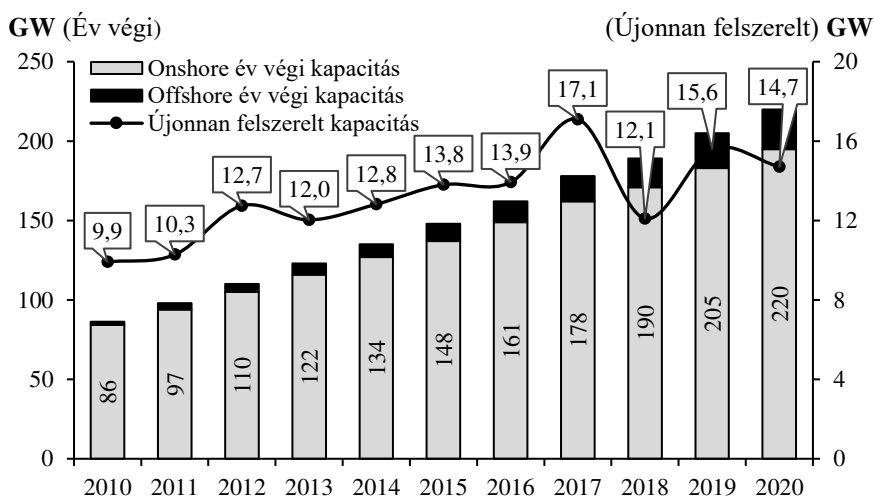
1.5. ábra. A világszerte telepített teljes szélenergia kapacitás (GW) alakulása 2010–2020 között

Forrás: saját szerkesztés a GWEC 2021 adatai alapján

Ha a világot a beruházások szempontjából régiókra bontjuk, azt tapasztalhatjuk, hogy a beruházások száma és a szélerőmű parkok összteljesítménye Ázsiában (382,0 GW, ebből 336,3 GW onshore és 10,4 GW offshore) a legnagyobb. A tíz legnagyobb kapacitással rendelkező ország közül 2 (Kína – 288,2 GW és India – 38,6 GW) is itt található (GWEC 2021, WWEA 2021). A következő régió Európa (218,9 GW, ebből 194,1 GW onshore és 24,9 GW offshore). Csak az Európai Unió országai (EU-27) mintegy 179,1 GW szélerőmű kapacitással rendelkeznek (REN21 2021), amelyből Németország 62,8 GW-al, Spanyolország 27,3 GW-al, az Egyesült Királyság 24,1 GW-al, Franciaország 17,9 GW-al és Olaszország 10,9 GW-al rendelkezik (EWEA 2021). A régiók sorában a következő Észak- és Dél-Amerika (211,8 GW, ebből 169,8 GW onshore és 42,0 GW offshore). Ebből 164,3 GW-al az Amerikai Egyesült Államok, 17,8 GW-al Brazília és 13,6 GW-al pedig Kanada részesedik). Ezt követi Ausztrália és Óceánia (7,5 GW), és végül Afrika és a Közel-Kelet (7,3 GW) zárja a sort (GWEC 2021). A 2020-as évben több mint 90 ország látott el szélenergia termelési és kereskedelmi tevékenységet, ebből 36 ország rendelkezik több mint 1 GW teljesítményű szélparkkal (WWEA 2021).

1.4. A szélenergia helyzete Európában

Az Európai Szélenergia Szövetség (EWEA) jelentése szerint Európában 2020-ban 14,7 GW új szélturbina-kapacitást helyeztek üzembe, ez a világon átadott kapacitás 15,8%-a. Az összesített kapacitás 14,7%-os növekedést felmutatva 2020 végére elérte a 220,0 GW-ot (1.6. ábra), ami a világ kapacitásának 29,7%-a (EWEA 2021). Európában található a világviszonylatban öt legnagyobb kapacitással rendelkező ország közül kettő: Németország és Spanyolország, amelyek a kontinensen működő szélturbinák kapacitásának a 40,9%-át birtokolják, ez összesen 90,0 GW-ot jelent (GWEC 2021, EWEA 2021). Az utóbbi 10 évben, Európában az évenként üzembe helyezett új kapacitás 9,9 GW és 17,1 GW között változott (1.6. ábra). Ukrajna részesedése az Európában telepített szélerőmű kapacitásból csupán 0,6%, amely 1,2 GW-ot tesz ki (UWEA 2021).



1.6. ábra. Az Európában telepített teljes szélerőmű kapacitás (GW) alakulása 2010–2020 között

Forrás: saját szerkesztés az EWEA 2021 adatai alapján

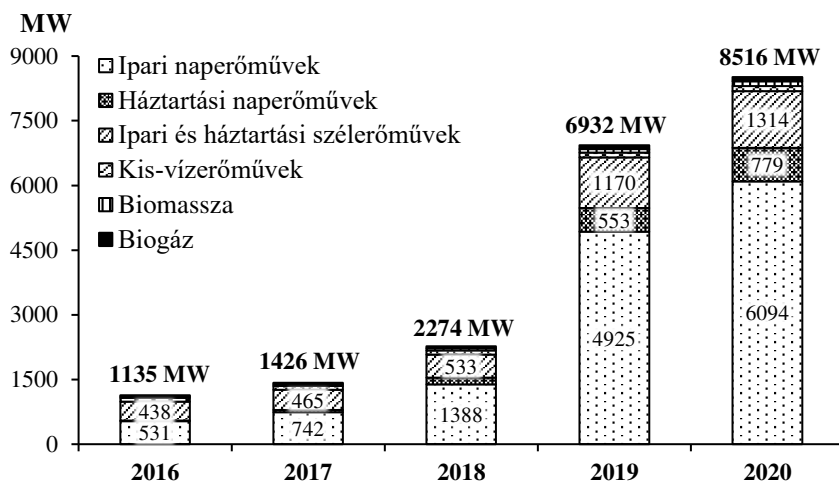
1.5. Ukrajna megújuló energia potenciálja és szélenergia ipara

Az energiaipar – Ukrajna gazdaságának báziságazata, amely a szén, a földgáz, az olaj- és olajszármazékok elégetésén, valamint az atom- és vízenergia hasznosításán alapszik (Prodius 2009). Az országban előállított villamos energia mennyisége 2020-ban 148,6 milliárd kWh volt (21,1%-al kevesebb, mint 2010-ben, akkor 189,0 milliárd kWh volt). Az energiatermelés csökkenésében a 2014 márciusában elkezdődő kezdődő kelet-ukrajnai háborús konfliktus is szerepet játszott, mivel ez jelentősen súlytotta a Donyec-medence iparvidékét. Itt található az ország legfontosabb kőszén lelőhelye, illetve az erre épülő több hőerőmű is. A megtermelt elektromos áram 51,2%-át atomerőművek, 26,6%-át hőerőművek, 8,6%-át kommunális hő/áramtermelő központok, 5,0%-át nagy- (10 MW-tól nagyobb kapacitású) és kis- (10 MW-tól kisebb kapacitású) vízerőművek, 7,3%-át szél- és napenergiát, illetve biomasszát felhasználó erőművek, 1,2%-át egyéb áramtermelő egységek állították elő (UWEA 2021).

A Miniszteri Kabinet 2006. március 15-én elfogadta „Ukrajna Energetikai Stratégiáját a 2030-ig tartó időszakra”, amely szerint kiemelt jelentőséget szeretne adni a megújuló energiatermelésnek

(Ukrajna energetikai stratégiája 2013, Haidayenko 2013). Bevezetésre került az ún. zöld tarifa, amely olyan speciális energiaátvételi díjtétel, melyen az alternatív energiaforrásokat felhasználó elektromos energiát termelő objektumoktól történik az energia megvásárlása. A legtöbb európai országban a zöld tarifát a kilencvenes évek elején vezették be, Ukrajna Legfelsőbb Tanácsa csak 2009. április 1-én módosította az elektromos energetikáról szóló törvényt, melynek alapján bevezette a zöld tarifa alkalmazását és ezzel meghatározó lendületet adott a megújuló energia felhasználás fejlődésének az országban (Prutka – Fedyk 2012, Haidayenko 2013, Kurbatova et al. 2014, Pivnyak et al. 2015, Hadnagy et al. 2020). Azonban 2021. július 1-én sajnálatos módon Ukrajnában elfogadásra került egy olyan törvény (Ukrajna Törvénye: 01.07.2020 № 810-IX), amely kimondja a zöld tarifa csökkentését a megújuló energiaforrások tekintetében. A 2015. június 1-től 2019. december 31-ig üzembe helyezett szél-erőművekben termelt elektromos áramért az állam 7,5%-al, a 2020. január 1-től működőktől pedig újabb 2,5%-al kevesebb átvételi díjat fizet. Ez a jövőre nézve egy kedvezőtlen üzenet lehet, többek között az ukrán szélenergia-ipar külföldi befektetőinek.

A 2020-as év végére az országban zöld tarifával működő csak megújuló energiaforrást felhasználó létesítmények száma 25429 (1290 ipari és 24139 háztartási) volt, amelyek összkapacitása (1.7. ábra) elérte a 8516 MW-t. A 2020-as évben országszerte több mint 5000 új, megújuló energiát használó objektum kezdte meg a működését (Derzhhefektynosti 2021). A legintenzívebb fejlődés az ipari és háztartási naperőművek telepítése terén tapasztalható, amelyek együttes összkapacitása az utóbbi 5 évben 11,5-szeres növekedést mutatott. Ezt követik a szél- és a kis-vízerőművek (kevesebb mint 10 MW kapacitású vízerőművek), a biomasszával és a biogázzal működő energiatermelő egységek gyarapodása. A zöld tarifával működő csak megújuló energiaforrást felhasználó erőművek által generált elektromos áram mennyisége 2020-ban 10,862 milliárd kWh volt. A legtöbb elektromos áramot az ipari és háztartási naperőművek állították elő, mintegy 6,605 milliárd kWh-t. Közel felét, mintegy 3,251 milliárd kWh-t pedig szél-erőművek segítségével. Ezek együtt adták a megújuló energiaforrásokból megtermelt energia 91%-át. A további 9% a biogázt használó egységek (7%) és a kis-vízerőművek (2%) között oszlik meg.



1.7. ábra. A „zöld” tarifával működő megújuló energiaforrást felhasználó objektumok összkapacitásának változása Ukrajnában, 2016–2020 között

Forrás: saját szerkesztés a Derzhfektynosti 2020 adatai alapján

Ukrajna az elsők között lett tagja a 2016-ban életbe lépett párizsi éghajlatvédelmi egyezménynek, ugyanis Ukrajna Legfelsőbb Tanácsa még 2016 júliusában elfogadta a párizsi megállapodás ratifikálásáról szóló 0105. sz. törvényt. Ez azt jelzi, hogy az állam készen áll a megújuló energiaipar fejlesztésének új szakaszára, nevezetesen arra, hogy a nemzetgazdaság orientált legyen egy alacsony szén-dioxid-kibocsátású működési modellre. A Legfelsőbb Tanács 2016. május 10-én kelt 200/2016-os rendeletében lefektette az IRENA-hoz (Nemzetközi Megújuló Energia Ügynökség) való csatlakozáshoz szükséges követelmények teljesítését (IRENA 2015). Az Európai Unió a megújuló energiaforrások felhasználásának aránya tekintetében a 2009. április 23-i 2009/28/EK irányelv alapján 2020-ra elérendő 20%-os célkitűzést vezetett be. Bár Ukrajna nem tagja az Európai Uniónak, de 2010-ben csatlakozott (Ukrajna Törvénye: 15.12.2010 № 2787) az európai Energia Közösséghez (Energy Community) és így az ország vállalása 2020-ra a megújuló energiafelhasználás terén 11% volt, 2030-ra pedig 19%.

A másodlagos energiaforrásokból (víz, szél-, nap-, geotermia és biomassza) termelt energia az energiafogyasztás 12,3%-át elégíti ki, ebből a szélenergia 2,1%-al részesedik (UWEA 2021). Ukrajna 2030-ig

tartó energetikai stratégiájában 2020-ig a szélenergia részarányát a primerenergia-termelésben 3,0%-ra tervezték, közel 2000 MW telepített kapacitással. Ez a cél kétharmad részben teljesült is. A távlati célok és irányszámok szintén pozitívak, mivel 2030-ra 4,5-6%-ra (3000-4000 MW) becsülik a szélenergia részét az országos energiatermelésben (Ukrajna energetikai stratégiája 2013). Polishhuk (2010) és Prutska – Fedyk (2012) szerint az ország teljes szélenergia készlete 30 milliárd kWh/év, Kudrya et al. (2001), a REU (2011), illetve Pivnyak – Skrabets (2013) szerint 41,7 milliárd kWh/év. Ezt a potenciált felhasználva a teljes energiafogyasztás 19-27%-át lehetne biztosítani csak szélenergiából.

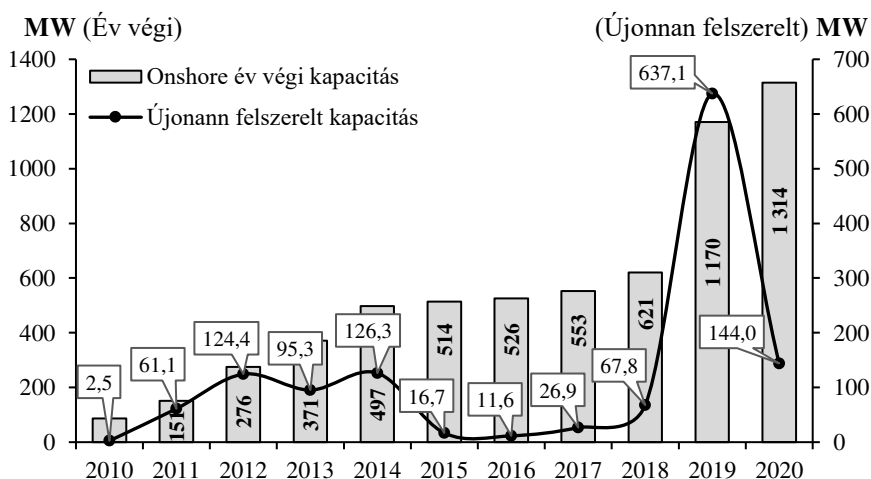
A szélenergia ipar fejlesztéséhez – a szélesebbesség tekintetében – legmegfelelőbb területek azok, ahol a széljárás közel egyenletes, azaz a szélesebbesség értékeknek minél kisebb a szórása és a szélesebbeségek átlaga az adott szélturbina ú.n. indító sebességénél nagyobb (Sembery – Tóth 2004). A modern, főleg ipari szélturbinák esetében az indulási sebesség (cut-in speed) gyakran a 3 m/s-ot jelenti, amikor a szélturbina automatikusan bekapcsol és a rotor körbejárásával elkezdődik az áramtermelés. Ukrajna területén a mai szélerőművek jó hatásfokú elektromos energiatermeléséhez kedvező feltételek adóttak: a Fekete- és Azovi-tenger partvidékén, az Ukrán-Kárpátok magasabban fekvő részein, a Podóliai-hátság és a Donyeci-hátság területén, illetve a Krím-félszigeten, azaz az ország déli, délkeleti, középső és hegyvidéki régióiban. Az északi, észak-nyugati régiók (Polisszja), a hegyvidéki folyóvölgyek és a Kárpátaljai-alföld szélesebbeségeivel a szélerőművek már csak korlátozottan működhetnek (Velychko 2003, Dmytrenko – Barandich 2007, Prodius 2009, Ozarkiv et al. 2009, Polishhuk 2010, Raihenbah 2010, Ivus et al. 2009, 2010, Petruk 2011, Byba – Chmyr 2013, Makarovskiy – Zynych 2014, Pivnyak et al. 2015, Moskalchuk – Pryhodko 2017, Hadnagy et al. 2020, Oshurok 2020).

A szélenergia felhasználás tekintetében de Renzo (1982) érdekességként említi, hogy áramtermelési célból először 1937-ben, a Krím-félszigeten (1954-től lett Ukrajna része) telepítettek szélturbinákat, amelyek összkapacitása majdnem elérte a 100 kW-ot és egészen 1942-ig működtek, mígnem a második világháború alatt azokat le nem rombolták. Majd egy félévszázad elteltével Ukrajnában 1997-ben kezdődött meg a modern szélerőművek telepítésének programja (Ozarkiv et al. 2009). A Miniszteri Kabinet 1996. március 2-án kiadott 159. sz. „Szélerőművek építéséről” szóló határozata alapján kidolgozás-

ra került és 1997. február 2-án életbe lépett egy komplex állami program a szélerőművek építéséről és a megtermelt elektromos áram villamos-energetikai hálózatba való integrálásáról. A tervek alapján 2010-re az üzembe helyezett szélturbinák teljes kapacitása el kellett volna érje az 1990 MW-ot (Pivnyak et al. 2015). Ez az akkori fejlettebb európai országok mércéjével is merész cél nyilvánvalóan nem teljesült.

Az utóbbi években azonban a befektető országok érdeklődése az ukrán szélenergia-szektor felé fordult. Az elsődleges beruházó országok között szerepel: Németország, Lengyelország, Litvánia, Törökország és Kína. A további befektetések elősegítése érdekében 2015-ben a Dán Energia Ügynökség támogatásával elkészült Ukrajna megújuló energetikai és energiahatékonysági projektjeinek összefoglaló térképe a UAMAP 2.0 (UAMAP 2017).

Az ország a 34. a világ nemzetei között a szélenergiát előállító országok ranglistáján (GWEC 2021). Ugyanígy európai viszonylatban a 19. helyen áll (EWEA 2021). A telepített szélerőművek összes teljesítménye elérte 2020 végére elérte a 1314 MW-ot (1.8. ábra). Az újonnan felszerelt szélturbinák 2019-es rekordéve (637,1 MW) után 2020-ban csupán 144,2 MW új kapacitás lett telepítve.



1.8. ábra. Az Ukrajnában telepített teljes szélerőmű kapacitás (MW) alakulása 2010–2020 között

Forrás: saját szerkesztés az EWEA és UWEA adatai alapján

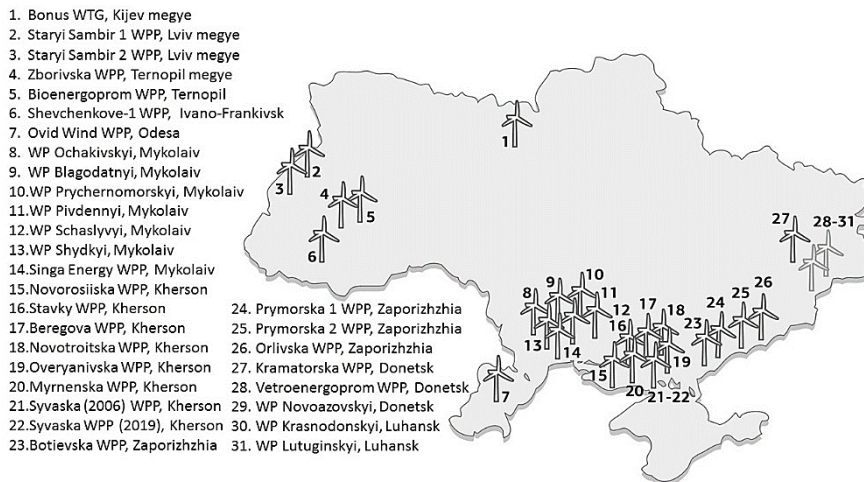
Összehasonlításként a szomszédos országok közül csak Lengyelország (6,6 GW) és Románia (3,1 GW) szélerőmű kapacitása haladja meg Ukrajnáét (IRENA 2021). Magyarországon 2012-től napjainkig nem építettek újabb szélerőműveket, a Magyar Szélerőenergia Ipari Társaság adatai szerint 2019 végéig 0,329 GW van üzembe helyezve (MSZIT 2019). A további szomszédos országok (Oroszország (0,933 GW), Fehéroroszország (0,101 GW), Moldova (0,027 GW) és Szlovákia (0,004 GW) szélturbináinak összkapacitása európai viszonylatban igen alacsony értéket mutat (IRENA 2021, GWEC 2021).

Ukrajnában 2020-ban 30 szélerőműpark működött, amelyek közül a legnagyobbak a Botievska (199,9 MW), a Myrnenska (163 MW), Syvaska (101,4 MW), Prymorska 1-2 (99,5 és 99,5 MW), Orlivska (98,8 MW), Novotroitska (72,6 MW) (UWEA 2021). A szélerőművek túlnyomó része a potenciálisan nagy szélerőenergia-kapacitással rendelkező területeken összpontosul. A szélklimatológiai adottságok függvényében többségük az ország délkeleti, déli részében, azaz a tengerparti megyékben (oblaszty) található (*1.9. ábra*). A keleti országrészben, az immár több mint fél évtizede fennálló politikai és katonai viszonyok miatt a jó széljárás ellenére sem kedvezett az új beruházások kivitelezésének, így azóta egyre több szélerőmű park jelent meg a nyugati megyékben, azon belül főként az Előkárpátok vidékén.

A telepített kapacitásból 1176,1 MW található Ukrajna kontinentális területén (UWEA 2021), illetve 138,1 MW a Donyeci és a Luhanszki terület háborús konfliktus által érintett részein van. A Krímfélsziget Oroszország által való annektálása a Krími Autonóm Köztársaság területén megállította a szélerőenergia ipar további fejlődését, így az ott telepített szélerőmű kapacitás 2013-tól változatlan maradt és mintegy 87,8 MW (UWEA 2021).

A több mint 600 működő szélturbina típusait tekintve elmondható, hogy többségében modern, a „megawattos” osztály képviselői vannak telepítve: 50%-ban a Vestas (V47, V112, V136), 35%-ban a Fuhrländer (FWT FL 2500), 10%-ban a WTU-sorozat (2.0, 2.5, 3.2, 3.3, 3.5) és az Enercon (E70) turbinái működnek. A fennmaradó 5%-nyi kapacitást, más kisebb egység-kapacitású szélturbinák (Turbowinds T600-48, USW56-100, Bonus, NORDEX N43/600) alkotják, illetve a Krímen üzembe helyeztek Unison 2,0 (egyenként 2,0 MW) típusú turbinákat is (Chumanenko et al. 2015, UWEA 2021).

Ukrajna szélörmú parkjai 2020-ban



1.9. ábra. A telepített szélörművek területi eloszlása Ukrajnában 2020-ban

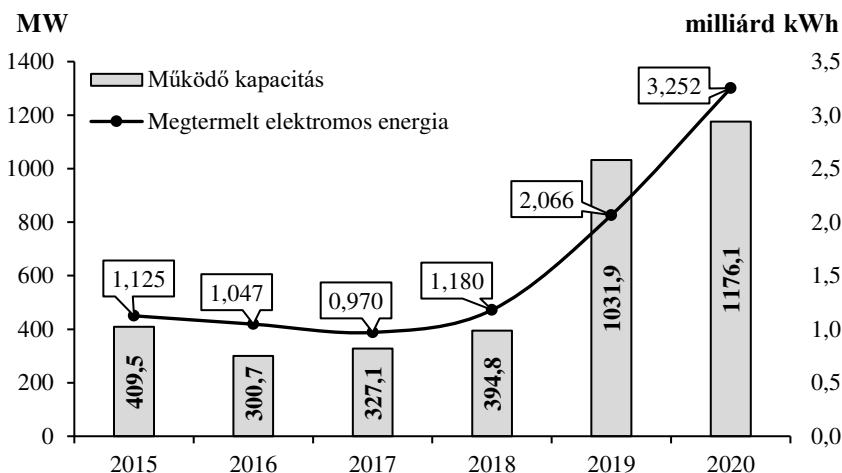
Forrás: saját szerkesztés az UWEA 2021 adatai alapján

A szélörművek által termelt villamos energia mennyisége az elmúlt években jelentősen növekedett, míg 2009-ben csupán 41,4 millió kWh volt (Kurbatova – Khlyap 2015), 2020-ban elérte a 3,252 milliárd kWh-át (1.10. ábra), amelyet az ún. zöld tarifa szerint vettek át (UWEA 2021). A szélből termelt elektromos áram 2020-ban elegendő volt 650 ezer (500 kWh havi áramfogyasztással rendelkező) háztartás áramszükségletének biztosításához.

A szélenergia felhasználás fontos szerepet játszik az ukrajnai gazdaság dekarbonizációjában és így a klímavédelem terén tett nemzetközi kötelezettségvállalásának teljesítésében is. Az elmúlt évben a szélenergetikai iparágak köszönhetően mintegy 2,6 millió tonnával sikerült csökkenteni az ország CO₂ kibocsátását és egyben 322 ezer m³ földgázt sikerült ezzel megtakarítani (UWEA 2021). Az ukrán szélenergia-ipar elmúlt években tapasztalt sikeres történetében először 2020-ban volt érzékelhető a befektetői szándék megtorpanása. Ennek oka egyrészt a pandémia hatásaiban, másrészt az ország energiapolitikájának egyes aspektusában keresendő (UWEA 2021).

A Krím-félszigeten található nap- és szélörművek, az előbb említett okok miatt, az ország energetikai rendszerébe (ОЕСУ – Об'єднана енергетична система України [Ukrajna villamosenergia-átviteli rend-

szerel] 2014 áprilisától nem táplálnak villamos áramot. Illetve 2017-ben az ország keleti részén folyó háborús konfliktus miatt veszélybe került további két Luhanszk megye és egy Donyeck megye területén működő szélpark üzemeltetése is.

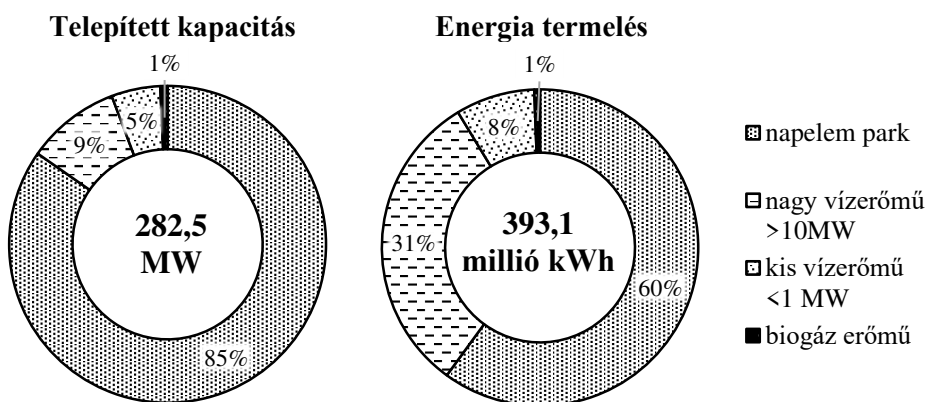


1.10. ábra. A telepített és működő szélerőművek összkapacitása (MW) és azok által megtermelt elektromos energia (milliárd kWh) Ukrajnában

Forrás: saját szerkesztés az UWEA 2021 adatai alapján

Leszűkítve a megújuló energiaforrások felhasználásának ukrajnai kérdéskörét Kárpátaljára, elmondható, hogy a megye elméleti megújuló energetikai potenciálját – azt a fizikailag rendelkezésre álló energiamennyiséget, amely a megújuló energiaforrásokból kinyerhető – 45 milliárd kWh/év-re becsülik (Kudrya et al. 2001), ez az ukrajnai potenciál 8,5%-a és ezzel a 24 ukrajnai megye között a második helyen áll (Oleiko – Strelbitska 2011). Bashynska – Hamkalo (2018) szerint ebből a műszaki potenciál – amely a rendelkezésre álló technológiák segítségével valójában kitermelhető – 30 milliárd kWh/év. Az erőforrás mennyiségének további szűkítését a gazdaságossági feltételektől tehetjük függővé, és azokat a műszakilag megvalósítható technikai megoldásokat soroljuk ide, amelyek jövedelmező megoldást jelentenek, vagyis megvalósításuk gazdaságilag is indokolt. Ez az ún. gazdasági-társadalmi potenciál. Ez többszörösen felülmúlja a megye szükségleteit, mivel Kárpátalja energiaszükséglete közel 2 milliárd kWh/év. Kárpátalja

energiahatékonysági és energiatakarékossági programjában (a 2016-2020-as évekre) azt olvashatjuk, hogy a megye elméleti műszaki megújuló energetikai potenciáljának 34%-át a vízenergia, 26%-át a geotermikus energia, 22%-át a biomasszából kinyerhető energia, 9%-át a szélből, 5%-ot a környezetből (a levegő hője, talajhő, stb.) ki-termelhető energia és 4%-át a napenergia adja. A megyében található – megújuló energiaforrásokra épült – mintegy 67 termelő egység erőművi teljesítménye 282,5 MW volt 2020-ban (1.11. ábra). A teljes kapacitás 85%-át 52 napelem park (239,3 MW), 9%-át 1 nagy vízerőmű (27,0 MW), 5%-át 9 kis vízerőmű (14,1 MW) és 1%-át 2 biogáz erőmű (2,1 MW) teszi ki. Az ezek által megtermelt elektromos energia 393,1 millió kWh volt, ami a megye teljes energiafogyasztásának mind-össze 18-20%-a. A legtöbb energiát a napelem parkok termelték, mint-egy 236 millió kWh-át, a megújulókból előállított teljes energia 60%-át. További 123,0 és 31,8 millió kWh-át, azaz 31% és 8%-ot a nagy és kis vízerőművek adtak. A biogázzal működő létesítmények 2,1 millió kWh-val járultak a megye elektromos energiatermeléséhez.



1.11. ábra. A különböző megújuló energiát felhasználó erőmű kapacitás (MW) és azok által megtermelt elektromos energia (millió kWh) Kárpátalján

Forrás: saját szerkesztés a KMA 2020 adatai alapján

Annak ellenére, hogy az országban a szélenergia ipar fejlődik, Kárpátalján egyetlen ipari szélpark sem működik. Pedig Ukrajna megújuló és hagyományos energiaforrásai energetikai potenciáljának atlaszában (Kudrya et al. 2001) a rendelkezésre álló teljes szélenergia

készlet alapján Kárpátalja, az ukrainai megyék (24) között a hatodik helyet foglalja el. Megemlítendő, hogy 2019-ben a Kárpátaljai Megyei Állami Adminisztráció Ökológiai és Természeti Erőforrások Szakosztálya (KMÁAÖTESZ 2019) részéről elkészült egy környezeti hatástanulmány, amely a Borzsa-havason tervezett 120 MW összteljesítményű szélerőmű park megépítését vizsgálta. A mintegy 34 szélerőmű a Temnatik (1342 m), a Mejszelina (1300 m), a Pláj (1330 m) és a Velikij Verh (1598 m) lekerekített, füves hegycsúcsokon és az azokat összekötő hegygerinceken lett volna telepítve. A projekt megvalósítása a megyében erős társadalmi és természetvédelmi ellenállásba ütközött (Derevska 2019).

Az eddig elvégzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a kárpátaljai hegyvidék egyes részei jelentős szélenergia potenciállal bírnak (Osadchyi et al. 2014, 2015, Mandryk 2016, Moskalchuk – Pryhodko 2017, Moskalchuk 2017, Hadnagy – Tar 2018; Hadnagy – Tar 2019a, 2019b, Hadnagy et al. 2020, Oshurok 2020). Bár ezt jóval felülmúlják a terület víz- és geotermális energia készletei. Ezen kívül nem hagyhatjuk figyelmen kívül a hegyvidék egy másik értékes erőforrását – az erdőket. A kiterjedt fenyőerdőkön kívül a Kárpátok ösbükkősei (WWF, 2020) 185 km hosszan húzódnak a Rahói-hegységtől és a Csornohorai-masszívumtól a Havasi-vonulaton keresztül a szlovák-lengyel határig, a Bukovské vrchy és a Vihorlát-hegységig. Összterületük 77971,6 ha, melynek 70%-a Kárpátalja területére esik. Az itt elhelyezkedő ösbükkös erdők a UNESCO világörökségéhez tartoznak. A megye területének 52,6%-a erdővel borított és 15,1%-át védett területek foglalják el (KMÁAÖTESZ, 2016). Tehát a szélklimatológiai szempontból alkalmas területeken a szélerőművek telepítése előtt szükséges lenne elvégezni a vonatkozó szakirodalom (Fiskus 2005, Csikós – Szilassi 2015) által felsorolt szélerőmű telepítést kizáró szempontok (védett természeti területek, erdők, állóvizek, folyók, beépített és lakott területek, közlekedési hálózat, energia hálózat és ezek bufferzónái) térinformatikai elemzését. Makarovskiy – Zinych (2014) megállapításai szerint a telepítést kizáró szempontok alapján Ukrajna összterületének 27%-a, míg Kárpátalja területének 25%-a (3211 km²) nyitott terület a szélerőművek építésére.

A felsorolt eredmények, amelyeket Ukrajna az utóbbi egy évtizedben elért a megújuló energiaforrások és azon belül a szélenergia fel-

használás terén természetesen sok szempontból dicséretesek és biztatóak a jövőre nézve is. Azonban napjainkra nyilvánvaló az a tény, hogy az egyes országokban a megújuló energiaforrások felhasználásának elterjedtségét és szerepét nem csupán a helyi klímában, vízháztartásban vagy geológiai szerkezetben rejlő adottságok, hanem a különféle szabályozási mechanizmusok – elsősorban a gazdasági eszközök, a támogatási rendszerek – határozzák meg döntő mértékben. Ezzel magyarázható, hogy példának okán, a beépített turbina kapacitás tekintetében – korántsem ideális szélklímájuk ellenére – Németország és Spanyolország nemcsak Európa, de a világ vezető két országa. Annak ellenére, hogy Ukrajna kedvező természeti feltételekkel rendelkezik a megújuló energiaforrások gazdaságos és sokoldalú felhasználásához sajnos az ország jelentős lemaradásban van mind világ- és európai viszonylatban e téren (Rozhko 2007, Prutska – Fedyk 2012, Stoiko – Koinova 2013, Shkuridin 2014).

1.6. Szélenergetikai kutatások áttekintése

1.6.1. A hasznosítható szélerő vizsgálata és feltérképezése

A szél időben és térben rendkívül változékony energiaforrás, így mennyisége nehezen meghatározható. A hasznosítható széleenergia potenciált a szélesebb viszonyok és számos korlátozó tényező is befolyásolja. Pontos adatok hiányában, a rendelkezésre álló széleenergia tér- és időbeli mennyiségét különféle módszerek és alkalmazások (statisztikai becslések, modell-alkalmazások, geoinformatikai programok) segítségével lehet közelítően megadni (Tar 1991a).

A klimatológiai szakirodalom sokoldalúan foglalkozik a hasznosítható szélerő kutatásokkal. A legkülönbözőbb földrajzi helyekről, a teljesség igénye nélkül, példákat: Nfaoui et al. 1998 (Marokkó), Torres et al. 1999 (Spanyolország), Milligan et al. 2003 (USA), Youm et al. 2005 (Szenegál), Leithead 2007 (Egyesült Királyság), Keyhani et al. 2010 (Irán), Hammar 2011 (Tanzánia és Mozambik), Gunturu – Schlosser 2012 (USA), Hou et al. 2012 (USA, Észak-Dakota), Olaofe – Folly, 2012 (Dél-afrikai Köztársaság), Özgönenel – Thomas 2012 (Törökország), Saleh et al. 2012 (Egyiptom), Xydis 2012 (Görögország), Ahmed et al. 2013 (Nigéria), Sopian – Khtib 2013 (Malajzia), Carrillo et al. 2014 (Spanyolország), Figueroa-Espinoza – Salles 2014 (Mexikó), Khan et al. 2014 és Azad et al. 2014 (Banglades), Maklad – Glencross-

Grant 2014 (Új-Dél-Wales, Ausztrália), Özgür 2014 (Törökország), Dokur – Kurban 2015 (Törökország), Ozay et al. 2016 (Törökország), Rasham 2016 (Irak), Lee et al. 2018 (USA), Francis – Nalamutt 2019 (India), Boutelli et al. 2019 (Algéria) stb. munkáiban találunk.

Ukrajnai viszonylatban szintén találunk a hasznosítható szélerő feltérképezésével és felszínközeli szélmező tulajdonságainak vizsgálatával foglalkozó tanulmányokat. A szakirodalmi áttekintés során eddig említettekén kívül számunkra érdekes még Kravchyshyn et al. (2016) munkája, akik Drohobics, Aszkanyija-Nova és Ivano-Frankivszk szélesebességeinek gyakorisági eloszlását közelítették gamma-, Weibull- és lognormál-eloszlásokkal. Megállapították, hogy az első két állomáson a gamma-, míg a harmadikon a Weibull-eloszlás adta a legjobb közelítést. Hasonló munkát végeztek el Kostohrizova et al. (2014) Kijev esetében, ahol évszakos bontásban is vizsgálták az eloszlások illeszkedését. Smerdov – Bulba (2011) Poltava példáján, egy automata meteorológiai állomással 4 hónapon át 10 és 30 m magasságban mért szélesebesség adatok felhasználásával meghatározták a Hellmann-féle hatványkitevős összefüggés α paraméterének értékét, ami 0,18 volt és a Weibull-eloszlás k (2,2) és c paramétereit. Sobchenko – Khomenko (2015) hét mérőpont (Lemberg, Kijev, Odessza, Krivij Rih, Szimferopol, Dnyipropetrovsk és Donyeck) 2001-2008-as széladatait vizsgálva megállapította, hogy a fajlagos szélteljesítmény 70 W/m^2 (Lemberg) és $135 \text{ (Odessza) W/m}^2$ között változik, illetve a Weibull-eloszlás k paramétere 1,36 (Lemberg) és 1,7 (Odessza), a c paramétere 2,74 (Lemberg) és 4,81 (Szimferopol) között változik az ország területén.

Agapova (2016) az ukrajnai megyék (oblaszty) megújuló energiaforrásai potenciáljának térképezését végezte el az ArcGIS program segítségével. A térképsorozatok között megtalálható több megyéről készült széltérkép is, amelyeken ábrázolja: az évi átlagos szélesebesség területi eloszlását (10, 50 és 100 m-en), a fajlagos szélteljesítményt és a hasznosítható szélesebességek időtartamát. A széltérképek elkészítéséhez a 2005-2014-es időszak adatait használták fel. Achkasova – Tretyakov (2009) térinformatikai (GIS-alapú) alkalmazások és a WindFarm szoftver segítségével végezték el a Harkivi területen a szélesebesség területi eloszlásának modellezését és publikálták az ezt bemutató térképet.

Oshurok (2020) a felszínközeli szélmező jellemzőit vizsgálta Ukrajna területén, több mint 200 meteorológiai állomás, 1981–2010 közötti

időszakra vonatkozó mérési adatait felhasználva. A kutatás tárgya fő tárgya a szél sebességének és irányának térbeli és időbeli eloszlása és a szél energiapotenciáljának meghatározása volt, különösen az összetett felszínnel rendelkező területeken. Erre a célra az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA) által kifejlesztett CALMET (California Meteorological Model) mezoskálájú diagnosztikai szélmodellt alkalmazta. A modell szimulációkat 1 éves periódusban futtatta (2007) 2,5 km-es vízszintes térbeli felbontást használva a földfelszín felett 10, 40, 80, 120, 160 és 200 m magasságokban. A függőleges szélprofil számítása során $z_0=0,1$ m érdességi magasságot használt. Országosan összesen 25, nagyjából egy ukrainai megye területének megfelelő téglalap alakú területen alkalmazta a CALMET-et. Az átfedésben lévő területek harmonizációja után elkészítette a szélesebesség (3-25 m/s), a szélerősség (szélenergia-potenciál) térbeli eloszlását bemutató térképeket. A modellt különböző domborzattal, felszínborítással és tájtípusokkal rendelkező területek meteorológiai állomásainak empirikus adataival verifikálta. E felszíni mérőpontok (összesen 12) Kijev megye, Dnyipropetrovszk megye, Kárpátalja és a Krím-félszigeten helyezkednek: az északi elegyes erdők övéből (Szarni, Csernyihiv), az erdősztyeppből (Vinnyica, Szumi), a sztyeppről (Mikolajiv, Donyeck, Miszove), a Kárpátok övéből (Ungvár, Plaj, Ökörmező) és a Krími-hegységből (Aj-Petri, Nikitszkij Szad). A modellszimulációs becslései és a meteorológiai adatfeldolgozásból kapott eredményei szerint Ukrajna területének nagy részén 10 m felszín feletti magasságban a szélesebesség elegendő a kisméretű szélturbinák megfelelő kihasználásához (lásd: *2a és 2b. függelék*). Gazdaságilag ésszerű megfontolni a háztartási igények kiszolgálására a kisüzemi generátorok alkalmazását az Előkárpátokban és völgyeiben, a Krím-félsziget déli partvidéken, az ukrán Polisszja nagy részén, ahol a fajlagos szélteljesítmény átlagosan 30 W/m^2 alatt van. Perspektivikus helyszínek az 1 MW-nál nagyobb névleges teljesítményű nagy turbinák telepítésére a Kercs- és Tarhankut-félszigeten, a tengerhez közeli tengerparti területeken, Zaporizzsja és Donyeck megyében, a Donyeci-, a Podóliai- és Volinyi-hátságok magasabb térszínein, illetve a Kárpátok és Krím-hegység gerincein és csúcsain. Megállapítja, hogy az átlagos éves fajlagos szélteljesítmény ezeken a területeken 80 m magasságban meghaladja a 200 W/m^2 -t, 200 m-en pedig 350 W/m^2 -t. Különösen a hegyvidéken

azonban viszonylag gyakoriak a legtöbb szélturbina ún. cut-out szélsébség tartományába (>25 m/s) eső szelek, amelyek korlátozottan hasznosíthatók és előfordulásuk esetén az erőművet – az üzemi biztonság érdekében és a töréskár elkerülése végett – le kell állítani. Az eredményei nagy jelentőséggel bírnak a szélerőművek optimális helyszíneinek kiválasztása szempontjából Ukrajnában.

Külön megemlítenénk a Kárpát-medence belső területeire, főként Magyarországra vonatkozó szélklimatológiai vizsgálatokat, amelyek igen széles spektrumot fednek le. A rendelkezésre álló *komplex statisztikai elemzések* (Tar 1983, Wágner – Papp 1984, Tar 1984, 1991a, 1999, Makra et al. 2000) részletesen vizsgálják és leírják a kérdéskört. Emellett nem hagyhatjuk figyelmen kívül a különböző *spekulatív becslések* eredményeit sem. Ezzel kapcsolatban Vajda (1999) fogalmazott meg egy érdekes gondolatmenetet, miszerint a légmozgásokban megtestesülő mozgási energia a légkör alsó rétegének, a troposféra teljes energiájának csupán kis része, mégis hatalmas teljesítményt, mintegy 1,5 PW-ot képvisel. Gyakorlati kiaknázására csak az alsó 100-200 m-es réteg jöhet számításba, vagyis mindössze 1%, azaz 15 TW. Ennek 20%-a jut a szárazföldekre. Ez az érték Magyarország területére vonatkoztatva 1,8 GW (Tar 2004a), Ukrajna területére 12,1 GW, míg Kárpátalja területére (12800 km^2) 257,7 MW.

Egy szélerőmű vagy akár egy szélpark szakszerű tervezéséhez és telepítéséhez a rotortengely magasságában mért szélvektor adatsorra van szükség. A gyakorlatban azonban az ilyen magasságban történő mérések ritkák, mert megvalósításuk technikai akadályokba ütközik, és rendkívül drága. Schrempf (2007) az *energetikai célú szélmérőrendszer* kialakítását vizsgálta, amely az egyik kiinduló pontja egy adott területen rendelkezésre álló, a szélerőművek üzemeltetéséhez szükséges energiamennyiség, azaz az adott terület szélpotenciáljának becslésében.

A magyarországi felszínközeli szélmezőben rejlő *potenciál elemzésével*, becslésével többen is foglalkoztak. Keveiné Bárány (1991) az Alföld szélerő potenciálját tanulmányozta. Koppány (1989) a budapesti magaslégköri megfigyelések alapján (1929-1953) meghatározott átlagos szélsébség és a normál légkör sűrűségének magasság szerinti változásaiból arra következtetett, hogy egy 500 m magas dombtetőn több, mint 11-szer nagyobb fajlagos szélteljesítmény nyerhető, mint a síkságon. Ugyancsak Koppány (2009) szerint Magyarország területe

fölött a 60 m és 120 m közötti rétegben átlag 5 m/s sebességgel áramló levegő teljesítménye 465 TW. Ebből a szélerőművek által hasznosítható egy ezrelék 465 GW. Hunyár (2004) a széleenergia potenciál hasznosítását korlátozó tényezőket elemezte. A szélteljesítmény meghatározásának egy módszeréről olvashatunk Tar (1991a, 2006, 2008a), Tar – Kircsi (2001), illetve Tar – Szegedi (2011) munkáiban. A módszert az éves és az évszakos napi átlagos szélteljesítmény meghatározására dolgozták ki, melynek lényege, hogy a szélesebesség-köbök napi átlagos menetét egy függvénnyel közelítették és a görbe alatti területet számolták ki, ugyanis a szélteljesítmény ezzel a területtel arányos. A módszer előnye, hogy kiküszöböli a mérési időpontok számától való függést.

A széleenergia becsléséhez a helyszíni mérések és az energetikai célú statisztikai elemzések mellett vagy helyett szükség van *matematikai-fizikai modellek* adaptálására is. A szélesebesség és a rendelkezésre álló széleenergia, fajlagos szélteljesítmény területi extrapolációját számos modell kínálja viszonylag olcsó megoldásként. A nehézséget az olykor igen bonyolult és összetett szerkezetű felszín leírása jelenti, ami a felszíni szélmező energetikai paramétereire jelentős hatással lehet (Kircsi 2004). A modellalkalmazásokat illetően magyarországi alkalmazások, tapasztalatok már rendelkezésre állnak, de Kárpátalja vonatkozásában sajnos még ilyenekről nem beszélhetünk. A szél területi interpolációjához használható egyik legnépszerűbb modellek egyike a dán fejlesztésű WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), amelyről olvashatunk Radics (Radics 1999, Radics – Bartholy 2002, 2005) és Bartholy (Bartholy – Radics 2000a, Bartholy – Radics 2000b, Bartholy – Radics 2001, Bartholy et al. 2003) munkáiban. A WAsP a mért széladatok horizontális és vertikális extrapolációjára szolgáló, Jackson és Hunt elméletére alapozott, lineáris, spektrális modell (Mortensen et al. 1993), melynek felhasználásával készült az Európai Unió finanszírozásában, a dán Risø Nemzeti Kutatólaboratórium kiadásában a 80-as évek végén megjelent Európai szélatlász (Troen – Petersen 1989) is.

Ha a domborzat áramlásmódosító hatása elhanyagolható, akkor az érdesség változást figyelembe vevő belső határréteg modellek, mint a WAsP, jó megoldást jelentenek. Komplex domborzatú helyszínek esetén azonban a turbulencia szempontjából dinamikus megközelítés lehet alkalmasabb. Bíróné Kircsi et al. (2011, 2012a, 2012b) a Hernád-völgyi szélpotenciál felméréséhez a norvég VECTOR AS által fejleszt-

tett CFD (Computational Fluid Dynamic) analízisen alapuló szélfarm tervező eszközt, a WindSim-et alkalmazták. A programcsomag alapját a PHOENICS program adja, amely egy 3D Reynolds átlagolású Navier-Stokes egyenlet (RANS – Reynolds-averaged Navier-Stokes equation) megoldó alkalmazás (Castro et al. 2003, Lopes et al. 2007). A moduláris felépítésű modell több lépcsőben jut el a domborzat által befolyásolt átlagos szélesebbség térbeli eloszláshoz, amely végeredményben meghatározza a kiválasztott szélenergia hasznosító berendezés várható energiatermelését.

Megemlítenénk még az magyar Országos Meteorológiai Szolgálatnál rövidtávú előrejelzéshez használt ALADIN modellt, melynek segítségével Szépszó et al. (2006) a magyarországi szélklimát vizsgálták az 1992–2001 közötti időszakban. A vizsgálathoz az ECMWF ERA-40 re-analízis adatait használták fel, melyeken dinamikailag leskálázást hajtottak végre, hogy elérjék a szélmező előállításához szükséges finom felbontást. Végeredményül a tízéves időszakra különböző magassági szintekre vonatkozó 5 km-es felbontású átlagszél-térképeket állítottak elő.

Magyarországi vonatkozású a KMPAM (Komplex Multifaktoros Poligenetikus Adaptív Modell) (Rózsavölgyi 2007) klímaorientált modell, melynek segítségével a szélenergia hasznosításának lehetséges helyszíneit vizsgálták a kutatás során.

A részletes szélklimatológiai vizsgálatokhoz, illetve a szél energiájának hasznosításához többféle léptékű információ feldolgozására van szükség, mivel a légkör mozgásjelenségei horizontálisan és vertikálisan, valamint időben is széles tartományban értelmezhetők. Biróné Kircsi (2007, 2008) végzett nagytérségű szélklimatológiai vizsgálatokat az NCEP/NCAR re-analízis projekt 50 éves, az északi negyedgömbre vonatkozó meridionális és zonális szélvektorok napi adatsorából.

A felsorolt alkalmazások eredményeként Magyarország területére már több modell-becslésen, szimuláción nyugvó széltérkép is elkészült (Radics 2004, Kertész et al. 2005, OMSZ 2017a). Hasonló geometriájú eredmények születtek különböző alapokon nyugvó számításokkal is, melyek így bizonyos mértékig egymás verifikációi. A térképek különböző magasságokra készültek el, a felszíni érdekesség és a domborzat okozta zavaró hatások figyelembe vételével. A magasabb szintek vizsgálata során többen is (Rózsavölgyi 2007, Baranka et al. 2001) azt ta-

pasztalták, hogy ismerve a planetáris határréteg tulajdonságait (Foken 2008) – annak változását a magasságnövekedéssel – könnyebben elvégezhetők a számítások, elemzések. Magyarországon a 60 m-nél magasabb régiókban már nem okoz jelentős zavaró hatást a felszíni érdesség, az árnyékoló objektumok hatása e felett már nem szignifikáns (Wieringa 1976, 1983, Kircsi 2004).

Mindezek mellett meg kell említenünk a *távérzékelési technikák* sorába illeszkedő SODAR alkalmazását a magyarországi szélklimatológiai, szélenergetikai vizsgálatokban (Varga – Németh 2005, Varga et al. 2006, Bíróné Kircsi et al. 2012a, Bíróné Kircsi – Hadnagy 2013). A SODAR (SOund Detection And Ranging) hanghullámok segítségével a légkörben mindig jelenlévő termikus- és sebességkülönbségekre visszavezethető sűrűség-ingadozásokról visszavert jelet gyűjti és elemzi, mely segítségével számos légköri paraméter meghatározható (Engelbart et al. 1999, Viana et al. 2012). A mérés technika legnagyobb előnye, hogy szélmérőtorony felállítása nélkül ismerhetjük meg a talajközeli határréteg alsó néhány száz méter vastag régióját tetszőleges vertikális felbontásban (Vogt – Thomas 1995). Továbbá a nagytérségű statisztikai elemzések és modellbecsléseken kívül születtek munkák a beépített területek és a *városi környezet szélpotenciálját* befolyásoló tényezők meghatározása terén is (Lázár et al. 2014, Csákberényi-Nagy 2014).

1.6.2. Kárpátalja szélklímája és szélenergetikai készlete, eddigi kutatásának összefoglalása

Kárpátalja egész területére vagy a szomszédos magyarországi, szlovákiai, romániai és belső ukrain vidékeken végzett, így érintőlegesen Kárpátaljára is vonatkozó szélklimatológiai és szélenergetikai vizsgálatokról számos említést találunk a szakirodalmi forrásokban. A legelső említhető szélklimatológiai vizsgálatot Hegyfokyn Kabos végezte hazánkban 1894-ben. 216 meteorológiai állomás adatai alapján elemezte a szélirányváltozások napi menetét, évszakos változásait és eloszlását a Kárpát-medencében (Hegyfoky 1894). Kimutatta, hogy az uralkodó szél irányára nagy hatással vannak hazánk domborzati viszonyai. Véleménye szerint az ország legszelesebb tája a Felső-Tisza vidéke (a mai Kárpátalja is). Úttörő munkája vitathatatlan, de megállapításait és magyarázatait az őt követő nemzedékek joggal bírálták. A múlt évszázad első felében Kárpátalja területének hanyattatott sorsa

valószínűleg a meteorológiai tudománynak sem kedvezett, mivel ebből az időszakból szinte semmilyen szakirodalmi forrás nem áll rendelkezésre, amely az itteni éghajlattal, főleg nem a helyi szélklímával foglalkozott volna. A múlt század 40-50-es éveitől kezdődően viszont már találhatunk említést a légkörzés sajátosságairól és a szélviszonyokról. Időrendi sorrendben felsoroljuk a szakirodalomban fellelhető megállapításokat, tényeket, amelyek Kárpátalja szélklímájával és szélenergetikai potenciáljával kapcsolatban születtek.

Adrianov (1951, 1957, 1965) munkáiban az akkori USzSzK nyugati megyéinek éghajlatát, az Északkeleti-Kárpátok vertikális termikus övezetességét és éghajlati-cirkulációs tényezőit vizsgálva leírta az itt uralkodó légáramlatokat, évszakonként bemutatta az eurázsiai akció-centrumok (ciklonok, anticiklonok) hatását a Kárpátok térségére.

Az 1966–1969-es évek között a Kijevi Hidrometeorológiai Intézet által összeállított Éghajlati összesítő (Справочник по климату СССР. Выпуск 10) III. része tartalmazta az akkori USzSzK (Ukrán Szovjet Szocialista Köztársaság) szélklímájára vonatkozó leírást. A kiadvány táblázatos formában és magyarázatokkal együtt mintegy 255 (1 kárpát-aljai) meteorológiai mérőállomás, 1936-tól 1960-ig tartó időszakra vonatkozó összesített adatait tartalmazta, így adva egy általános jellemzést az akkori köztársaság szélklímájáról.

Volevakha – Hojsa (1967) munkájában bemutatásra került az USzSzK szélenergetikai erőforrásainak területi és szezonális eloszlása.

Szintén 1967-ből, az USzSzK szélviszonyainak részletes jellemzése megtalálható a Pryhodko (1967) szerkesztésében megjelent Ukrajna éghajlata (Климат Украины) kiadványban, illetve ezek térképi ábrázolása az USzSzK Éghajlati atlaszában (Кліматичний атлас УРСР) 1967-ből, majd később az USzSzK természeti feltételeinek és természeti erőforrásainak atlaszában 1978-ból.

Buchynskyi (1971) bemutatta a térség felett a bárikus mezők szezonális eloszlását és azok kölcsönhatása által megszabott alapáramlás sajátosságait, valamint a domborzat áramlasmódosító hatásával kapcsolatban tanulmányozta a térségre jellemző hegy-völgyi cirkulációt.

Herenchuk (1981) az Ukrán-Kárpátok máig az alapművek egyikeként számító természetföldrajzi leírásában a hegyvidék éghajlatával, ezzel együtt a helyi légkörzéssel és a főn szél jelenségével foglalkozott. A könyvben megtalálható Alsóhidegpatak, Ungvár, Beregszász és Ra-

hó állomásokról a szélirányok 8 irányszektor szerinti eloszlása és a szélcsend évi aránya.

Babychenko és társai (1984) szintén érintették Kárpátalja területét is az ország szélviszonyainak bemutatása során.

Bodnar (1987) összesen 9 meteorológiai állomásról (köztük olyanokról, amelyeket azóta megszüntettek) évszakonként számokban közli a szélirányok 8 irányszektor szerinti eloszlását, illetve a szélcsend arányát. Megállapította, hogy a szélesebbség értékei az alföldi részekén és a hegyvidék völgyeiben alacsonyak, évi átlagban 1,2-2,4 m/s közé esnek. Itt magas a szélcsendes időszakok gyakorisága, a 3 m/s-tól erősebb szelek gyakorisága csak március-május (Ungvár) között haladja meg a 10%-ot. A hegygerinceken, csúcsokon az átlagos szélesebbségek jóval magasabbak (4-6 m/s). A Pláj állomáson 3 m/s-tól erősebb szelek gyakorisága, május és augusztus kivételével, minden hónapban meghaladja a 40%-ot. A maximális erősségű szellőkések sebessége meghaladhatja a 40 m/s-ot (144 km/h).

Az 1991-ben kiadott Kárpátalja atlaszában Ungvár, Nagybereszna, Beregszász, Alsóverecke, Alsóhidegpatak, Huszt, Oroszmokra és Rahó meteorológiai állomások szélrózsái és azokon a szélcsend évi aránya található meg.

Voropai – Kunytsa (1996) a légkörzés helyi sajátosságairól, a Kárpátokban kialakuló főn szél és hegy-völgyi szél kialakulásáról tesznek említést.

Pap (2003) könyvében, a Kárpátalja éghajlata alfejezetben, néhány adat található a síkvidék és a hegyvidék átlagos szélesebbség értékeire. A terület széleenergia potenciálja feltérképezése szempontjából egy igen figyelemfelkeltő, bár megalapozatlan megállapítást tett, és valószínű, hogy később Habrel (2013) is ezt vette át, miszerint a Hembá (г. Гемба) 1491 m (Borzsa-havas), a Jávornik- (г. Явірник) 1017 m (Havasi-vonulat) és Mancsul-hegy (г. Манчул) 1501 m (Havasi-vonulat) a széleenergia hasznosításra alkalmas területek, ahol az évi átlagos szélesebbség eléri az 5-7,5 m/s-ot.

Kudrya et al. (2001) Ukrajna megújuló energetikai atlaszában – a jellemző szélesebbségek alapján – a Kárpátaljai-alföld a legalacsonyabb 1-es (évi átlagos szélesebbség <4,25 m/s), míg az Ukrán-Kárpátok területe a legmagasabb, 4-es ($\geq 5,5$ m/s) kategóriába került az országon belül.

Velychko (2003) Ukrajna megújuló energiaforrásainak készleteit vizsgálva ugyancsak említést tesz Kárpátalja szélklímájáról. A Kárpátaljai-alföldre az ország más területeihez képest egész évben alacsony szélebségek (3-4 m/s) jellemzők. Az évszakok középso hónapjainak átlagos szélebségeit bemutató térképei szerint a szélebség jellemző évi járásában a tavasz elejei maximum és az ősz elejei minimum tapasztalható. Megemlíti, hogy a Kárpátokban található Pozsezevszka állomáson egész évben 5 m/s-t meghaladó szélebségeket mérnek.

A 2007-ben kiadott Ukrajna nemzeti atlaszában (Національний атлас України) (2007) szélklíma tekintetében két térképet találunk. Egyiken bemutatásra kerül a nyári, a másikon a téli átlagos szélebség (a lefedett időszak nem közölt), a 3 m/s-ot meghaladó szélebség időtartama (óra/évszak). Kárpátaljáról két állomás, Ungvár (nyáron – 2,5 m/s, 600 óra; télen – 2,6 m/s, 800 óra) és Pozsezevszka (nyáron – 5,0 m/s, 900 óra; télen – 7,9 m/s, 1300 óra) szerepel a térképeken.

Dmytrenko – Barandych (2007) Ukrajna területének szélenergetikai felosztása során Kárpátalja síksági részét és hegyvidéki folyóvölgyeit, az Előkárpátokkal és a Krím-hegység (Krím-félsziget) völgyeivel együtt, a szélenergia felhasználására alkalmatlan területek csoportjába sorolják, ahol az évi átlagos szélebség 1,5-2,5 m/s között változik. A 3 m/s-t meghaladó sebességű szelek időtartama csupán évi 2500-3000 órát tesz ki. Az Ukrán-Kárpátok legmagasabb részei, a Krím-hegység csúcsaival, a Krím-félsziget déli részével, a Fekete- és Azovi-tenger partvidékével együtt a kiemelkedően magas szélenergia potenciállal rendelkező kategóriát képviselik, 5,5-6,5 m/s várható évi átlagos szélebségekkel. A 3 m/s-t meghaladó sebességű szelek időtartama itt elérheti az évi 5500-6000 órát.

Lavnyi – Lässig (2009) az erős szelek gyakoriságával foglalkoztak az Ukrán-Kárpátok területén. Az 1945-1999 időszakra 16, köztük 5 kárpátaljai mérőállomáson határozták meg az erős szelek ($v \geq 20$ m/s) évi, évszakonkénti és hónaponkénti átlagos előfordulását, külön irányok szerint és átlagos időtartamra is lebontva.

Kinash – Huk (2006, 2010), Kinash et al. (2016) Kárpátalja területének felosztását végezték el az építményekre ható szélterhelés és szélnyomás alapján. A tanulmányaikban műszaki szempontból közelítették meg a helyi szélklíma jellemzőit, azonban részletes adatokat közöltek a januári és júniusi maximális szélebségről a megye mind

a 9 mérőállomásáról. Kárpátalja területét a maximális nyári szélnyomás alapján 8, a maximális téli szélnyomás alapján 9 részre (járásra) osztották fel (az 1-es járásban a legalacsonyabb a szélnyomás – 250-400 Pa, a 9-es járásban a legmagasabb – 1300-1900 Pa). Egy a domborzati sajátosságokat is figyelembe vevő interpolációs módszer segítségével mintegy 28 ponton (településen, hegycsúcson, hágón) meghatározták az évi átlagos, illetve a januári és a júliusi minimum és maximum szélesebséget és szélnyomást.

A 3Tier (2009) Ukrajnára készült széltérképe (lásd: 3. függelék) 80 m magasságban, 5×5 km felbontásban, a domborzati hatást is figyelembe véve mutatta be az évi átlagos szélesebség területi eloszlását. A térképen kitűnik Kárpátalján a szélesebség tekintetében jellemző kontrasztosság az alföld és a hegyvidék között.

Az AWS Truepower (2012) 200 m felbontású, 80 m magasságra készült széltérképe (lásd: 4. függelék) mutatta be legrészletesebben a terület évi átlagos szélesebség értékeinek területi szóródását. A nagy felbontásnak köszönhetően itt élesen kirajzolódnak a különböző szélviszonyok uralta területek. A térkép Kárpátalját bemutató kivágatán látszik, hogy a szelesebb területekhez tartoznak a Vihorlát-Gutini vulkanikus vonulat részei (Kéklő- (Szinyák-) hegység, Borlő-Gyil), a Havasi-vonulat tagjai (Róna- és Borzsa-havas), illetve a síkvidéken az Ugocsi-sík.

Salyuk et al. (2013) a kedvezőtlen meteorológiai jelenségeket tanulmányozva Kárpátalján megállapították, hogy éves átlagban 122 szeles nap ($v \geq 10$ m/s) fordul elő. A hegyvidéken, a 20 m/s-os sebességű szelek kialakulásához kedvező makroszinoptikus helyzetek alakulhatnak ki télen, leggyakrabban decemberben és januárban, legritkábban júliusban és augusztusban. A 35 m/s-ot elérő és azt meghaladó sebességű széllekeések Kárpátalján 4-5 évente fordulnak elő. Ezek a délről és északnyugatról érkező ciklonok áthaladásához köthetők és általában lokális jelleget mutatnak. A nyári évszakban a 20 m/s-os sebességű széllekeések leggyakrabban júliusban fordulnak elő. Ezek időtartama átlagosan 30 perc, ritkán 1 óra és napi járásukra jellemző, hogy nagyobb részben (31%) a délutáni napszakban, 12-18 óra között, erős konvektív felhőképződés következtében létrejött zivatarok során jelentkeznek.

Makarovskiy – Zinych (2014) 187 meteorológiai állomás 30 éves napi átlagos szélesebség adatsorát vizsgálta. A szélesebség

értékeket a felszíntől 10 m-es magasságra transzformálták. Ehhez az ún. Hellmann-féle hatványkitevős összefüggést használták. Az összefüggésben szereplő α kitevőt az érdességi magasság (z_0 paraméter) alapján határozták meg. Az érdességi paramétert – a felszín típusától függő tapasztalati értékét – táblázatból vették. Elkészítették egész Ukrajnára, 10 és 75 m felszín feletti magasságra az évi átlagos szélesebséget bemutató térképeket (lásd: 5. függelék). A térképek nem tükrözik a domborzati viszonyok áramlásmódosító hatását.

Tykhonovych – Bilanyuk (2014) a szél hatását tanulmányozták a lavina helyzet kialakulására a Kárpátokban, mindemellett a helyi áramlási mező sajátosságaira is adtak jellemzést.

Shuber (2014) a Csornohorai-masszívumban található Pozsevszka meteorológiai állomás 1962–2010-es időszakra vonatkozó éghajlati adatsorait elemezte. Vizsgálta a szélesebség irányonkénti változását és az erős szelek (≥ 15 m/s) előfordulásának gyakoriságát.

Osadchyi et al. (2014, 2015) a nyugat-ukrajnai területek szélpotenciáljának a CarpatClim éghajlati adatbázis alapján történt vizsgálata során megállapították, hogy Kárpátalja területén az 1981–2010-es időszakban 0,2-0,3 m/s-os csökkenés volt kimutatható az évi átlagos szélesebségben az 1961-1990-es időszakhoz viszonyítva. Továbbá az 1961-2010 időszak szélesebség adatai alapján 10, 30 és 50 m magasságokra elkészültek a térség széleenergetikai potenciálját eddig legrészletesebben bemutató térképek (lásd: 6. függelék). A fajlagos szélteljesítmény 30 m-es felszín feletti magasságban a hegyvidéki részen, azon belül a Havasi- és Vízválasztó-vonulat gerincein rendelkezik a legmagasabb értékekkel és helyenként eléri a $400\text{--}450\text{ W/m}^2$ -t. A szűk, szélvédett folyóvölgyekben és a síksági területeken viszont csupán $100\text{--}150\text{ W/m}^2$ értékeket mutat. Ugyanez érvényes az 50 m-es szintre is, csupán a magasabb értékű kategóriák területei szélesednek ki.

Mandryk (2016) Ukrajna hegyvidéki (Északkeleti-Kárpátok vagy Ukrán-Kárpátok) régiójának nap- és széleenergia potenciálját vizsgálta. Összefoglalta a két légköri erőforrás felhasználásának lehetőségeit a térségben. Térkép segítségével általánosan, elnagyoltan, két szélesebség kategóriát ($>5,5$ m/s és $<4,5$ m/s) használva szemlélteti a szélesebség viszonyokat.

Moskalchuk – Pryhodko (2017) a Kárpátok régiójában 26 meteorológiai állomás 2005–2015 közötti időszakra vonatkozó évi átlagos

szélsebességeit felhasználva elkészítette 30, 50, 70 és 100 m-es magasságokra a szélsebesség területi eloszlását bemutató térképeket, ezek közül a publikációban csak a 100 m-re vonatkozó szerepelt (lásd: 7. függelék). A térképek elkészítésénél láthatóan nem vették figyelembe a domborzat áramlásmódosító hatását, de ennek ellenére is a térségről korábban megjelent ilyen jellegű térképek közül részletegyszerűen mutatja be a szélsebesség területi eloszlását. A vizsgálataikban mind a 9 kárpátaljai meteorológiai állomást is bevonták. Az évi átlagos szélsebesség és fajlagos szélteljesítményt figyelembe véve a területet 5 régióra osztották fel. Következtetéseik szerint Kárpátalján a Csornohorai-masszívum és Vízválasztó-vonulat területe a legalkalmasabb a szélturbinák hatékony működéséhez. A szélsebesség magassági korrekciójához logaritmikus és hatványkitevős szélprofilot is alkalmaztak. A logaritmikus szélprofilnál az érdességi paraméter értékének (z_0) egységesen minden állomáson 0,1-et, míg a hatványkitevő (α) értékének egységesen 0,2-et használtak.

Moskalchuk (2017) az Előkárpátok egyes meteorológiai mérőállomásain meghatározta a fajlagos szélteljesítmény értékeit a 2005–2015-ös időszakra. Eredményei szerint annak értéke a nem hegyvidéki állomásokon 19 W/m^2 (Kolomija) és 42 W/m^2 (Dolina) között változik. A hegyvidéken elhelyezkedő Pozsezevszka állomáson viszont eléri a 182 W/m^2 -t.

Mindezek mellett meg kell említenünk azokat a vizsgálatokat, amelyek, ha nem is konkrétan Kárpátalja területére vonatkoztak, de közvetlenül a szomszédos (pl. az országhatáron vagy megyehatáron túli) síksági vagy hegyvidéki területek szélklimájával, szélerőforrásaival foglalkoztak, mégpedig: Wagner 1931, Berényi 1932, Péczely 1957, 1963, Bárány et al. 1970, Tar 1984, 1999, Keveiné Bárány 1991, Tar – Szegedi 2007, Chomjak – Tomič 2008).

A magyar Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ 2017a) által közölt széltérképről (lásd: 8. függelék) leolvasható, hogy a szomszédos Ungi-sík, Beregi-Tiszahát és Ugocsai-sík területén az évi átlagos szélsebesség valószínűleg 2,0–2,5 m/s közé esik. A térkép 600×900 m-es felbontásban 2000–2009-es időszak adatai alapján készült.

Kertész et al. (2005) dinamikai leskálázással számított átlagos szélsebességet reprezentáló térképe (lásd: 9. függelék) 75 méter magasságra, 5×5 km-es térbeli felbontásban, az 1992–2001-es időszakra vo-

natkozóan készült el. Ebben a magasságban a Kárpátaljai-alföldre a 4,5-5,0 m/s évi átlagos szélsébség érvényes.

Radics (2004) a szélenergia hasznosításának lehetőségeit vizsgálta, elkészítette a Magyarországon rendelkezésre álló szélteljesítmény mezőt bemutató térképet (lásd: *10. függelék*). A térkép ugyan nem terjed ki Kárpátaljára, de valószínűleg az alföldi rész szélteljesítménye közel megegyező a Nyírségével, ami 30-35 W/m² körül van.

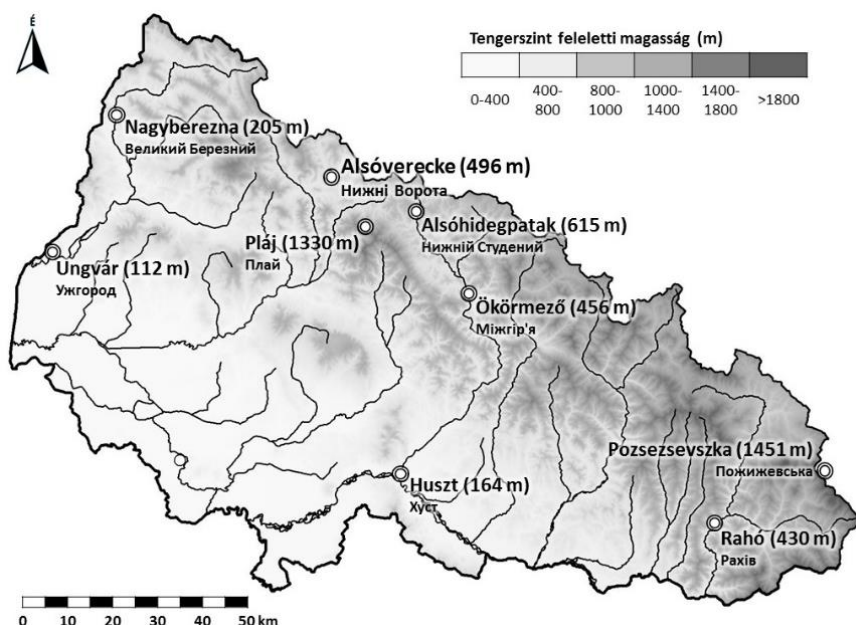
2. A FELHASZNÁLT ADATOK ÉS ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

2.1. A kárpátaljai meteorológiai állomások széladatai

Kárpátalján napjainkban 9 meteorológiai mérőállomás működik, ezek mindegyikén több évtizede folyik szélmérés. Az állomások a Kárpátaljai-alföldön, mint Ungvár (ukránul: Ужгород), Beregszász (Берегово) és Huszt (Хуст), illetve az itt húzódó Északkeleti-Kárpátok keskeny, folyók által kimélyített völgyeiben, mint Nagyberezna (Великий Березний), Rahó (Рахів), Ökörmező (Міжгір'я), Alsóverecke (Нижні Ворота) és Alsóhidegpatak (Нижні Студений), illetve a Borzsa-havas magasan fekvő gerince nyitott térszínén, mint a Pláj (Плай) helyezkednek el.

A legkorábban, 1872-től az Osztrák-Magyar Monarchia hidrometeorológiai hálózatának tagjaként az ungvári állomás kezdte meg működését. A második világháború után, 1945–1946 között álltak üzembe a Beregszász (Beregszászi járás), Rahó (Rahói járás), Huszt (Husztai járás), Nagyberezna (Ungvári járás), Alsóhidegpatak és Ökörmező (Husztai járás) állomások. 1949-ben megkezdhette működését az Alsóverecke (Munkácsi járás) állomás és utolsónak 1968 júniusában nyílt meg a megye egyetlen magashegyi meteorológiai állomása a Pláj (Munkácsi járás), amely egyben a lavinajelző szolgálat bázisaként is működik (KMHMK 2016). Ezek közül a Beregszászi mérőállomás szélesség és szélirány adatsorát nem tudtuk felhasználni, mivel a vizsgált időszakban huzamosabb ideig meghibásodott a mérőműszer (a 2.1. ábrán név nélküli fehér pont jelöli). A vizsgálatba kilencedikként bevont Pozsezszevszka meteorológiai állomás orográfiai környezetét tekintve szintén hegyvidéken, a Csornohorai-masszívumban, Kárpátalja és a vele határos Ivano-Frankivszki terület (megye) határán helyezkedik el, de igazgatását illetően már az utóbbihoz tartozik (KMHMK 2016). Az állomások térbeli elhelyezkedését a 2.1. ábra szemlélteti.

Az állomások pontos földrajzi koordinátáit, valamint a szélesség-mérő talajfelszín feletti magasságát és típusát a 2.1. táblázatban adjuk meg.



2.1. ábra. Az adatbázist alkotó meteorológiai megfigyelő állomások földrajzi elhelyezkedése és tengerszint feletti magassága (m)

Forrás: saját szerkesztés

A vizsgált időszak 2011. január 1-től 2015. december 31-ig terjed. A vizsgálatainkhoz a megfigyelő meteorológiai állomásokon 3 óránként regisztrált szélsősebesség és szélirány, illetve napi maximális szélsősebesség adatsorokat használtuk fel. Ungvár esetében felhasználtunk egy 2006. január 1-től 2015. december 31-ig tartó adatsort is, mivel legalább egy állomás esetében fontosnak láttuk összehasonlítani a mért adatokat a CarpatClim éghajlati adatbázisban található interpolált rácsponti adatokkal. Ez 5 éves átfedésben van a CarpatClim, 1961-től 2010-ig tartó adatsorával. Az adatsorokat a Kárpátaljai Megyei Hidrometeorológiai Központtól (KMHMK) saját költségen vásároltuk meg, ez behatárolta a mérőpontok számát és az adatsorok terjedelmét is. Az érintett időszakban az állomások földrajzi helyzetében és az anemométer földfelszín feletti magasságában nem történt változás, tehát a szélmérés körülményei változatlanoknak tekinthetők.

2.1. táblázat. A Kárpátalján működő meteorológiai állomások földrajzi koordinátái, az anemométer talajfelszíntől mért magasságai és típusa (φ : földrajzi szélesség, λ : földrajzi hosszúság, h : tengerszint feletti magasság, h_a : az anemométer talaj feletti magassága)

Meteorológiai állomás		Földrajzi koordináta		h (m)	h_a (m)	Anemo- méter típus
WMO index	Állomás név	φ (északi)	λ (keleti)	2011. jan. – 2015. dec.		
33631	Ungvár	48°38'	22°16'	112	14	MAPK 60
33638	Huszt	48°11'	23°18'	164	16	M63M-1
33514	Nagyberezna	48°54'	22°28'	205	10	M63M-1
33647	Rahó	48°03'	24°12'	430	10	M63M-1
33633	Ökörmező	48°31'	23°30'	456	10	M63M-1
33517	Alsóverecke	48°46'	23°06'	496	10	M63M-1
33518	Alsóhidegpatak	48°42'	23°22'	615	10	M63M-1
33515	Pláj	48°40'	23°12'	1330	8	M63M-1
33646	Pozsezszevszka	48°09'	24°32'	1451	11	M63M-1

Forrás: saját szerkesztés a KMHMK adatai alapján

Az 5 évet lefedő időszakban állomásonként eltérő mennyiségű adathiány fordult elő. A legkevesebb hiányzó rekord Ungváron volt, ott a teljes idősor csupán 0,3%-a hiányzott. A többi állomáson az adathiány részaránya 1-2% között ingadozott. A legtöbb adatkiesés Rahón (1,8%) és Pozsezszevszkan (1,9%) adódott. Meg kell jegyeznünk, hogy a kárpátaljai meteorológiai állomások műszerezettsége elavult. Ez a Megyei Hidrometeorológiai Központ igazgatója és a meteorológiai állomások munkatársai szóbeli közlése és a helyszíni bejárás során tapasztaltak alapján állítható. Nem kivétel ez alól az anemométer sem. A régi, elavult műszerek gyakran meghibásodnak és a javításukat, a szükséges anyagi fedezet hiányában gyakran helyben, a meteorológiai állomások munkatársai végzik. Egyedül az Ungvári állomás rendelkezik jobb műszerezettséggel, mivel a városban, közvetlenül az ukrán-szlovák határon található Ungvári nemzetközi repülőtér repülésmeteorológiai igényeit is kiszolgálja. Az adathiány évszakos felbontásában tapasztalható, hogy a téli adatsorból hiányzott a legtöbb és a tavasziból a legkevesebb rekord. A téli magasabb adatkieséseit, amely minden állomáson közel azonos arányú, valószínű, hogy a hideg, olykor zúzmarás időjárás viszonyosságai okozhatták.

2.2. A CarpatClim éghajlati adatbázis

Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) 8 további ország (Ausztria, Csehország, Szlovákia, Ukrajna, Lengyelország, Románia, Horvátország és Szerbia) közreműködésével hozta létre a CarpatClim adatbázist, ami egyedülálló sűrűséggel reprezentálja a Kárpát-medence klimatológiai adottságait 1961–2010 között. A létrehozásának célja volt a Kárpát-régió éghajlatának részletes tér- és időbeli vizsgálata harmonizált adatok és egységes módszertan alapján. A projekt végére előállt a régió digitális klímaatlasza, ami regionális éghajlatváltozási és egyéb klimatológiai vizsgálatok alapját képezheti. Az eredményeket a pályázatot kiíró JRC (Joint Research Center Institute for Environment and Sustainability) elsősorban aszály vizsgálatokhoz kívánja felhasználni az EDO (European Drought Observatory) keretében. Az adatok előállítása az OMSZ Éghajlati Osztályán kifejlesztett adathomogenizálási: MASH (Multiple Analysis of Series for Homogenization, Szentimrey 2008) és interpolációs: MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis, Szentimrey – Bihari 2007) eljárásokon alapult (Szalai et al. 2012, OMSZ 2017b). Az adatok térbeli felbontása $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, az időbeli felbontása pedig a legtöbb paraméterre napi sűrűségű. A projektben ukrainai részről az Ukrán Hidrometeorológiai Intézet is részt vett.

Az adatbázist alkotó mérőpontok között mind a 9 kárpátaljai meteorológiai állomás és az ivano-frankivszki Pozsezszevszka állomás is szerepel. A CarpatClimben a vizsgált állomások mindegyikéről származnak szélesebb és szélirány adatok. A CarpatClim és az általunk felhasznált adatsor időbeli terjedelme között csupán Ungvár esetében van egy 5 éves átfedés. Ennek ellenére a klímaatlasz térképeinek felbontása és időbeli terjedelme miatt fontosnak láttuk ezt az adatbázist is felhasználni a vizsgált terület szélklímájának energetikai szempontú jellemzése során. Összesen 216 rácspontot választottunk ki, amelyek Kárpátalja területén belül vagy a határhoz közel esnek (lásd: *11. függelék*), illetve a klímaatlasz metaadatbázisa által közölt rácspontkódok, földrajzi koordináták és tengerszint feletti magasságok alapján megtaláltuk a saját állomásaink gridjeit is és az azok alatt lévő szél adatokat.

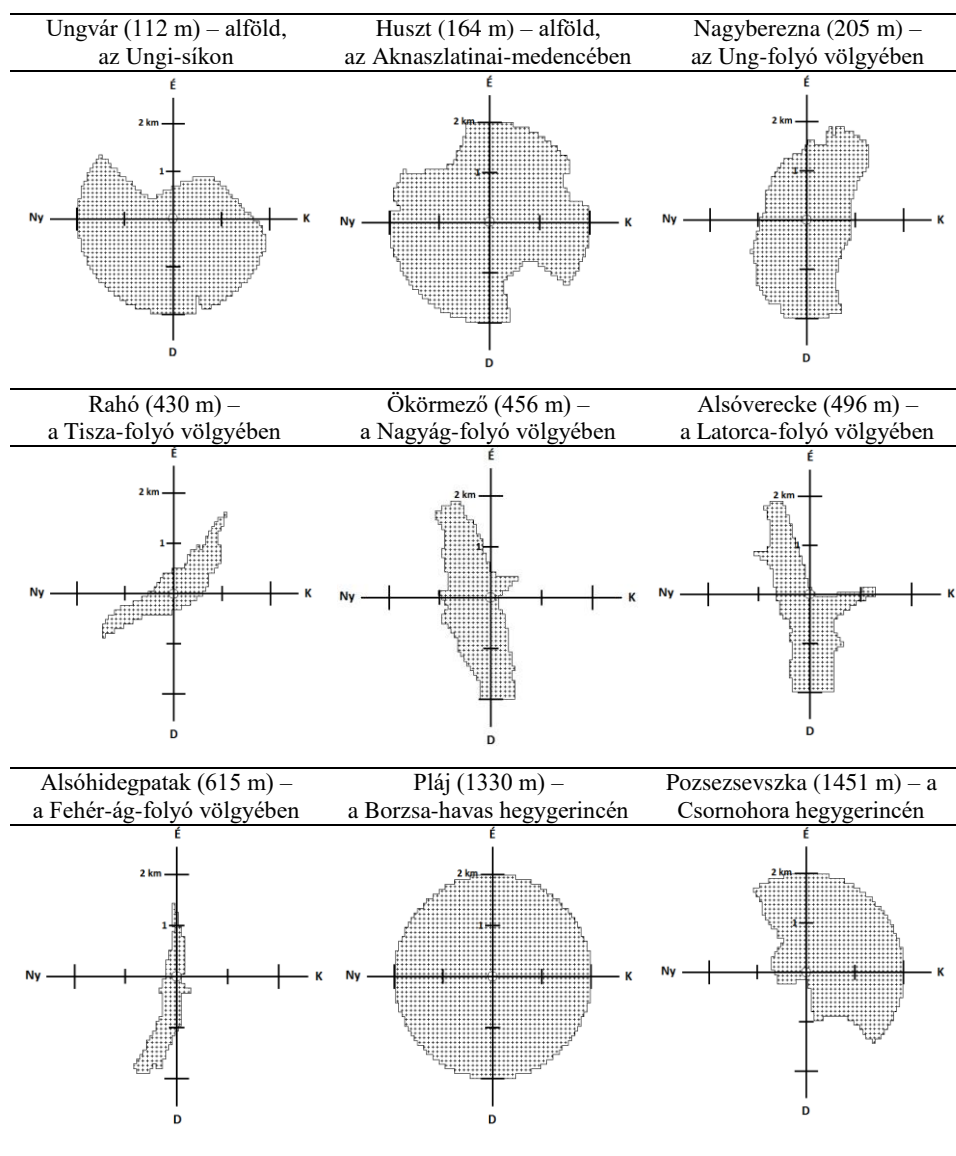
2.3. A vizsgálatba vont meteorológiai állomások jellemzői

A mintaterületen található állomások különböző orográfiai környezetben helyezkednek el. A legalacsonyabban (Ungvár, 112 m) és a legmagasabban (Pozsezevszka, 1451 m) fekvő állomás relatív szintkülönbsége 1339 m. Az online, ingyenesen elérhető nyilvános SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) topográfiai adatbázis felhasználásával előállítottuk az állomások 2 km-es sugarú környezetében, 360°-ban, a felszíntől 10 m magasságban a domborzat, illetve az SRTM által tartalmazott egyéb felszíni érdekességet befolyásoló elemek (pl. erdő) horizontkorlátozását bemutató horizont-diagramokat. A 2.2. ábra jól szemlélteti az állomások környezetében, az egyes égtájak felől a domborzat hatását a felszínközeli szélmező tulajdonságaira. A nyitott hegygerincen található Pláj esetében egész 360°-os kört kapunk a horizontra, míg a szűk hegyvidéki medencében, folyóvölgyben fekvő Nagyberezna, Rahó, Ökörmező, Alsóverecke és Asóhidegpatak esetében csupán keskeny sávot, amely az adott völgy hosszanti irányát és minden bizonnyal egyben az ott uralkodó szél irányszektorát is ábrázolja.

A mintaterületünk állomásainak környezetéről a természetföldrajzi szakirodalom (Baranyi 2009, Bodnar 1987, Herenchuk 1981, Kárpát-alja atlasza 1991, Pap 2003, Voropai – Kunytsa 1996) és a helyszíni bejárás alapján az alábbi jellemzőket állapíthatjuk meg.

Az *ungvári* meteorológiai állomás az Ung-folyó völgyében, a folyó hegyvidékről síkságra kikerkező részén helyezkedik el. Északon, északkeleten a Vulkáni-vonulathoz tartozó, Vihorlát, keleten a Makovica hegyláncai nyúlnak be az Ung völgyéig. Az állomás 2 km-es környezetében ezek magassága legfeljebb a 250 m abszolút tengerszint feletti magasságot éri el. Az állomástól déli, délnyugati és nyugati irányba 101-110 m tengerszint feletti magasságú lapos síkság veszi kezdetét. A mérőpont közvetlen környezetében keleti, délkeleti és déli irányból sűrű, egy-két szintes lakóházakkal beépített városrész veszi körül.

A *nagybereznai* meteorológiai állomás az Ung folyó, észak-dél irányú völgyében foglal helyet. A felszínt a Havasi- és Vulkáni-vonulat idenyúló 400-550 m-re emelkedő lekerekített hátú vonulatai uralják. Ennél magasabbra csupán az állomástól 6 km-re, északkeletre található Javornik-hegy (1017 m) emelkedik. A nagybereznai műszerkert a település nyugati határában foglal helyet, nyitott helyen, 50 m-es távolságban csupán déli irányból vannak 1-2 vagy többszintes épületek.



2.2. ábra. A domborzat horizontkorlátozó hatása az állomások körül (360°-ban) egy 2 km-es sugarú körben, a szélérés magasságában

Forrás: saját szerkesztés

A huszti meteorológiai állomás elhelyezkedése még szintén részben síkvidékinek mondható, de az előbbiekhöz képest már összetettebb

domborzati viszonyok között foglal helyet Kárpátalja déli részén. Az állomás a Tisza völgyében, a Vulkáni-vonulat két hegysége közötti keskeny sík felszínén, az úgynevezett Huszti-kapuban található. Ezen keresztül kapcsolódik egymáshoz a Csap-Munkácsi-síkság és az Aknaszlatinai-medence. Az északnyugaton lévő Nagyszőlősi- és délnyugaton elhelyezkedő Avas-hegység legmagasabb részei 800-900 m felé emelkednek. A sík területeket az állomástól keletre a Nagyág alsó folyásánál és a Tisza mentén találjuk. A meteorológiai műszerkert a város központi, sűrűn beépített részén helyezkedik el. A keleti irány kivételével 1-2 szintes lakóházak és magas fák veszik körbe.

A *rahói* meteorológiai állomás a Fekete-Tisza északkelet-délnyugat irányú völgyében helyezkedik el, így innen nyitott. Keletre és délkeletre 5 km-es távolságban a Mencsul-hegy (1386 m) emelkedik, délnyugatról, nyugatról és északnyugatról összefüggő 1000-1300 m magasságú hegygerinc övezi. A műszerkert közvetlenül a Tisza partján fekszik, a folyótól alig 50 m-re. Közvetlen környezete csak délről, a folyóparttól nyitott, más irányokból többszintes épületek zárják körül.

Az *ökörmezői* meteorológiai állomás a Nagyág észak-dél irányú völgyszakaszában található. Domborzatilag észak-északnyugatról és délről, illetve keletről a szomszédos Talabor folyóval összekötő keskeny völgy által viszonylag nyitott. Északkeletre, 5-6 km-re a Hrabova-gerinc (1132 m), a Kamjanka-hegy (1578 m), délkeletre a Mersa-hegy (1318 m), délnyugatra a Mencsul-hegy (1248 m) terül el. A műszerkeretet, kivéve az északkeleti irányt, lakóházak és a hozzájuk tartozó magas gyümölcsfás kertek zárják körbe.

Az *alsóvereckei* meteorológiai állomás a Latorca folyó felső szakaszának völgyében fekszik. A felszínbe mélyen bevágódó észak-dél irányú völgyet 500-600 m-t elérő hegyek szegélyezik, az állomástól 4-5 km-re nyugati és északnyugati irányba a Vízválasztó-vonulat 900-950 m magas láncai kezdődnek. Közvetlen környezete viszonylag nyitott, csupán délről, 50 m-es távolságban találhatóak fenyőfák és lakóházak. A műszerkert a hegyoldalban helyezkedik el, a település beépített központjától 50-60 méterrel magasabban fekszik.

Az *alsóhidegpataki* meteorológiai állomás a Fehér-ág folyó észak-dél irányú völgyében foglal helyet. Az állomás 2 km-es környezetében 700-950 m-re kiemelkedő hegyek húzódnak. Délnyugaton, 8-10 km-re a Borzsa-havas 1200-1500 m-es hegylánca terül el. A műszerkert szintén

a hegyoldalon, a településtől 25-30 m-el magasabban helyezkedik el, de tőle alig 30 m-re északról és nyugatról is fasor és kisebb házak húzódnak.

A *Pláj* meteorológiai állomás a Borzsa-havas északnyugati gerincének, füves pusztával borított tetején található 1330 m-en. A magas térszín és szinte csupasz felszín miatt itt bármiféle szélvédetségéről alig beszélhetünk. Az állomástól csupán a 2,5 km-re, északnyugatra álló Temnatic (1348 m), a 3,5 km-re, délkeletre lévő Velikij Verh (1598 m) és az 5 km-re délen található Aszttag (Sztoj) (1682 m) csúcsok emelkednek magasabbra. A műszerkert panorámája teljesen nyitott, körülötte semmilyen mesterséges terepi akadály, sem fák nem korlátozza a szél áramlását.

A *Pozsezevszka* meteorológiai állomás a Csornohorai-masszívum Pozsezevszka-hegyének (1822 m) észak-keleti hegygerincén foglal helyet 1451 m magasságban. A mérőpont környezete északi, észak-keleti és keleti irányokból nyitott, mivel a Prut folyó völgye felé lejtő masszívum domborzata már nem takar. Míg észak-nyugati irányból a Hoverla (2061 m), nyugati irányból a Breszkul (1911 m), dél-nyugati irányból a Pozsezevszka csúcsa, déli irányból pedig a Dancizs (1855 m) csúcsok veszik szorosan körbe, így ezekből az irányokból szélárményékoló hatást fejtenek ki az állomásra. A műszerkert a hegygerinc tetején foglal helyet, így közvetlen környezetéből kiemelkedik, de délnyugati és nyugati irányban, tőle 30-40 m-re sűrű fenyőerdő terül el.

Különösen a településeken, egyes meteorológiai műszerkertek környezetében jelentős felszíni akadályok találhatók, amelyek feltartóztatják és módosítják a levegő felszínközeli áramlását. Ez különösen megmutatkozik az állomásokon tapasztalt szélcsend (a szélsebesség szenzor indítási küszöb alatti értékeinek) magas relatív gyakoriságában (2.2. táblázat).

2.2. táblázat. A szélcsend relatív értékei (%) a vizsgált állomásokon
2011–2015 között
(kiemelve: **félkövér** – a legnagyobb, dőlt – a legkisebb érték)

Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverecke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
szélcsend (%)	26,1	23,8	50,0	55,2	48,7	31,1	36,8	<u>12,1</u>	30,0

Forrás: saját szerkesztés

A legszélcsendesebb a rahói állomás, míg a hegyvidéki Plájon a szélcsend évi átlagos aránya csupán 12,1%. Meg kell jegyeznünk, hogy a szél méréshez használt M63M-1 típusú anemométer indítási sebessége 1,2 m/s, míg MAPK 60 esetében 1,0 m/s. A szélcsend évszakos megoszlását vizsgálva (2.3. táblázat) láthatjuk, hogy a legszélcsendesebb évszakok a nyár és az ősz (kivéve Husztot – itt télen van a maximum).

2.3. táblázat. A szélcsend relatív értékei (%) évszakos bontásban, 2011–2015 között
(kiemelve: **félkövér** – a legnagyobb, dőlt – a legkisebb érték)

Évszak	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
tél	26,0	27,3	48,4	58,5	41,5	25,3	30,1	<u>10,3</u>	28,3
tavas	19,1	19,9	41,2	46,6	39,1	28,6	32,7	<u>10,8</u>	29,9
nyár	28,6	23,1	53,4	58,8	59,5	35,7	44,8	<u>14,3</u>	31,9
ősz	30,5	24,8	56,8	58,0	54,5	35,0	39,4	<u>12,9</u>	29,9

Forrás: saját szerkesztés

A kárpátaljai meteorológiai megfigyelő állomások működését a Kárpátaljai Megyei Hidrometeorológiai Központ (ukrán nyelven: Закарпатський обласний центр з гідрометеорології) koordinálja, amely az Ukrán Hidrometeorológiai Központ (Український гідрометеорологічний центр) részegysége (KMHMK 2016).

A megfigyelő állomásokon az időjárási elemek, így a szél paramétereinek mérése 3 óránként, az egyezményes koordinált világidő (UTC) szerint, az Időjárási Világszolgálat (WMO) által meghatározott szinoptikus fő- (00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UTC) és mellékterminusokban (03:00, 09:00, 15:00, 21:00 UTC) történik (Maksymov et al. 2011). Kárpátalján az állami intézmények, így a meteorológiai állomások is a kelet-európai idő (EET) szerint működnek, amely a téli időszámítás alatt UTC+2:00, a nyári időszámítás alatt pedig UTC+3:00 szerint mutatja a helyi időt. Az állomásokon vezetett meteorológiai jegyzőkönyvekben mind a két időt feltüntetik.

A háromóránkénti mérésekből következően napi 8 időpontból állnak rendelkezésünkre adatok. Jelenleg a kárpátaljai meteorológiai mérőhálózatban ennél nagyobb időbeli felbontású adatsorok nem készülnek. Kivételt képez az ungvári állomás, amely a megyeszékhely (Ungvár) polgári személyszállítást végző nemzetközi repülőtérét is kiszolgálja. Repülésmeteorológiai feladatát ellátva minden óra 00 és 30 percében, UTC szerint, előállítják a METAR repülési időjárás-jelentő táviratokat is.

Az időjárási elemek számszerű értékeiket általában az adott mérési terminus (21:00, 00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00 UTC) előtti 10 perces időszakasz átlagaiként adják meg. A szél esetében minden terminusban az alábbi jellemzőket rögzítik (Maksymov et al. 2011, Kleyevska – Polishhuk 2010, Nekos – Molodan 2012, Shven 2010):

- átlagos szélesség – az állomásokon 10 m magasságban elhelyezett M63M-1 vagy MAPK 60 típusú műszerrel határozzák meg m/s-ban. A mérés nem automatizált, a megfigyelő kézzel írott jegyzőkönyvben rögzíti az adatokat. A mérés 10 percig tart, az adott terminus előtt 15 perccel kezdődik és 5 perccel előtte fejeződik be (azaz például a 21:00 UTC terminus szélessége a 20:45 és 20:55 között eltelt idő átlagos szélessége, amelyet az anemométer 3 másodpercenkénti rekordjaiból a vezérlő beltéri egység állít elő, az értékét a megfigyelő a műszer kijelzőjéről olvashatja le);
- maximális szélesség – az adott terminusban a 10 perc során mért legnagyobb szélesség, szélleökés, m/s-ban;
- maximális szélesség a terminusok között – a két egymás után következő terminus között eltelt idő (3 óra) alatt regisztrált legnagyobb szélesség, szélleökés m/s-ban;
- szélirány – a terminusban regisztrált irány, fokokban (0-360°) kifejezve (a szélesség rögzítése után, a megfigyelő 2 percen keresztül követi a műszer által mutatott szélirány változását, majd 5° pontossággal meghatározza azt az irányt, amely a 2 perces időtartamon belül legtávolabb érvényesült).

2.4. A szélesebbesség statisztikai és energetikai elemzése

A következőkben bemutatásra kerülnek azok a vizsgálati módszerek, amelyeket az adatok elemzésénél használtunk fel. Az adatok elemzését a Microsoft Office csomaghoz tartozó Excel táblázatkezelővel végeztük el. Az eredmények szemléltetéséhez előállított térképeket és egyéb grafikai szerkesztéseket a QGIS 2.0.1, ArcGIS 10, Surfer 9, PAST 3.21, Adobe Photoshop CC és a Microsoft Office Power Point szoftverekkel készítettük.

2.4.1. A mért szélesebbességek magassági korrekciója

A meteorológiai szél mérés gyakorlatában előfordul, hogy bizonyos okok miatt a szélesebbességet és szélirányt meghatározó műszereket nem a nemzetközi meteorológiai szabvány szerint előírt 10 m-es magasságban helyezik el, hanem ettől alacsonyabb vagy magasabb szinten. Ilyen esetben, ahhoz, hogy a különböző szinteken mért szélesebbességek összehasonlíthatók legyenek, valamilyen formula segítségével el kell végezni az adatok transzformációját, egységesen egyazon mérési szintre. Ehhez viszont, adott helyszínen, ismernünk kell a szélesebbesség magasságtól való megváltozását, függését, azaz a függőleges szélprofil tulajdonságait. A szélprofil pontosabban méréssel vagy becsléssel határozhatjuk meg. Méréssel történő meghatározás során rádiószondás, wind profiler, Doppler-radar, SODAR-adatokat használhatunk fel. Ha becsüljük a szélprofil, akkor empirikus és félempirikus módszerek állnak rendelkezésre.

Ismert, hogy a levegő vízszintes áramlási sebessége magasságfüggő, a felszíntől távolodva a szélesebbesség, és így a szélteljesítmény is növekszik. A szélesebbesség magasságfüggése – függőleges szélprofil – a földrajzi hely függvénye, mivel a hely terepadottságai (felületi érdessége, beépítés sűrűsége, meglévő építmények nagysága, valamint a növénytakaró is) a széljárást erőteljesen befolyásolják (Sembery – Tóth 2004). Az egyenetlenség nem az egyes akadályok hatásából, hanem számos akadály összegződött hatásából származik. Az érdesség növekedésével csökken a szélesebbesség magasságszerinti növekedése, vagyis vastagabb lesz a felszínközeli réteg. A felszín tagoltsága mellett a vertikális szélprofil meghatározója a légrétegződés stabilis vagy labilis helyzete. Stabilis légrétegződés esetén a szélesebbesség jobban nő a magassággal. Ezt jellemzi a logaritmikus lineáris szélprofil, amely segítségével leírható a szél sebességében különböző magasságokban

beállt változás (Strack – Albers 1996). A meteorológiában leggyakrabban a logaritmikus szélprofilat használják a szélbecslések során. Ha figyelembe vesszük a d kiszorítási rétegvastagságot (m) is, azaz azt a magasságot, ameddig a terület valamilyen akadály (pl. növényzet) jelenléte miatt szélvédett, akkor a szélprofil a következőképp néz ki:

$$U(z) = \frac{u^*}{k} \ln \frac{(z-d)}{z_0} \quad (2.1)$$

ahol, u^* – súrlódási sebesség, k – Kármán-féle állandó (értéke $\approx 0,4$), d – kiszorítási rétegvastagság, z_0 – érdességi magasság, z – a vonatkozási magasság (Drew et al. 2013, Tse 2013, Millward-Hopkins et al. 2013).

Ugyanakkor a szélenergetikai vizsgálatokban legtöbbször hatványkitevős profilokat alkalmaznak. A függőleges szélprofil meghatározására alkalmazható ilyen formula az ún. Hellmann-féle hatványkitevős összefüggés (Aujeszky 1949, Barstein 1984):

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

Az összefüggésben szereplő α a Hellmann-kitevő. Az α értékének ismeretében egy adott magasságban mért szélsebességekből megbecsüljük más, általában nagyobb magasság szélsebességeit. A kitevőről szélenergia potenciált felmérő kutatások alapján is (Dobi et al. 2006, Varga et al. 2006, Tar 2007, Kircsi – Tar 2008) bebizonyosodott, hogy a felszín érdessége mellett (2.4. táblázat) számos légköri tényező is befolyásolja, emiatt értéke széles határok között változhat.

2.4. táblázat. A Hellmann-paraméter értékének függése a felszín típusától

A felszínborítás típusa	α kitevő értéke
Nyílt vízfelület, sík földfelszín	0,10-0,12
Füves, nyílt terep	0,15-0,16
Magas növényzet, cserjés	0,20-0,22
Erdős síkság	0,25-0,28
Beépített kisváros, fákkal és cserjékkel	0,30-0,35
Sűrűn beépített nagyváros, toronyházakkal	0,40-0,50

Forrás: saját szerkesztés Masters 2004 alapján

A kitevő a talajszinti levegő egyensúlyi helyzetének a függvénye, ebből eredően hőmérsékletfüggő, így napi és évszakos menete van (Ruedas et al. 2011, Tar 2012). Alacsony talajközeli hőmérsékletnél értéke nagy, magas talajközeli hőmérsékletnél értéke kisebb (Radics 2004). Az éjszakai értékek vizsgálatok szerint nagyobbak (Tar 2004a, 2007), de a napi menet általában sokkal szabályosabb (Tar 2012, Tar et al. 2015).

A Hellmann-féle hatványkitevős szélprofil szorosan összefügg a logaritmikus szélprofillal, hiszen a nemzetközi mérnöki gyakorlatban használt képlet alapján visszakapjuk a logaritmikus profilt:

$$\alpha = \frac{1}{\ln \frac{10}{z_0}} \quad (2.3)$$

A fenti kapcsolat fennállása szerint, egyenletes sík felszín felett ($z_0=0,01$ m) a kitevőnek a nappali órákban $\alpha=1/7 \approx 0,14$, az éjszakai órákban $\alpha=1/2 \approx 0,2$ konstans értéket vesznek fel (Bansal et al. 2002, Patel 2006, Varga et al. 2006, Ruedas et al. 2011). Az α értéke függ tehát az érdességi magasságtól (z_0). Az érdességi magasság az az elméleti magasság, ahol a szélesebbesség zérussá válik, ez pedig a felszín típusának a függvénye (2.5. táblázat).

2.5. táblázat. Az érdességi magasság (z_0 paraméter) függése a felszín típusától

A felszín típusa	Érdességi paraméter z_0 (m)
Nagyon sima; jég vagy iszap felszín	0,00001
Nyugodt nyílt tenger	0,0002
Hullámozó nyílt tenger	0,0005
Hóval borított felszín	0,003
Gyepes terület	0,008
Legelő	0,01
Szántóföld	0,03
Évelő növényekkel, alacsony cserjékkel borított terület	0,05
Ritka fás növényzet	0,1
Erdősült terület, elszórtan épületekkel, tereptárgyakkal	0,25
Kifejlett erdő vagy település, kis magasságkülönbségekkel	0,5
Város külterülete, fás terület, közepes magasságkülönbségekkel	1,5
Városközpontok, szabálytalan magasságú fás, erdős terület	3,0

Forrás: saját szerkesztés Borja et al. 1998, Ruedas et al. 2011, Masters 2004 alapján

Az érdességi paraméter ismeretében a logaritmikus szélprofil segítségével közvetlenül meghatározható más szintek szélessége (Belynskyi – Pobyyakho 1964, Anapolska – Handyn 1978, Lopatka 2004):

$$v_2 = v_1 \left(\frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \right) \quad (2.4)$$

Az α kitevő értéke, a Hellmann-féle hatványkitevős összefüggésből következés képen, az alsó v_1 és felső v_2 szintben mért szélesség ismeretével, az alábbi képlet alapján határozható meg (Tar 2016):

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} \quad (2.5)$$

Vizsgálatok szerint magyarországi domborzati viszonyok között $0,2 < \alpha < 0,4$, az alacsonyabb értékek a síkvidéki területekre, a magasabb értékek a dombvidéki, hegyes területekre jellemzőek (Schrempf 2007). Országos átlagban $\alpha = 0,25$ kitevőérték ajánlott (Dobi – Mika 2007), de területileg változó, Szegeden 0,2, Budapesten 0,3, Pakson 0,4-0,5 állapítottak meg (Tar 2004a, 2007, Kircsi – Tar 2008). Tar (2016) a Paksi toronymérések (10, 20, 50, 120 m) adatait felhasználva arra a következtetésre jutott, hogy a legmegbízhatóbb Hellmann-kitevőt nem a legvastagabb légréteghez (20 m és 120 m) tartozó szélességekből, hanem a legvékonyabb réteget határoló szintek (20 m és 50 m) méréseiből lehet meghatározni.

A hatványkitevős összefüggés az ipari szélerőművek számára szükséges 100-150 m magasságig is jó közelítést ad (Ruedas et al. 2011) a tényleges vertikális profil jellegére vonatkozóan. Mivel a kitevő értékét a levegő egyensúlyi helyzete is befolyásolja, ezért a becslés hibája is változó lehet. A hiba lehetősége növekszik talaj közeli inverzió, erősen stabil állapotok fennállása esetén, különösen éjszaka, főként pedig akkor, ha a kitevő napi menetét nem vesszük figyelembe, azaz egy konstans értékkel számolunk (Kircsi – Tar 2008).

A vizsgálatba vont meteorológiai mérőállomások némelyikén (Ungvár, Huszt, Pláj és Pozsezevszka) a szélesség mérő az előírt 10 m-nél magasabbra vagy alacsonyabbra van elhelyezve. A 3 órán-

ként mért szélesebbeségeket – az eredmények összehasonlíthatósága miatt – a Hellmann-féle hatványkitevős összefüggéssel minden esetben 10 m-es talajfelszín feletti magasságra transzformáltuk. Azonban az ehhez szükséges helyszíni, több szinten végzett szél mérésből meghatározott α kitevő pontos értéke egyik állomásról sem állt rendelkezésünkre. Ezért úgy döntöttünk, hogy a helyszíni bejárás alapján ismerve az állomások környezetét, a szakirodalomban (Borja et al. 1998, Ruedas et al. 2011, Masters 2004) található javaslatok szerint (2.5. táblázat) megválasztjuk az érdességi paramétert (z_0) és a (2.3) képlettel meghatároztuk a Hellman-kitevő értékét. Így Ungvár esetében $z_0=0,2$ m, Huszt $z_0=0,2$ m, Pláj $z_0=0,05$ m és Pozsezevszka esetében pedig $z_0=0,25$ m értékekkel számoltunk. Az α kitevő értékeire a következőket kaptuk: Ungvár $\alpha=0,26$, Huszt $\alpha=0,26$, Pláj $\alpha=0,19$ és Pozsezevszka esetében pedig $\alpha=0,27$. Megjegyezzük, hogy ezeket csak kényszerűségből határoztuk meg ilyen módszerrel. A pontos értékeket a stabilitástól függően profilmérések alapján határozhatjuk meg (Emeis 2013). A kapott értékek viszont hasonlítanak a Davenport et al. (2000), Tóth – Horváth (2003), Masters (2004), Radics (2004), Sembery – Tóth (2004), Patel (2006), Ruedas et al. (2011) vizsgálatai alapján kapott α értékekre, a felszín típusától és érdességétől függően. Ezt követően a kitevő segítségével a Pláj állomáson megbecsültük az alsó (8 m) szinten mért szélesebbesség alapján a felső (10 m) szint szélesebbeségeit. Az értékeket az alábbi képlet alapján transzformáltuk (Anapolska – Handyn 1978, de Renzo 1982):

$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (2.6)$$

ahol, v_2 a h_2 magassághoz tartozó szélesebbesség (m/s); v_1 pedig a h_1 referencia magasságban mért szélesebbesség (m/s).

Ungvár, Huszt és Pozsezevszka állomások esetében a 10 m-nél magasabb szintben mért szélesebbeségből az alábbi képlet alapján megbecsültük a 10 m-en mért szélesebbesség értékeit. Éspedig:

$$v_{10} = \frac{v_2}{\left(\frac{h_2}{10} \right)^\alpha} \quad (2.7)$$

Az α kitevő pontos értéke ismeretének hiányában a függőleges szélprofil meghatározására a WMO által elfogadott félempirikus magassági korrekció is felhasználható (Mezősi – Simon 1989, Shven 2004, 2010). Ennél az eljárásnál paraméter nincs:

$$v_h=v_{10}[0,233+0,656\lg(h+4,75)] \tag{2.8}$$

ahol, v_h a $h\neq 10$ m-en mért, v_{10} a 10 m magasságban mért/számolt szélesebesség. Az összefüggéssel kapcsolatban megállapításra került, hogy az adott magasságban számolt szélesebességek eloszlása a kisebb értékek felé tolódik. A 10 m-nél magasabb szinteken a képlet tehát alábecsül (Tar 1991a). Összehasonlítás képen ezzel a módszerrel is meghatároztuk 10 m magasságban a szélesebességeket. Az eredeti magasságban mért és a 10 m-re transzformált szélesebességek néhány statisztikai mutatóját: átlagát, szórását és variációs együtthatóját a 2.6. táblázatban foglaltuk össze.

2.6. táblázat. Az eredeti magasságban mért és a 10 m-re transzformált szélesebesség értékek statisztikai mutatói az egész időszakra

Meteorológiai állomás és az anemométer magassága (m)	Statisztikai mutató	Eredeti magasságban mért szélesebesség (m/s)	A 10 m-re transzformált szélesebességek (m/s)	
			Hellmann-féle hatványkitevős összefüggéssel	WMO-féle félempirikus magassági korrekcióval
Ungvár (14 m)	átlag	2,1	1,9	1,9
	szórás	1,8	1,7	1,7
	var. együtth.	0,9	0,9	0,9
Huszt (16 m)	átlag	0,9	0,8	0,8
	szórás	0,7	0,6	0,6
	var. együtth.	0,8	0,8	0,8
Pláj (8 m)	átlag	4,7	4,9	4,9
	szórás	3,8	4,0	4,0
	var. együtth.	0,8	0,8	0,8
Pozsezevszka (11 m)	átlag	3,4	3,3	3,3
	szórás	3,7	3,6	3,6
	var. együtth.	1,1	1,1	1,1

Forrás: saját szerkesztés

Annak ellenőrzésére, hogy a két módszer által kapott adatsor (minta) ugyanolyan sokaságból származik, azonosnak tekinthető-e, azaz a két valószínűségi változó ugyanolyan eloszlású-e, homogenitász vizsgálatot végeztünk χ^2 -próbával, amelynek próbastatisztikája (Dévényi – Gulyás 1988):

$$\chi^2 = n_1 n_2 \sum_{i=1}^r \frac{\left(\frac{v_i \cdot \mu_i}{n_1 n_2} \right)^2}{v_i + \mu_i} \quad (2.9)$$

ahol, a v_i és μ_i a valószínűségi változó megfigyelt értékei, n_1 és n_2 a mintaelemek száma, az r pedig a mintaelemek gyakorisági eloszlása intervallumainak száma. Ha a nullhipotézis, azaz hogy a két minta azonos eloszlású sokaságból származik igaz, akkor a χ^2 -próbastatisztika eloszlása közelítőleg $r-1$ szabadságfokú χ^2 -eloszlás lesz.

A homogenitász vizsgálat azt mutatta, hogy 0,95 elfogadási szinten mind Ungvár, Huszt, Pláj és Pozsezevszka esetében a két valószínűségi változó ugyan olyan eloszlású, tehát a két módszer által kapott adatsor szignifikánsan nem különbözik egymástól. Mivel a Hellmann-összefüggésben szereplő α -kitevő meghatározásánál figyelembe vettük a felszín típusának függvényében megválasztott érdességi paramétert (z_0), ezért ezt a számítást tartjuk pontosabbnak. A munkában a szükséges helyeken az említett 4 mérőpont esetében az így 10 m-re transzformált szélesség értékeket használtuk fel.

2.4.2. Alapstatisztikai műveletek és a mért szélességek gyakorisági eloszlása

Az alapstatisztikák közül a szélességre vonatkozóan az alábbiak kerültek alkalmazásra: átlag ($\bar{x}$), szórás (σ), variációs együttható (v), minimum (q_0), alsó kvartilis (q_1), medián (q_2), felső kvartilis (q_3), maximum (q_4), módusz (M_0), ferdeség (γ_1) és csúcsosság (lapultság) (γ_2).

A gyakorisági eloszlás egy olyan statisztikai mutató, mely arra mutat, hogy a minta elemei hogyan oszlanak meg a különböző csoportok között. A szélesség értékek $\Delta x = 1$ m/s osztályokba, intervallumokba kerültek besorolásra, így megkaptuk azok abszolút gyakorisági eloszlását (f_i). Ahhoz, hogy különböző, akár eltérő elemszámú mintát vessünk össze, szükséges az abszolút gyakorisági eloszlásból kiszámolnunk az egyes szélességek relatív gyakoriságát. A relatív gyakoriság

(g_i) a csoport abszolút gyakoriság értékének (f_i) a minta elemszámához (n) százalékosan viszonyított értéke (Obádovics 2003):

$$g_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^k f_i} 100 = \frac{f_i}{n} 100 \quad (2.10)$$

2.4.3. A mért szélesebbesség empirikus gyakorisági eloszlásának közelítése elméleti eloszlásokkal

Egy adott hely széleenergetikai jellemzése során gyakran az éves átlagos szélesebbesség értékét adják meg. A szélviszonyokat bemutató diagramokban majdnem mindig hosszú idejű átlagok szerepelnek. Egyetlen adat azonban nem elegendő a jellemzésre, mert a termelhető villamos energia a szélesebbesség köbével arányos (Patay 2003), az ilyen jellegű elhanyagolás, illetve átlagolás jelentős eltérést okozhat az éves energiapotenciál becslésénél. Az energetikai felhasználás szempontjából sokkal lényegesebb tudni azt, hogy az egyes szélesebbeségek – főleg azok, amelyek energiatermelésre alkalmasak – milyen gyakorisággal fordulnak elő. Ezt az adatok statisztikai feldolgozásával, a szélesebbesség gyakoriságának diagramjával lehet szemléltetni. A szélmegfigyelések empirikus gyakorisági eloszlásának közelítésével számos statisztikai és energetikai mutató is megkapható. Erre a célra alkalmas statisztikai eloszlásfüggvények között szerepel: a Weibull-eloszlás, a Rayleigh-eloszlás, normál eloszlás, lognormál eloszlás és gamma eloszlás is. A szélklimatológiában a leggyakrabban az említett eloszlásokat alkalmazzák (Tar 2008b, Bonfils 2011, Kravchyshyn et al. 2016, Francis – Nalamutt 2019).

Ezek közül a kétparaméteres Weibull-eloszlás alkalmazásának egy előnyös tulajdonsága, hogy ha az eloszlás paramétereit meghatározzuk az anemométer magasságában mért szélesebbesség értékekből, akkor a mérési szintre vonatkozó értékekből a paraméterek más magasságokra is kiszámolhatók, vagyis a Weibull-eloszlás segítségével a szélesebbesség gyakorisági eloszlása különböző magasságokban is leírható. Ennek nagy haszna van a szélpotenciálok megállapításában. Ennek okán ez az elméleti eloszlás a szélklíma, a széleenergia kutatásánál központi szerepet játszik (Dévényi – Gulyás 1988, Bartholy – Radics 2000b, Patay 2003, Radics 2004, Lyubimov et al. 2011, Morgan et al. 2011, Hou et al. 2012, Sobchenko – Khomenko 2015,

Kravchyshyn et al. 2016, Oshurok 2017, 2020, Francis – Nalamutt 2019) vagy egyes vizsgálatok során a szélesebségnek a Weibull-eloszlással való közelíthetősége kiindulási alapnak vehető egyéb szélstatistikák meghatározásához (Bartholy – Radics 2000, Hunyár et al. 2004, Radics 2004). A Weibull-eloszlás kétparaméteres (k és c) aszimmetrikus eloszlás, ahol a k az ún. alaktényező (mértékegység nélküli szám), a c pedig az ún. skálatényező (m/s), ezek a rendelkezésre álló adatbázisból számíthatók. A szélmérés magasságában érvényes k és c paramétereknek többféle meghatározási módja is ismert (Justus et al. 1978, Tar 2008b, Costa Rocha et al. 2012, Kidmo et al. 2015, Kravchyshyn et al. 2016).

A Weibull-eloszlás több más valószínűségi eloszlással is kapcsolatos, a k értéktől függően az eloszlás sűrűségfüggvénye drasztikusan változik, a c pedig a helyi szélviszonyokra jellemző értéket veszi fel. Az eloszlás $k=1$ esetén az exponenciális eloszlást, $k=2$ a Rayleigh eloszlás adja, míg $k=3,5$ közelében az eloszlás közel szimmetrikussá válik, és jól közelíti a normál eloszlást (Troen – Petersen 1989). Magyarországon 13 mérőhelyen megállapított k érték számtani átlaga 1,44 (Bartholy – Radics 2000b). Ukrajna területén Sobchenko – Khomenko (2015) Lemberg, Kijev, Odessza, Krivij Rih, Szimferopol, Dnyipropetrovszk és Donyeck 2001–2008-as széladatait vizsgálva megállapította, hogy a Weibull-eloszlás k paramétere 1,36 (Lemberg) és Odessza (1,71), a c paramétere 2,74 (Lemberg) és 4,81 (Szimferopol) között változik.

Első lépésben a szélesebség adatsorokból hisztogramot készítünk, ahogyan más ilyen jellegű vizsgálatoknál is tették, a szélesebségek $\Delta x=1$ m/s osztályokba való besorolásával (Costa Rocha et al. 2012, Xydis 2012, Khan et al. 2014, Kravchyshyn et al. 2016). Ezt követően a szélmegfigyelések empirikus gyakorisági eloszlásának közelítésére több elméleti eloszlást is kipróbáltunk, amelyek sűrűségfüggvényei és paraméterei meghatározásának módjai a következők:

- a *Weibull-eloszlás*, amelynek sűrűségfüggvényét legegyszerűbben az

$$f(x)=f(x;k;c)=\frac{k}{c}\left(\frac{x}{c}\right)^{k-1}e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} \quad (2.11)$$

alakban írhatjuk fel (Justus et al. 1978, Kartashov 2008, Tar 2008b).

Az eloszlás k (alaktényező) és c (skálatényező) paramétereinek meghatározási módjai közül a következő három módszert használtuk:

Az 1. módszer tulajdonképpen egy lineáris regresszió a sebesség-intervallumok középpontjának (v_i) és a hozzájuk tartozó kumulált gyakoriságoknak (p_i) a transzformált értékeire. A transzformációk a következők (Şahini – Aksakal 1999, Tar 2008b, Jamdade – Jamdade 2012):

$$x_i = \ln(v_i) \quad \text{és} \quad y_i = \ln[-\ln(1-p_i)] \quad (2.12)$$

Az $y = a + bx$ regressziós egyenlet konstansából a c és k a következőképpen határozható meg:

$$c = \exp\left(-\frac{a}{b}\right) \quad \text{és} \quad k = b \quad (2.13)$$

A 2. módszer a szélsősebesség alsó és felső kvartilisének (q_1 és q_3), valamint mediánjának (q_2) ismeretén alapszik. Így a k és c paraméterek a következő módon kerülnek meghatározásra (Tar 2008b):

$$k = \ln \frac{\left(\frac{\ln 0,25}{\ln 0,75}\right)}{\ln \left(\frac{q_3}{q_1}\right)} = \frac{1,573}{\ln \left(\frac{q_3}{q_1}\right)} \quad (2.14)$$

$$c = \frac{q_2}{(\ln 2)^{\frac{1}{k}}} \quad (2.15)$$

A 3. módszer a momentum-becslésre vezethető vissza (Tar 2008b, Costa Rocha et al. 2012, Maklad – Glencross-Grant 2014, Kravchyshyn et al. 2016). Ha ugyanis ismerjük az átlagos szélsősebességet (v_m) és a szórást (s_n), akkor

$$k = \left(\frac{s_n}{v_m}\right)^{-1,086} \quad (2.16)$$

$$c = \frac{v_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.17)$$

ahol, az s_n/v_m a variációs együttható, $\Gamma(x)$ pedig a gamma-függvény.

Az előző három eltérő módszer segítségével a Weibull-paraméterek a szélmérés magasságában meghatározhatók. Ha viszont ebből kiindulva ettől eltérő magasságokban akarjuk megadni az eloszlásokat, akkor a Weibull-eloszlás már említett tulajdonságait kell kihasználni, azaz az eloszlás paramétereit a mérési szintre vonatkozó értékekből más magasságokra is kiszámolhatjuk. Ha a paraméterek értéke az anemométer z_a magasságában c_a és k_a akkor egy $z \neq z_a$ szinten (Tar 2008b, Bonfils 2011, Azad et al. 2014, Kidmo et al. 2015):

$$c_z = c_a \left(\frac{z}{z_a} \right)^n \quad (2.18)$$

$$k_z = \frac{k_a \left[1 - 0,088 \ln \left(\frac{z_a}{10} \right) \right]}{\left[1 - 0,088 \ln \left(\frac{z}{10} \right) \right]} \quad (2.19)$$

Az n kitevő pedig:

$$n = \frac{[0,37 - 0,088 \ln c_a]}{\left[1 - 0,088 \ln \left(\frac{z_a}{10} \right) \right]} \quad (2.20)$$

Ily módon előállítva a napi átlagos szélesebségek eloszlását a szélmérés magasságától különböző szintben is, ugyanebben a magasságban, a skála- és az alakparaméter ismeretében kiszámoljuk az átlagos szélesebséget, szórást, móduszt és variációs együtthatót. Sőt a gamma-függvény $\Gamma(x)$ felhasználásával az átlagos szélteljesítmény (P) is kiszámítható.

A Weibull-eloszlású valószínűségi változóból vett minta v_m átlaga az alábbi módon határozható meg (Troen – Petersen 1989, Rehman et al. 1994, Morgan 1995):

$$v_m = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (2.21)$$

ahol c és k az eloszlás paraméterei az adott magasságban.

A szórása (Troen – Petersen 1989, Azad et al. 2014):

$$\sigma = c \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

Az eloszlás módusza, amely az eloszlás legvalószínűbb értéke lesz (Dokur – Kurban 2015, Rasham 2016):

$$M_0 = c \left(1 - \frac{1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.23)$$

A legnagyobb energiát hordozó szélsősebesség, amelynél optimális esetben a legnagyobb hatékonyság érhető el (Troen – Petersen 1989, Rasham 2016):

$$v_{maxE} = c \left(1 + \frac{2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.24)$$

Ez általában az átlagos szélsősebesség 1,4-2-szeresével egyenlő (Troen – Petersen 1989).

Ha $k=2$, akkor a Weibull-eloszlás egy speciális esetét, a Rayleigh-eloszlást kapjuk (Tar 2008b, Kartashov 2008, Schönwiese 2013).

- A *Rayleigh-eloszlás* sűrűségfüggvénye a következő képen írható le:

$$f(x) = f(x; c) = \frac{2x}{c^2} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^2} \quad (2.25)$$

Egy ilyen eloszlású valószínűségi változónak a várható értéke:

$$\mu = \frac{c\sqrt{\pi}}{2} \quad (2.26)$$

azaz a c paraméter becsült értéke az átlaggal arányos.

- A következő alkalmazott eloszlás a *normál eloszlás*, amelynek sűrűségfüggvénye:

$$f(x) = f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.27)$$

Az eloszlás paraméterei: az x valószínűségi változó μ várható értéke és σ szórása.

- A *lognormál eloszlás* sűrűségfüggvénye (Francis – Nalamutt 2019):

$$f(x)=f(x;\mu;\sigma)=\frac{1}{\sigma x\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.28)$$

Az eloszlás paraméterei: az $\ln x$ valószínűségi változó ($x>0$) μ várható értéke és σ szórása.

- A *gamma eloszlás* sűrűségfüggvénye:

$$\begin{aligned} f(x)=f(x;\lambda;p)&=\frac{\lambda^p}{\Gamma(p)}x^{p-1}e^{-\lambda x}, & \text{ha } x>0 \\ f(x)=f(x;\lambda;p)&=0, & \text{ha } x\leq 0 \end{aligned} \quad (2.29)$$

ahol, $\Gamma(p)$ a gamma-függvény. Egy ilyen eloszlású valószínűségi változó μ várható értéke és σ^2 szórásnégyzete a következő:

$$\mu=\frac{p}{\lambda} \quad (2.30)$$

$$\sigma^2=\frac{p}{\lambda^2} \quad (2.31)$$

ahol, a p és λ paraméterek a momentumok módszerével könnyen becsülhetők (Dévényi – Gulyás 1988, Matyasovszky 2002, Tar 2008b, Kostohrizova et al. 2014, Kravchyshyn et al. 2016).

2.4.4. Illeszkedésvizsgálat χ^2 próbával

A paraméterek becslése után a χ^2 -próba segítségével elvégeztük az illeszkedés-vizsgálatot 10%, 5% és 1% szignifikancia szinteken. Azt a nullhipotézist teszteltük, hogy x eloszlása egy adott, teljesen meghatározott eloszlás, a megfigyelt mérési sorozat eloszlásának eltérése az adott típusú eloszlástól csupán véletlennek tulajdonítható. Ennek eredményeit táblázatba foglaltuk össze, jelölve azokat az eseteket, amelyekben a közelítés legalább a fenti szignifikancia szint valamelyikén jónak bizonyult.

A χ^2 -próba próbastatisztikája (Reimann – Tóth 1995):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2.32)$$

ahol, O_i az empirikus eloszlás gyakoriságait vagy relatív gyakoriságait jelenti, míg E_i a meghatározott eloszlás ugyanazon eseményekhez kapcsolódó gyakoriságait vagy valószínűségeit.

A χ^2 -értéke annál nagyobb, minél nagyobb a különbség a megfigyelt és a nullhipotézis alapján feltételezett eloszlás gyakoriságai között. Az χ^2 -próba végrehajtása után az alábbi megállapításokat tehetjük:

- ha a számított érték kisebb, mint a táblázatból kikeresett (vagy a Microsoft Excel „=INVERZ.CHI” függvénye segítségével meghatározott) kritikus érték, akkor a nullhipotézist elfogadjuk,
- ha a számított érték nagyobb vagy egyenlő a kritikus értéknél, akkor a H_0 -t elvetjük, x nem követi az adott elméleti eloszlást.

2.4.5. A lineáris korrelációs együttható meghatározása

A sztochasztikus kapcsolatok (két szélsőség – teljesen függvény-szerű és a teljesen független – közötti átmenet) felderítésére, két valószínűségi változó közötti kapcsolat szorosságának kifejezésére a lineáris korrelációs együttható (r) szolgál. A lineáris korrelációs együttható értéke +1 vagy -1 között változhat, pozitív értékei a két változó közötti egyértelmű, negatív értékei pedig ellentétes értelmű kapcsolatra utalnak. Függvénykapcsolat esetén értéke +1 és -1, ha pedig a két változó között összefüggés nincs, értéke 0. A kapcsolat nemlétét nemcsak 0 értékű korrelációnál, hanem 0 körüli kisebb abszolút értékű korrelációs együttható esetén is ki kell mondanunk (Fidy – Makara 2005).

2.4.6. A lineáris korrelációs együttható szignifikanciája

A korreláció számítás során nyert együttható is úgy tekinthető, mint egy feltevés, hogy a két változó között kapcsolat van. Az, hogy ez a konkrét számmal (r) kifejezett kapcsolat reális-e, szintén feltevés vizsgálattal dönthető el. A két változó összefüggésének szignifikancia vizsgálatára felállított $H_0: \rho=0$ hipotézisünk, azaz a két valószínűségi változó közötti egyszerű lineáris korrelációs együttható értéke 0, vagyis korrelálatlanok, tesztelésére a varianciaanalízis során alkalmazott (Huzsvai – Vincze 2012) F -próbát használtuk. A mintákból meg-

határozott négyzetösszegek segítségével vizsgálhatjuk a nullhipotézis fennállását. A varianciaanalízis számításait és eredményeinek bemutatását a nemzetközileg is szabványosnak tekinthető ANOVA (ANalysis Of VAriance) táblázat segítségével rendeztük (2.7. táblázat). A regressziós modellben a teljes eltérés-négyzetösszeg két részre bontható: regressziós hatásra (R) és hibahatásra (E). Azzal, hogy az együttthatók legkisebb négyzetes becslése során a reziduális négyzetösszeget (SSE) minimalizáljuk, a regressziós becslések átlagtól vett eltérésnégyzetösszegét (SSR) maximalizáljuk. Az átlagértékek aránya – az F -hányados – „nagy” lesz, ha van lineáris összefüggés a függő és független változók között.

2.7. táblázat. Az ANOVA tábla általános sémája

(SST : a függő változó átlagtól vett eltérésnégyzet-összege;

SSR : a regressziós becslések átlagtól vett eltérésnégyzet-összege;

SSE : a reziduális négyzetösszeg; SP : az x és y változók összes eltérésszorzata;

SQ_x az x változó összes eltérésnégyzete;

SQ_y : az y változó összes eltérésnégyzete; n - elemszám)

A variancia forrása	Eltérésnégyzetösszeg (SS)	Szabadságfok (DF)	Átlagos négyzetösszeg (MS)	F-érték
Regressziós hatás (R)	$SSR = \frac{SP^2}{SQ_x}$	1	$MSR = \frac{SSR}{1}$	$F = \frac{MSR}{MSE}$
Hibatényező (E)	$SSE = SQ_y - \frac{SP^2}{SQ_x}$	$n-2$	$MSE = \frac{SSE}{n-2}$	
Teljes (T)	$SST = SQ_y$	$n-1$	---	

Forrás: saját szerkesztés Huzsvai – Vincze 2012 alapján

Az F -próba végrehajtása után az alábbi megállapításokat tehetjük:

- ha a számított érték kisebb, mint a táblázatból kikeresett (vagy a Microsoft Excel „=INVERZ.F” függvénye segítségével meghatározott) kritikus érték, akkor a nullhipotézist elfogadjuk.
- ha a számított érték nagyobb vagy egyenlő a kritikus értéknél, akkor a két változó között az adott elfogadási szinten megbízható összefüggés van, a lineáris korrelációs együtttható (r) szignifikánsan eltér 0-tól.

2.4.7. *A lineáris regressziós egyenes paramétereinek meghatározása*

A kapcsolatba hozott változókra meghatároztuk a regressziós egyenes értékeit. A regressziós egyenes, a korrelációs együttható és a kapcsolatba hozott változók számtani közepének és szórásának ismeretében, az adott x -hez tartozó legvalószínűbb y értéket szolgáltatja.

A regressziós egyenes egyenletének általános alakja (Péczely, 1998):

$$y = ax + b \quad (2.33)$$

Az egyenlet konstansait az alábbi kifejezések szolgáltatják:

$$a = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad (2.34)$$

$$b = \bar{y} - \bar{x}a \quad (2.35)$$

2.4.8. *A szélteljesítmény meghatározása*

A szélenergia hasznosítás alapelve, hogy a légkör mozgási energiáját használják fel közvetlenül mechanikai energiaforrásként, vagy egy átalakító rendszer segítségével elektromos energiává transzformálva. Az áramlási irányra merőleges A függőleges felületen (m^2) v sebességgel (m/s), t idő (s) alatt átáramló levegő mozgási, kinetikus energiáját (E_{kin}) a következőképpen írhatjuk fel (de Renzo 1982, Patay 2003, Sokolovsky – Rotkin 2017):

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho A t v^3 \quad (2.36)$$

ahol, m a levegő tömege (kg), ρ a levegő sűrűsége (kg/m^3). Ha a szélirányra merőleges keresztmetszetet és az időt egységnyinek vesszük, azaz $A = 1 m^2$ és $t = 1 s$, akkor a fajlagos szélteljesítményt kapjuk.

A potenciális szélenergia mérőszáma tehát az áramló levegő kinetikus energiája, illetve az ebből származtatott fajlagos szélteljesítmény (P_f): a szélirányra merőlegesen, egységnyi keresztmetszeten, egységnyi

idő alatt átáramló energia (Anapolska – Handyn 1978, de Renzo 1982, Patay 2003), melynek mértékegysége W/m^2 lesz:

$$P_f = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2.37)$$

A (2.37) egyenletből látszik, hogy a szélteljesítmény a szélesebesség harmadik hatványával arányos, ezért fontos a nagy átlagos szélesebességű pontok kiválasztása. Az egyenlet rámutat arra is, hogy a szélenergia arányos a levegő sűrűségével, tehát a magasabb tengerszintfö-lötti pontoknál ugyanahhoz a szélesebességhez kevesebb energia kapcsolódik. A levegő sűrűsége viszont függ annak hőmérsékletétől, nyomásától és egyéb összetevőjétől. A levegő sűrűségének hőmérséklettől és nyomástól való függése az általános gáztörvényből határozható meg. A p nyomású és V térfogatú, m tömegű és T hőmérsékletű levegőre írhatjuk, hogy:

$$pV = mR_l T \quad (2.38)$$

ahol R_l a levegő specifikus gázállandója. Ez alapján a levegő sűrűségfüggvénye:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p}{R_l T} \quad (2.39)$$

A (2.39) egyenlet ideális gáznak tekinti a levegőt. Noha a légkörben extrém nyomások és hőmérsékletek nem fordulnak elő, a levegő hőmérsékletének, nyomásának és egyéb összetevőjének (pl. vízgőztartalmának) figyelmen kívül hagyásával a szélteljesítmény becslésében kisebb hibával kell számolnunk (Molodan 2013). Patay (2003) szerint, ha a légnyomást (Magyarország földrajzi szélességén való változását tekintve) az energetikai számításoknál nem vesszük figyelembe, akkor megközelítőleg +4,4% és -1,4% közötti hibával dolgozhatunk. A hőmérséklet növekedésével a (száraz) levegő sűrűsége csökken (Péczeley 1998). A levegőhőmérséklet figyelmen kívül hagyásával a széleenergetikai számítások hibája +5 és -5% között változhat (Patay 2003). A levegőben azonban mindig jelen van több-kevesebb vízgőz is, amely szintén befolyásolja a levegő aktuális sűrűségét.

A telítetlen nedves levegő sűrűsége (a levezetés mellőzésével), a virtuális hőmérséklet (T_v) alkalmazásával, az alábbi egyenlettel írható le:

$$\rho = \frac{p}{R_l T} \left(1 - 0,377 \frac{e}{p} \right) = \frac{p}{R_l T_v} \quad (2.40)$$

ahol e a gőznyomás. A virtuális hőmérséklet (T_v) az a hőmérséklet, amelyen az ugyanakkora nyomású száraz levegő sűrűsége megegyezik a nedves levegő sűrűségével (Péczy 1998). A levegő sűrűségének változását figyelembe véve felírhatjuk a szél ún. dinamikus fajlagos teljesítményfüggvényét, amely minden fontos levegőfizikai paraméter hatását figyelembe veszi (Patay 2003):

$$P_{fdin} = \frac{1}{2} \frac{p}{R_l T_v} v^3 \quad (2.41)$$

A függvénnyel pontosan meghatározható a szélteljesítmény, azonban alkalmazásának feltétele, hogy minden benne szereplő változót egyidejűleg mérni vagy számítani szükséges. Ez megnehezíti használatát, így a levegő sűrűségét szélenergetikai számításoknál állandónak vesszük ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, 15°C -on és 760 mm légnyomás mellett). Jelen munkában ezzel az állandó légnyomási értékkel dolgoztunk, mivel a dinamikus fajlagos teljesítményfüggvényhez szükséges hőmérséklet, légnyomás és gőznyomás adatsorok nem álltak rendelkezésünkre.

A szélgenerátorok esetén a szélteljesítmény arányos a rotor által súrolt felülettel (A), vagy a rotor átmérőjének négyzetével, azaz a szélirányra merőleges keresztmetszettel (Patay 2003, Schrempf 2007, Tar 2007, 2008a, Tar – Szegedi 2011):

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (2.42)$$

A (2.42) függvény a szélturbina elméleti maximális teljesítményét adja meg, azonban ennek csak 16/27-ed része (59,3%) alakítható át ténylegesen mechanikai energiává – ez a névleges teljesítmény, a fennmaradó közel 40% hasznosítatlan marad (Sembery – Tóth 2004). Ezt írja le a Betz-törvény, amelyet Albert Betz német fizikus 1919-ben fogalmazott meg. A maximális teljesítmény akkor érhető el, ha a turbina előtt és mögött a szélesebségek aránya 1:3-hoz. A rendelkezésre álló

összes potenciális energiából a ténylegesen kinyerhető energiát (P^*) a turbina hatékonyságát figyelembe véve kapjuk meg (Schrempf 2007):

$$P^* = \frac{1}{2} E \rho v^3 A \quad (2.43)$$

ahol, E a turbina hatékonysága.

2.4.9. A Weibull-eloszlás alkalmazása a szélteljesítmény becslésére különböző magasságokban

A szélesebségek, azok átlagának, szórásának, gyakorisági eloszlásának a Weibull-eloszlással történő különböző magasságokban való meghatározásának módját a 2.4.3. alfejezet (2.11-2.24) összefüggéseivel mutattuk be. Ezek alapján meghatározhatjuk a mérési szintben és ettől eltérő magasságokban az eloszlás k és c paraméterét.

A teljesítménybecslés Weibull-eloszlással történő közelítése az eloszlás már említett tulajdonságán alapul, azaz ha a v szélesebség k és c paraméterű Weibull-eloszlással jellemezhető, akkor v^m szintén Weibull-eloszlású k^m és c^m paraméterekkel (Troen – Petersen 1989, Bonfils 2011, Azad et al. 2014).

A fajlagos szélteljesítményt a gamma-függvény (Γ) felhasználásával az alábbiak szerint definiálhatjuk (Troen – Petersen 1989, Bartholy – Radics 2000b, Ahmed et al. 2013):

$$P_f = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.44)$$

ahol, c és k a Weibull-eloszlás paraméterei.

A fajlagos szélteljesítmény megadható a különböző magassági szinteken előállított relatív gyakorisági eloszlások segítségével is (de Renzo 1982, Osadchyi et al. 2014, Moskalchuk 2017):

$$P_f = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^n v_i^3 p_i \quad (2.45)$$

ahol, v^3 a sebesség-intervallumok ($\Delta x = 1$ m/s) középpontjainak (v_i) köbös értékei, a p_i a hozzájuk tartozó kumulált relatív gyakoriságok, az n pedig a sebesség-intervallumok száma.

Mivel a (2.45) összefüggés is a szélesebségek gyakorisági eloszlásán alapszik, ezért ugyanazt az eredményt adja, mint az előző (2.44).

A fajlagos szélteljesítmény a magasság függvényében a Hellmann-féle hatványkitevős összefüggés segítségével is meghatározható (Lysen 1982, Patay et al. 2008, Shata – Hanitsch 2008):

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^3 = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{3\alpha} = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.46)$$

ahol a P_1 a referencia (általában az alsóbb szint) magasságban adódó fajlagos szélteljesítmény, az α a Hellmann-kitevő. Az egyenletből:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{3\alpha} \quad (2.47)$$

2.4.10. Egy adott időszak egy napjára átlagosan jutó fajlagos szélteljesítmény meghatározása közelítő függvénnyel

Egy adott időpontban v sebességgel áramló levegő fajlagos szélteljesítménye tehát a (2.37) összefüggéssel meghatározható. Ettől eltérően, egy hosszabb időszak fajlagos szélteljesítményének meghatározására két lehetőség adódik:

- az összefüggésben az időszak átlagsebességét írjuk a v helyébe,
- az időszak egyes (diszkrét) időpontjaiban meghatározott értékeket összegezzük.

A második lehetőség gyakorlatiasabb. Ekkor azonban az összeg értékének az időszak mérési időpontjainak számától való függése jelent problémát, hiszen más lesz az összeg értéke, ha pl. egy napon minden órában vagy tíz percenként vagy esetleg csak az ún. terminus időpontokban megmért szélesebességekből végezzük el a számítást. Ez a függés az átlagolással csökkenthető, ekkor viszont a nap egy mérési időpontjára (pl. egy órájára) átlagosan eső fajlagos szélteljesítményt kapjuk meg. Természetesen a módszer általánosítható napokból álló hosszabb időszakokra is (Tar 2003a, 2008a).

E függőség kiküszöbölésére létezik elvi megoldás: a szélesebességek napi menetét megadó függvénygörbe alatti területét kell meghatározni és ezt $\rho/2$ -vel megszorozva megkapjuk a napi összes fajlagos szélteljesítmény pontos értékét. A számítást integrálással tudjuk elvégezni. Tetszőleges időszak (pl. hónap, évszak, év) egy napjára átlagosan jutó fajlagos szélteljesítményt (P_{fmd}) alkalmasan választott közelítő

függvény segítségével becsülhetjük. A közelítő függvény a következő (Tar 2008a, Tar – Szegedi 2011):

$$f_2(x) = a_0 + \sum_{m=1}^2 \left(a_m \cos \frac{2\pi mx}{N} + b_m \sin \frac{2\pi mx}{N} \right) \quad (2.48)$$

vagyis egy trigonometrikus polinomokból álló Fourier-sor (Martazina – Chayka 2009) első két eleme, ahol N a mérési időpontok száma, $x = 1, 2, \dots, N-1$. A fenti (2.48) függvény primitív függvénye:

$$F_2(x) = a_0 x + \sum_{m=1}^2 \left(\frac{a_m}{\alpha_m} \sin \alpha_m x - \frac{b_m}{\alpha_m} \cos \alpha_m x \right) \quad (2.49)$$

ahol, $\alpha_m = \frac{2\pi m}{N}$. Ha tehát az a_m és b_m együtthatók meghatározásához a szélsőbesség köbök mérési időpontonkénti átlagának idősorát használjuk, akkor az időszak egy napjára átlagosan jutó fajlagos szélteljesítmény (Tar – Kircsi 2001, Tar et al. 2002):

$$P_{fmd} = \frac{\rho}{2} T_{ga} \quad (2.50)$$

ahol, tehát

$$T_{ga} = F_2(N-1) - F_2(0) \quad (2.51)$$

a görbe alatti terület. A görbe alatti területet az x értékek által meghatározott területegységben adja meg a határozott integrál.

A fent leírt módszert az éves és az évszakos napi átlagos szélteljesítmény meghatározására óránkénti adatok felhasználásával Tar – Kircsi (2001), Tar et al. (2002) dolgozták ki. Az illesztés/közelítés jóságának mérésére az ún. reziduális szórásnégyzet szolgál:

$$s_m^2 = s_{m-1}^2 - 0,5 A_m^2 \quad (2.52)$$

ahol, $s_0^2 = s_n^2$, azaz a szórásnégyzet,

$$A_m = (a_m^2 + b_m^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.53)$$

vagyis az m hullám amplitúdója (Dobosi – Felméry 1971).

Látható, hogy az s_m^2 függ az adatok nagyságától, azaz nem alkalmas esetünkben az összehasonlításra. Erre a közelítés relatív mértékét definiáló

$$s_{0m} = \frac{s_0^2 - s_m^2}{s_0^2} \quad (2.54)$$

paramétert használtuk, amely már az értékektől függetlennek tekinthető a szélsőségek nagyságától, így az anemométer magassága szerint sem kell korrigálni. Az s_m^2 értékei a közelítő polinomok számának növekedésével csökkennek. Tegyük fel, hogy ez nem így van, ekkor $s_m^2 \approx s_0^2$, azaz $s_{0m} \approx 0$. Amennyiben az s_m^2 -vel való közelítés „teljesen tökéletes”, akkor $s_m^2 \approx 0$, azaz $s_{0m} \approx 1$. A közelítő függvény illeszkedése tehát annál jobb, minél közelebb áll az s_{0m} az 1-hez (Tar – Kircsi 2001, Tar et al. 2002, Tar 2006).

2.5. A szélirányok statisztikai, energetikai elemzése

2.5.1. A jellemző szélirányok meghatározása

Az adott helyre és adott időszakra jellemző és nem jellemző szélirányok kiválasztására egy a valószínűségek egyenlőségének eldöntésére vonatkozó átalakított statisztikai próbát használtunk fel. Az alkalmazott statisztikai próba szerint adott valószínűségi szinthez meghatározható egy kritikus tartomány h_1 és $h_2 > h_1$ határokkal úgy, hogy ha van olyan D szélirány, amelynek g_D gyakoriságára teljesül a $g_D > h_2$ egyenlőtlenség, akkor az irányok eloszlása nem tekinthető egyenletesnek. Ilyen irány azonban több is van, ezeket az adott helyre az adott időszakban jellemző irányoknak nevezzük. Ha $g_D < h_2$, akkor pedig nem jellemző irányoknak nevezzük (Tar 1991a, 1991b, 2004b, 2007, Tar – Verdes 2003). A h_1 és h_2 értékei (Vince 1975):

$$h_1 = p_0 n - u_\varepsilon \sqrt{np_0(1-p_0)} \quad (2.55)$$

és

$$h_2 = p_0 n + u_\varepsilon \sqrt{np_0(1-p_0)} \quad (2.56)$$

ahol p_0 egy szélirány előfordulásának valószínűsége egyenletes eloszlást feltételezve, azaz most – mivel 8 szélirányt különböztetünk meg – $p_0 = 1/8 = 0,125$, n az összes esetek száma (mintanagyság: 8 [napi 8 mérés] $\times$ napok száma).

Az u_ε pedig a

$$2\Phi(u_\varepsilon) - 1 = 1 - \varepsilon \quad (2.57)$$

összefüggésből határozható meg, ahol $\Phi(x)$ a standard normál eloszlású valószínűségi változó eloszlásfüggvénye. Az ε valamely szélirány, a p_0 alapvalószínűség feltételezése mellett, n esetből való g_D -szeri előfordulásának valószínűségi küszöbértéke. Így, ha $\varepsilon=0,0027$ (Dévényi – Gulyás 1988), akkor $u_\varepsilon=2,98$.

Az egyes szélirányok relatív gyakoriságát százalékban (%) adjuk meg. A h_1 és h_2 kritikus határok relatív gyakoriságai pedig: $h_1 = 100h_1/n$, $h_2 = 100h_2/n$.

2.5.2. A legnagyobb energiatartalommal bíró jellemző szélirányok meghatározása

A felszínen mért széladatokat felhasználhatjuk az adott szint energetikai jellemzésére. Az energetikai számításoknál meghatározó lehet azoknak az időszakoknak vagy akár szélirányoknak a lehatárolása, kiválasztása, amelyek szélenergiában gazdagabbak a többinél (Tar 2003a, Tar – Verdes 2003, 2004b). Egy adott D szélirány adott időszakra (pl. év, évszak, hónap) vonatkozó átlagos energiatartalmát a D napi átlagos fajlagos széltejeljesítményével lehet meghatározni, amely az alábbi összefüggéssel írható le:

$$P_{fI}(D) = \frac{\rho}{2} \sum_{j=1}^k \frac{f_{Dj}}{N} v_j^3 \quad (2.58)$$

ahol, f_{Dj} annak az abszolút gyakorisága, hogy D irányú szél sebessége v_j legyen, k a szélesebbesség-intervallumok, N pedig az adott időszakban figyelembe vett napok száma. Ha P_{fI} az időszak (irányoktól független) napi átlagos fajlagos széltejeljesítménye, akkor a

$$p_D = \frac{P_{fI}(D)}{P_{fI}} \quad (2.59)$$

arány az adott szélirány relatív energiatartalmát adja meg. Az uralkodó széliránynak a legnagyobb energiatartalommal bíró jellemző szélirányt tekintjük (Tar 2003a, Tar – Verdes 2003, 2004b).

3. A FELSZÍNKÖZELI SZÉLMEZŐ ENERGETIKAI JELLEMZŐI

A szélergia hasznosítás egy többkomponensű, sokparaméteres folyamat. A helyi szélviszonyok és az alkalmazott energia-átalakító rendszer teljesítményértékei együttesen definiálják a kinyerhető energia mennyiségét. A kitermelhető szélergia meghatározását a meteorológiai állomások széladatainak részletes statisztikai vizsgálatával és/vagy modellszámításokkal lehet elvégezni. Ebben a fejezetben a 9 meteorológiai mérőállomás szélsébség és szélirány adatsorait elemezzük a bemutatott módszerek felhasználásával. A kárpátjai felszínközeli szélmező energetikai paramétereit vizsgálva számos olyan ismerethez és szélklíma jellemzőhöz jutottunk, amely az adott terület további energiatermelési mutatóinak meghatározásához, a szélörművek telepítési helyszíneinek kiválasztásához előnyösen alkalmazható. Ezzel hozzájárulva a szélergia felhasználás jövőbeli elterjedéséhez Kárpátján. Elért eredményeinket tematikus sorrendben közöljük.

3.1. A felszínközeli szélmező statisztikai jellemzése

3.1.1. A mérőállomások szélsébségeinek alapstatisztikai mutatói

Az alapstatisztikai eredmények elemzése egy fontos része a szélklímatológiai vizsgálatoknak. A szélsébség leggyakoribb mutatószámai a következők: átlag (évi, évszakos, havi, napi stb.), szórá, variációs együttható, módusz, alsó kvartilis, medián, felső kvartilis, maximum, csúcsosság és ferdeség. A vizsgált 9 mérőállomáson a teljes időszakra vonatkoztatva a statisztikai mutatókat a 3 órás mérésekből és az ezekből készített napi átlagokból is meghatároztuk (3.1. táblázat). Ezt azért tartottuk fontosnak, mert a 3 órás mérésekből számoltak alapján több mérőpont az egyes paraméterek alapján összehasonlíthatatlan. Ez azzal magyarázható, hogy az állomásokon elég magas a szélsébség szenzor indítási küszöb alatti értékei előfordulásának aránya (2.3. alfejezet, 2.2-2.3. táblázat).

A hidrometeorológiai szolgálattól származó adatbázisban a szélsébség értékek egész számokkal (0, 1, 2 stb.) vannak feltün-

tetve (a mérési naplóban is). A szélmérő műszerek viszonylag magas indítási sebessége (1,0-1,2 m/s) miatt gyakorta regisztrált „szélcsend” az adatsorokban sok 0-ás értéket eredményez. Emiatt az egyes statisztikai mutatók (pl. módusz, kvartilisek) szerint nem tudtunk megfelelő sorrendet felállítani az állomások között. A napi átlagok, bár bizonyos mértékben elfedik a nagyobb felbontású adatsor szélsőségeit, de az így kapott paraméterek tükrében jobban kirajzolódnak a mérőpontok elhelyezkedéséből adódó különbségek.

A mérőállomások átlagos szélesebsége a teljes időszakra vonatkoztatva 0,8 m/s (Huszt) és 4,9 m/s (Pláj) között változik. Ki kell emelnünk a Pozsezevszkat, ahol a második legmagasabb értéket (3,3 m/s) tapasztaljuk, illetve azt a tényt, hogy az összes többi pontban sehol sem éri el az átlagos szélesebség a 2 m/s-ot.

Az átlagebességek összehasonlításánál figyelembe kell vennünk a 2.3. alfejezetben leírtakat, miszerint az állomások többsége összetett orográfiai környezetben foglal helyet, ami erősen módosít(hat)ja a légcirkulációt.

A mérőpontokat az orográfiai környezetük alapján a következőképpen csoportosíthatjuk:

- alföldi (Ungvár, Huszt), amelyek a Kárpátaljai-alföldön helyezkednek el és orográfiailag többé-kevésbé nyitottak;
- nem alföldi folyóvölgyi (Nagyberezna, Rahó, Ökörmező, Alsóverecke, Alsóhidegpatak), amelyek a Vulkanikus- és a Havasi-vonulat 800-1000 m vagy ennél magasabb hegységeit merőlegesen felszabdalo folyók mély völgyeiben helyezkednek el, ezért orográfiailag viszonylag zártak;
- hegységi (Pláj és Pozsezevszka), amelyek a Havasi-vonulatban, a környezetükből kiemelkedő hegygerincen/hegycsúcs közelében találhatók, részben (Pozsezevszka) vagy minden égtáj felől teljesen nyitottak és az 1300-1500 m-es légréteg áramlási viszonyait mutatják.

Az átlagos szélesebség alapján az állomások közötti növekvő sorrend a következő: Huszt, Ökörmező, Nagyberezna, Rahó, Alsóhidegpatak, Alsóverecke, Ungvár, Pozsezevszka és Pláj.

3.1. táblázat. A mérőállomások szélsősebesség idősorainak alapstatisztikai mutatói, a 3 órás mérésekből (a) és a napi átlagokból (b) számolva, a 2011–2015-ös időszakban (mértékegység m/s, a dőlt és aláhúzott mutatóknak nincs mértékegysége, kiemelve: **első** és **második legnagyobb** és **legkisebb** érték)

Statisztikai mutatók	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsegyevska (1451 m)
a) a 3 órás mérésekből számítva									
átlag	1,9	<u>0,8</u>	1,3	1,4	1,2	1,8	1,5	<u>4,9</u>	3,3
szórás	1,7	<u>0,6</u>	1,6	2,1	1,4	1,8	1,4	<u>4,0</u>	3,6
<i>variác. e.h.</i>	0,9	0,8	1,3	<u>1,5</u>	1,2	1,0	0,9	<u>0,8</u>	1,1
módusz	<u>0,0</u>	0,9	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	2,0	<u>4,2</u>	<u>0,0</u>
alsó kv.	<u>0,0</u>	0,9	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>2,1</u>	<u>0,0</u>
medián	1,8	0,9	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	2,0	2,0	2,0	<u>4,2</u>	2,9
felső kv.	2,8	<u>0,9</u>	2,0	2,0	2,0	3,0	2,0	<u>6,3</u>	4,9
maximum	11,9	<u>8,9</u>	16,0	14,0	24,0	13,0	22,0	<u>35,5</u>	27,3
<i>csúcsosság</i>	<u>1,0</u>	<u>9,7</u>	3,8	2,3	<u>11,9</u>	1,6	8,2	2,1	2,4
<i>ferdeség</i>	<u>0,9</u>	1,4	1,5	1,7	<u>1,8</u>	1,1	1,1	1,2	1,4
b) a napi átlagokból számítva									
átlag	1,9	<u>0,8</u>	1,3	1,4	1,2	1,8	1,5	<u>4,9</u>	3,3
szórás	1,1	<u>0,3</u>	1,0	1,4	0,8	1,2	0,7	<u>3,1</u>	2,9
<i>variác. e.h.</i>	0,6	<u>0,4</u>	0,8	<u>1,0</u>	0,7	0,7	0,5	0,6	0,9
módusz	1,2	0,8	0,8	0,7	1,0	1,0	1,3	<u>2,1</u>	<u>0,6</u>
alsó kv.	1,0	0,7	0,6	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	1,0	1,0	<u>2,5</u>	1,2
medián	1,7	<u>0,8</u>	1,0	1,0	1,0	1,5	1,4	<u>4,3</u>	2,6
felső kv.	2,5	<u>1,0</u>	1,8	1,8	1,5	2,5	1,8	<u>6,6</u>	4,6
maximum	7,8	<u>3,1</u>	7,8	8,5	7,5	7,3	4,3	20,3	<u>23,1</u>
<i>csúcsosság</i>	1,5	3,7	3,4	3,1	<u>4,8</u>	1,8	1,2	<u>1,1</u>	2,5
<i>ferdeség</i>	0,9	1,1	1,6	<u>1,7</u>	1,5	1,2	<u>0,9</u>	1,0	1,4

Forrás: saját szerkesztés

Fontos megjegyeznünk, hogy a paraméterek jelentős többségénél, kivéve a variációs együtthatót, a csúcsosságot és a ferdeséget

a Pláj állomáson tapasztaljuk az első legnagyobb értékeket. A második legnagyobb értékek a Pozsezevszán jelennek meg. Ez egy viszonylag szélsőséges széljárású pont. Ezt támasztja alá az átlaghoz képest magas szórás és variációs együttható (0,9), az alacsony módusz (0,6), ami a legkisebb az állomások között, illetve a legnagyobb napi átlagos szélesebség érték is (23,1 m/s). Ez a szélenergia kitermelés szempontjából nem kedvező, hiszen az egyenletes széljárás a jobb, azaz ha szélesebségek állandóan az átlag körül mozognak. Azok a kedvező széljárású területek, ahol a magas átlagos szélesebséghez alacsony variációs együttható párosul. A variációs együttható 0,4 (Huszt) és 1,0 (Rahó) között változik. Az állomások közötti növekvő sorrend: Huszt, Alsóhidegpatak, Ungvár, Pláj, Alsóverecke, Ökörmező, Nagyberezna, Pozsezevszka, Rahó. Az átlagos szélesebségek legnagyobbak Ungváron, a Pozsezevszán és a Plájon. Ezek közül a legkevésbé változékony széljárású Ungvár és Pláj.

A módusz – azaz a legtöbbször előforduló szélesebség – a Plájon kívül (2,1 m/s) szintén sehol sem éri el a 2,0 m/s-ot és a második legnagyobb érték Nagybereznán (1,6 m/s) van. Az állomásonként tapasztalható növekvő sorrendje: Pozsezevszka, Rahó, Nagyberezna, Huszt, Ökörmező, Alsóverecke, Ungvár, Alsóhidegpatak, Pláj. A medián értéke 0,8 m/s (Huszt) és 4,3 m/s (Pláj), az alsó kvartilis 0,5 m/s (Rahó, Ökörmező) és 2,5 m/s (Pláj), a felső kvartilis 1,0 m/s (Huszt) és 6,6 m/s (Pláj) között változik a területen.

A csúcsosság statisztikai értéke a normális eloszlás esetén nulla lenne. A magas pozitív csúcsosságértékek azt jelzik, hogy a megfigyelések csúcsosabbak, és hosszabb farkokkal rendelkeznek, mint azt a normális eloszlásban láthatnánk. Ez minden mérőpontra érvényes, de legalacsonyabb a Plájon (1,1). A ferdeség az eloszlás aszimmetriájának mérőszáma. A normális eloszlás szimmetrikus, és a ferdeségi értéke 0. Szignifikáns pozitív ferdeséggel rendelkező eloszlás hosszú jobb oldali „farkkal” rendelkezik.

3.1.2. Az átlagos szélesebségek térbeli eloszlása

A felszín inhomogenitása, főleg a domborzat áramlásmódosító hatása következtében a szélesebség térbeli változatosságának térképi ábrázolása összetett feladat. A különböző geoinformatikai szoftverek sokasága ad lehetőséget a többféle módszeren alapuló interpolációk

elvégzésére. A nehézség leginkább az elvégzendő feladathoz alkalmas módszer megválasztásánál adódik. A szakirodalomban számos említést találunk a különböző éghajlati elemek, ezen belül a szélsébség horizontális interpolációjára alkalmazható módszerekről, egyes földrajzi régiók vagy akár egész országokat illetően is (Palomino – Martin 1994, Gombosné Nagy 2009, Yong et al. 2011, Wei 2013, González-Longatt et al. 2015, Keskin et al. 2015, Van Ackere et al. 2015, Yee Von 2015). Az interpoláció segítségével a pontszerű értékekből a teljes vizsgálati területet lefedő folyamatos adatfelszínt, leggyakrabban valamilyen adatrácsot alakítunk ki. Így a mintavétellel nem rendelkező pontokban becslést adunk a vizsgált tulajdonságok értékeire a megfigyelt pontok tulajdonságai és térbeli helyzete alapján. A rácsalapú módszerek közötti különbség a matematikai algoritmusban van, amellyel kiszámítjuk a súlyokat a rácspont interpoláció során (Van Ackere et al. 2015). Ennek következtében minden módszer a meglévő adatok más és más ábrázolását eredményezi.

Van Ackere et al. (2015) munkájában többféle módszert (Inverse Distance Weighted IDP=1,2,3,4,5; Global Polynomial Interpolation; Local Polynomial Interpolation; Radial Basic Function; Ordinary Kriging; Universal Kriging; Simple Kriging) próbáltak ki a flandriai (Belgium) régió sík felszínén a szélsébség interpolációjára. A mért és az interpolált értékek közötti átlagos négyzetes eltérés (RMSE) alapján a Simple Kriging és az Inverse Distance Weighted IDP=2 módszer bizonyult a legalkalmasabbnak.

Keskin et al. (2015) egy észak törökországi terület példáján hasonlította össze a Kriging, az Inverse Distance Weighted (IDW) és a Natural Neighbor (NN) módszert, amelyek közül az összetettebb domborzat miatt az IDW IDP=2 módszert találták használhatóbbnak a szélsébség területi interpolációjára, amely részletgazdagabb eredményt is adott.

Wei (2013) a szélsébségek interpolációjára a krigelés (Kriging), a távolsággal fordítottan arányos súlyozott interpoláció (IDW) és a Spline módszer közül az első kettőt tartja megfelelőbbnek. Yong et al. (2011) szintén az IDW módszerrel végezték el a szélsébség interpolációját.

A krigelés a paramétereknek ismeretlen pontban, geostatisztikai alapokon nyugvó meghatározására alkalmas a környező mérési értékek

alapján (Cressie 1990). A módszer alapvetően egy súlyozott átlagszámítás, ahol a súlyokat geostatisztikai lapokon variogram-függvények segítségével határozhatjuk meg. A krigelést optimális interpolációnak is említi a szakirodalom.

Az IDW interpolációs módszer távolságon alapuló egyszerű algoritmust használ, a cella értékeit az adatpontokat tartalmazó cellák értékeinek átlagolásával becsli (Bartier – Keller 1996). Minél közelebb van egy pont a becsült cella közepéhez, annál nagyobb súllyal szerepel az átlagolásban. A súlyérték hatása a vizsgálati távolsággal csökken. Az IDW egy egzakt módszer, így a kapott eredményben – a lokális jellegek erős figyelembe vétele miatt – gyakran találkozunk az „ökörszem” (bulls-eye) jelenséggel, azaz a térképen a kiugró értékeknél közel koncentrikus köröket kapunk.

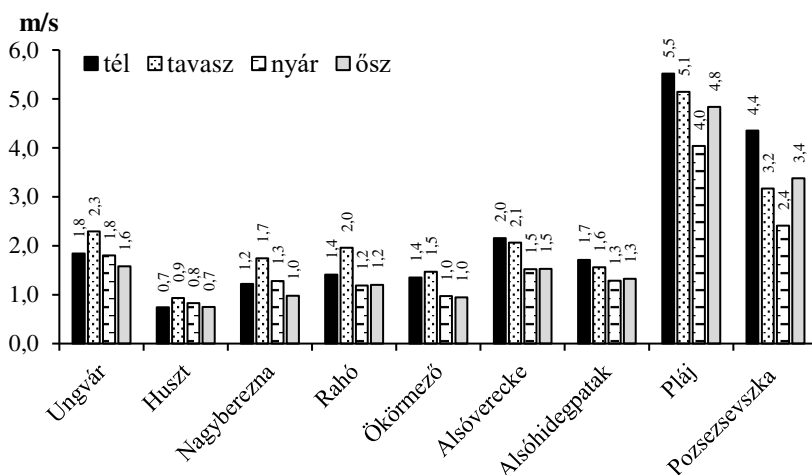
A kárpátaljai mintaterületen a tagolt domborzat miatt a mérőpontok gyakran nem a nagytérsegi viszonyokat, hanem csupán a lokális (folyóvölgy, hegyközi kismedence) szélmező tulajdonságait reprezentálják. Az orográfiai tényező és a fent felsorolt néhány szakirodalmi megerősítés alapján az átlagos szélesebség területi interpolációjára az IDW IDP=2 módszert választottuk (később a CarpatClim rácspontokra).

3.1.3. Az éves, évszakos és havi szélesebségek jellemzői

A Kárpát-medencében és ezzel együtt Kárpátalján a nagytérsegi meteorológiai folyamatok, az alacsony vagy magas nyomású légköri képződmények jellemző tulajdonságaik révén lényegesen meghatározzák az itteni szélmező tulajdonságait. Télen és jellemzően az átmeneti évszakokban általánosan fellépő ciklon-tevékenység a nyári hónapokra jelentősen gyengül (Voropai – Kunytsa 1996, Justyák 2002), ezért a széljárást elsősorban a helyi légkörzési rendszer, illetve a nyári zivartartevékenység alakítja ki. Ennek következtében a nyári hónapok széljárása jóval egyenletesebb, mint a tél és az átmeneti évszakoké. Ezt bizonyítja az évszakonként, minden állomást figyelembe véve meghatározott variációs együttható is. Nyáron az állomások közötti átlagos variációs együttható 0,54. Télen ez az érték 0,73, tavasszal 0,59, és ősszel a legmagasabb, 0,74. Mind a 9 mérőpontot figyelembe véve, függetlenül azok elhelyezkedésétől, Kárpátalján a legszelesebb a tavasz (2,3 m/s) és legszelesebb a nyár (1,7 m/s), a tél és az ősz pedig 2,6 m/s és 1,8 m/s átlagsebességű (lásd: 12. függelék).

Évszakos bontásban tovább vizsgálva a kárpátaljai mérőállomások szélsőbességeit (3.1. ábra) három csoport különíthető el:

- ahol tavaszi szélmaximum és őszi minimum jelentkezik (Ungvár és Nagyberezna);
- ahol tavaszi szélmaximum és nyári minimum jelentkezik (Rahó és Ökörmező);
- ahol téli maximum és nyári minimum jelentkezik (Alsóverecke, Alsóhidegpatak, Pláj és Pozsezevszka).



3.1. ábra. Az évszakos átlagos szélsőbesség (m/s) alakulása 2011–2015 között
Forrás: saját szerkesztés

A tavaszi elsődleges szélmaximum a szakirodalmi (Justyák 2002, Tar et al. 2005) törvényszerűségeknek felel meg. Az állomások 63%-án a tavasz a legszelesebb, ide tartozik a két alföldi (Ungvár és Huszt) és három folyóvölgyi mérőpont (Nagyberezna, Rahó és Ökörmező). A nagyobb (1000 m körül) tengerszint feletti magasságon már jelentkezik a mérsékelt öv nagytérségű cirkulációjának törvényszerűsége, azaz a szélsőbességnek téli maximuma és nyári minimuma van (Péczeley 1998). Téli elsődleges szélmaximummal rendelkezik két folyóvölgyi (Alsóverecke és Alsóhidegpatak) és a két hegységi állomás (Pláj és Pozsezevszka). Alsóverecke és Alsóhidegpatak bár alacsonyabb tengerszint feletti magasságban, de földrajzilag közel (kb. 20 km) helyezkednek el a Plájhoz, ezért a szélmaximum időpont-

jának bekövetkezését illetően jobban tükrözik a hegységi körzetek széljárását. A minimumok bekövetkezésének ideje változó. Az állomások 63%-án nyárra esik, elsősorban a hegységek (Pláj és Pozsezevszka) esetében. A Pájon a téli maximum és a nyári minimum között 1,5 m/s-os (27%-os) különbség adódik, míg a Pozsezevszskán ez 2,0 m/s (45%-os). Rahón, Alsóvereckén és Alsóhidegpatakon a minimum szintén nyárra esik. Ungváron, Nagybereznán, Ökörmezőn és Huszton ősszel van a minimum.

A 3.2. ábra a mérőállomások szélsősebességeinek havi átlagait mutatja. Látható, hogy az évszakos elemzésnél említett tavaszi szélsőbesség maximum a tengerszint feletti magasság növekedésével egyre inkább a télbe húzódik. Az alföldön a legszelesebb az április (Ungvár és Huszt), a hegységben a legmagasabban fekvő mérőpontokon (Alsóhidegpatak, a Pláj és a Pozsezevszka) viszont a december. Minden állomáson a legszelesebb hónap az annak megfelelő legszelesebb évszakban következik be. A legkisebb havi átlagok bekövetkezésében is észrevehető az a jelenség, hogy az alföldön november-októbertől kezdődően a magasság növekedtével egy-egy hónappal hamarabb következik be, míg a hegységben már augusztusban lép fel.

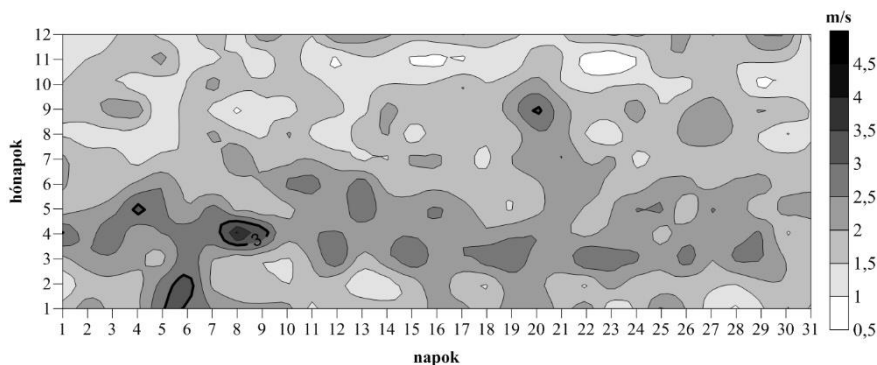
Ungvár (112 m)	2,0	1,8	2,3	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,9	1,5	1,4	1,8
Huszt (164 m)	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8
Nagyberezna (205 m)	1,2	1,3	1,8	1,7	1,7	1,5	1,2	1,2	1,2	0,9	0,8	1,2
Rahó (430 m)	1,5	1,6	2,1	2,2	1,6	1,4	1,2	1,1	1,1	1,2	1,3	1,2
Ökörmező (456 m)	1,3	1,3	1,6	1,5	1,3	1,1	1,0	0,8	0,9	0,9	1,1	1,4
Alsóverecke (496 m)	2,1	2,3	2,3	2,0	1,9	1,7	1,4	1,5	1,4	1,4	1,8	2,0
Alsóhidegpatak (615 m)	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2	1,3	1,5	1,8
Pláj (1330 m)	5,8	4,8	5,8	5,0	4,6	4,4	4,0	3,7	4,7	4,5	5,3	5,9
Pozsezevszka (1451 m)	4,4	3,4	3,9	3,3	2,3	2,6	2,5	2,1	3,1	3,3	3,8	5,1
	Jan	Feb	Márc	Ápr	Máj	Jún	Júl	Aug	Szept	Okt	Nov	Dec
	legkisebb havi átlag						m/s		legnagyobb havi átlag			

3.2. ábra. A mérőállomások szélsősebességeinek (m/s) havi átlagai
2011–2015 között

Forrás: saját szerkesztés

A legszelesebb és a legszélcsendesebb hónap átlagos szélesebségeinek különbsége 0,3-3,0 m/s közé esik. Ez közel 10-20%-os (Huszt – Pozsezevszka) ingadozásnak felel meg az éves átlaghoz képest. A legnagyobb eltérések az éves átlaghoz képest márciusban jelentkeznek, átlagosan 25% körül (12-43% között mozog). Az átlagos szélesebséget legjobban „reprezentáló” hónap Huszt, Pláj és Pozsezevszka állomások kivételével a június, e három mérőpon-
ton pedig a február.

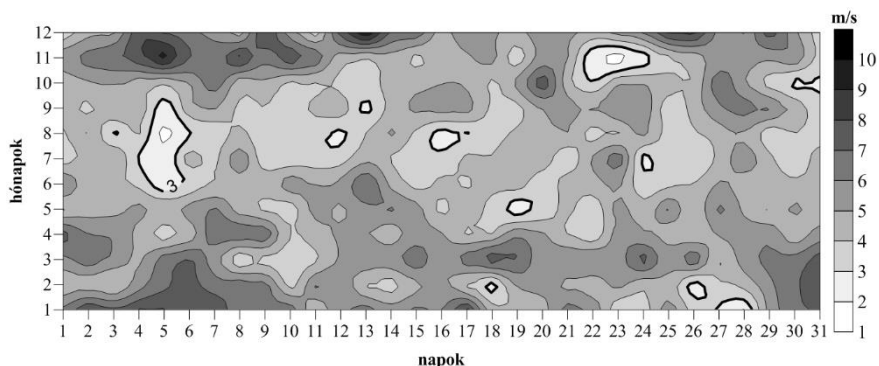
A napi átlagebességek éves menetét bemutató 3.3. ábra mintázata alapján is elmondható, hogy az alföldet reprezentáló Ungváron a legnagyobb szélesebségek a tavasz közepe körül jelentkeznek, míg a legszélcsendesebb időszak az ősz közepén van. Az éves menet vázolt jellege jól magyarázható a tavasszal megerősödő ciklontevékenységgel (Justyák 2002). Az ábrán vastagabb vonallal kiemeltük a legtöbb szélturbina indító sebességének számító 3 m/s-ot meghaladó tartományt. Látható, a hogy ezek a szélesebségek „tartósan”, akár több órán esetleg egy-egy napon keresztül csupán az áprilisi hónapban jelentkeznek. Novemberben pedig átlagosan szinte nincs is olyan nap, amikor legalább 3 m/s-os vagy azt meghaladó sebességű szelek fújának. Tehát az ipari szélérőművek gazdaságos alkalmazása ebben a régióban kizárt.



3.3. ábra. Ungvár napi átlagos szélesebségének (m/s) éves menete
2011–2015 között

Forrás: saját szerkesztés

A hegyvidék magasabb, nyitott részeit reprezentáló Pláj esetében is kirajzolódik a napi átlagos szélsősebesség éves menetére jellemző téli maximum és nyári minimum (3.4. ábra). Itt viszont az évnek alig egy-egy rövid szakában (főként nyáron) fordul elő olyan, hogy átlagosan a szélsősebesség ne érné el a 3 m/s-ot.

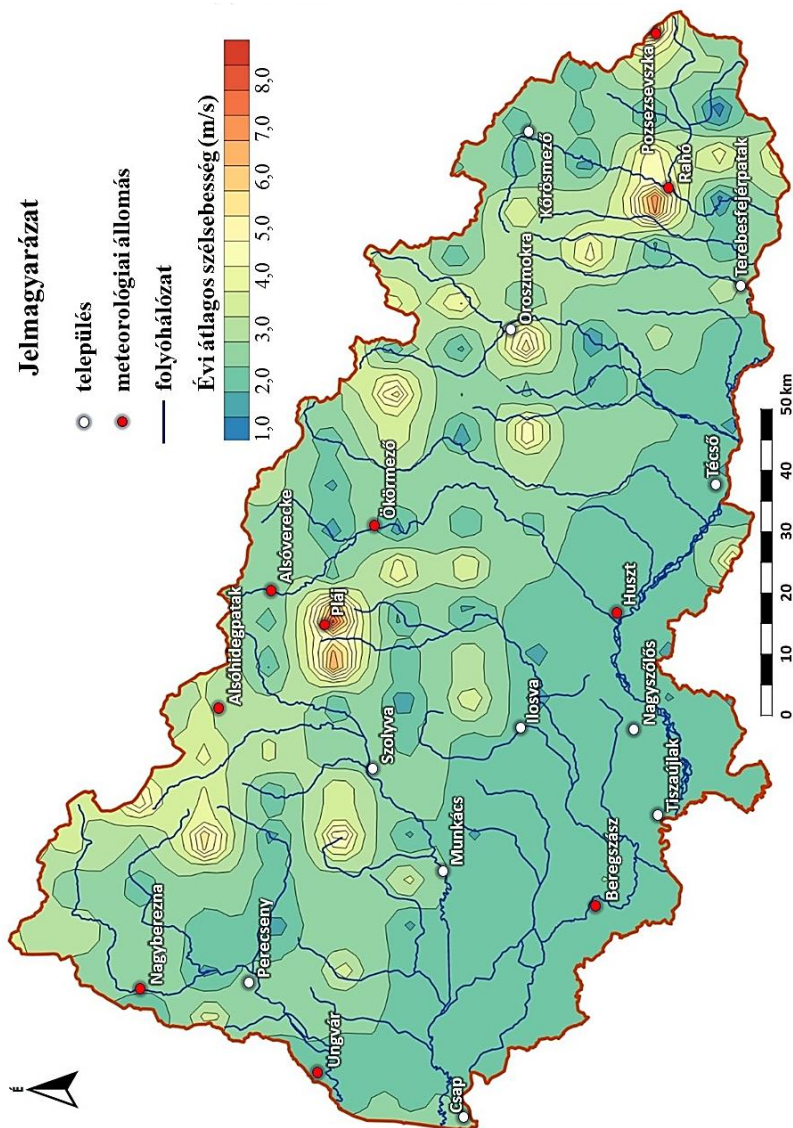


3.4. ábra. Pláj napi átlagos szélsősebességének (m/s) éves menete
2011–2015 között

Forrás: saját szerkesztés

3.1.4. A szélsősebesség jellemzői a CarpatClim éghajlati adatbázis alapján

Az átlagos szélsősebesség területi eloszlásának bemutatására felhasználtuk a 2.2. alfejezetben bemutatott CarpatClim éghajlati adatbázist is (3.5. ábra). A CarpatClim-et alkotó mérőpontok között mind a 9 általunk vizsgált állomás szerepel (a 8 kárpátaljai és az ivano-frankivszki Pozsezszevszka) és mindegyikről származnak szélsősebesség és szélirány adatok. Az állomási adatokat homogenizálták (MASH, Szentimrey 2008). Az alkalmazott interpoláció (MISH, Szentimrey – Bihari 2007) a térbeli korrelációk mellett figyelembe veszi az időbeli kapcsolatokat is. Az adatok térbeli felbontása $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$ (7x11 km-es), az időbeli felbontása a szélsősebességre is napi sűrűségű. Első lépésben CarpatClim Atlasz metaadatbázisa segítségével meghatároztuk azokat a grideket, amelyek Kárpátalja határain belül vagy éppen csak azon kívül estek (lásd: 11. függelék). A 216 kiválasztott rácspont átlagos tengerszint feletti magassága 575 m. A legmagasabban fekvő rácspont 1702 m, a legalacsonyabb rácspont 99 m, az 500 m alatti rácspontok száma 103 (48%), az 500-1000 m közöttieké 81 (38%), az 1000 m felettieké 31 (14%).



3.5. ábra. Az átlagos szélsébség (m/s) területi eloszlása Kárpátalján a CarpatClim éghajlati adatbázis alapján 1961–2010 között (IDW IDP=2 interpolációs módszerrel)

Forrás: saját szerkesztés

A CarpatClim szélesebség adatai alapján szerkesztett 3.5. ábrán a rácsponok sokaságának eredményeképpen viszonylag részletgazdag széltérképet kapunk. Az alföldön még így sem jelenik meg olyan terület, ahol 3,0 m/s-nál nagyobb átlagos szélesebséggel rendelkezne.

Az egész terület átlagos szélesebsége 2,0 m/s. Az alföldön és a keskeny folyóvölgyekben inkább alacsony átlagos szélesebségek (átlagosan 1,5-2,5 m/s) jellemzők, míg a környezetből kiemelkedő hegygerinceken, hegycsúcsokon erősebb és így nagyobb átlagsebességű (4,5-5,5 m/s) szelek fordulnak elő.

A térképeken a Borzsa-havas (a Pláj mérőpont) és Csornohora (a Pozsezevszka mérőpont) magasabb átlagos szélesebségekkel rendelkező területein kívül hasonló adottságival kirajzolódik a Havasi- és Vízválasztó-vonulat többi tagja is. A szélenergia felhasználására alkalmas területek kiválasztása szempontjából fontos lenne ezeken a helyeken is (Róna-havas, Kuk-havas, Kraszna-havas, Fagyalos stb.) méréseket végezni. Következtetésként csupán annyi vonhatunk le, hogy Kárpátalján az átlagos szélesebség alapján a szélenergia felhasználásra alkalmas területek kijelölésénél főleg a hegyvonulatok magasabb részei jöhetnek számításba.

Itt fontosnak tartjuk megjegyezni, hogy a kárpátaljai mérőállomásokról csak a 3 nappali szélmérésből (a szélesebség napi járását tekintve ekkor van a maximum) származnak a CarpatClim homogenizált és interpolált napi átlagértékei. A CarpatClim rácsadatai ezért magasabb értékeket hordoznak (Mika et al. 2014). A mért értékek felül vagy akár alulbecslése különösen az összetett domborzatú területeken jelentkezhet, ez a mérőpont griden belüli elhelyezkedésével lehet összefüggésben. Ha a grid jelentős része magasabb térrészt képez, mint a griden belüli mérőpont, akkor valószínűleg felülbecsül és fordítva.

A terület komplex domborzati tulajdonságai miatt pontosabb, jobb felbontású szélesebség-térképet a mérőállomások sűrűségének jelentős növelésével vagy a felszíni érdességet és turbulenciát figyelembe vevő, a széladatok horizontális és vertikális extrapolációjára szolgáló dinamikus modellek (pl. WindSim, WAsP) segítségével kaphatunk. E hiányosság miatt a kapott széltérképeket az alföldi régióban csak korlátozottan lehet alkalmazni.

A 3.2. táblázatban bemutatjuk az állomások szélesebség adatainak alapstatisztikai mutatóit az 1961–2010 közötti időszakra

a CarpatClim éghajlati adatbázis alapján. Az adatok az adott mérőállomáshoz legközelebbi rácspontra vonatkoznak, amelyet az említett interpolációs módszer segítségével határoztak meg. Összehasonlítva a kapott értékeket az általunk felhasznált adatsorból számoltakkal látható, hogy több mutató esetében is szintén a Pláj és a Pozsezevszka állomáson jelentkezik az első és a második legnagyobb érték, a harmadik legnagyobb viszont nem Ungváron, hanem Alsóvereckén van. A legkisebb értékeket pedig Huszt helyett most Rahón találjuk.

3.2. táblázat. A mérőpontok szélsősebesség idősorainak alapstatisztikai mutatói a CarpatClim (CC) éghajlati adatbázis alapján az 1961–2010-es időszakban (mértékegység m/s, a dőlt és aláhúzott mutatóknak nincs mértékegysége, kiemelve: **első**, **második** és **harmadik legnagyobb** és **legkisebb** érték)

Statisztikai mutatók	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverecke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
CC grid index	1468	1882	1166	2093	1581	1274	1377	1477	1995
átlag	2,1	2,1	1,7	<u>1,2</u>	1,5	3,6	2,1	8,0	3,7
szórás	1,3	1,2	1,5	<u>1,0</u>	1,3	2,6	1,3	7,1	3,0
<i>variác. e.h.</i>	<u>0,6</u>	<u>0,6</u>	0,9	0,8	0,8	0,7	<u>0,6</u>	0,9	0,8
módusz	1,7	1,5	<u>0,2</u>	0,3	<u>0,2</u>	1,9	1,8	3,0	1,3
alsó kv.	1,2	1,4	0,6	0,6	<u>0,5</u>	1,8	1,1	3,5	1,5
medián	1,9	1,9	1,3	<u>1,0</u>	1,3	3,0	1,8	5,7	2,8
felső kv.	2,8	2,5	2,3	<u>1,6</u>	2,2	4,8	2,7	10,0	4,7
maximum	12,9	26,3	15,9	<u>11,8</u>	16,5	20,6	17,0	50,0	30,1
<i>csúcsosság</i>	3,6	19,6	6,0	8,8	5,3	3,8	3,8	6,5	5,1
<i>ferdeség</i>	<u>1,3</u>	2,7	1,9	2,3	1,6	1,6	1,4	2,2	1,9

Forrás: saját szerkesztés

3.1.4.1. A mért és a CarpatClim éghajlati adatbázis adatainak összehasonlítása

Fontosnak tartottuk összehasonlítani a CarpatClimből származó adatsorokat az ugyanarra az időszakra vonatkozó mért adatokkal. Ezt csak az ungvári mérőpont esetében tudtuk megtenni, mert csupán

innen állt rendelkezésünkre a CarpatClim időbeli terjedelmére eső 5 éves, 2006-tól 2010-ig tartó adatsor. Első körben elemeztük a CarpatClim-ből származó, az ungvári állomáshoz legközelebb eső 1468-as számú rácsponthoz tartozó (é.sz.: 48,6; k.h.: 22,3; tszfm.: 121 m) és a mért napi átlagos szélességek alapstatisztikai mutatóit (3.3. táblázat). Azt láthatjuk, hogy a CarpatClim átlagosan 0,2 m/s-al alulbecsül. Bár ez elég kis különbség, de az alulbecslés ellenkezik a szakirodalmi (Mika et al. 2014) megállapításokkal. A becslt értékek előjel szerinti megoszlása százalékban kifejezve a következő: 60,1%-ban alulbecslést és 39,9%-ban túlbecslést tapasztalunk a CarpatClim napi átlagos szélesség adatsorában. Ha a havi átlagokat vesszük figyelembe, akkor ez az arány: 88,3% és 11,7%. A két adatsor átlagának igen kis eltérése van és a többi statisztikai mutató értékei is alig különböznek egymástól vagy teljesen megegyeznek. A napi átlagos szélességek eltéréseinek statisztikája alapján elmondható, hogy az eltérés terjedelme mintegy 9,5 m/s. Ez azt jelenti, hogy a CarpatClim az 5 éves adatsorában a legnagyobb alulbecslés -5,9 m/s, a legnagyobb túlbecslés pedig 3,6 m/s volt. Az eltérések variációs együtthatója 4,3.

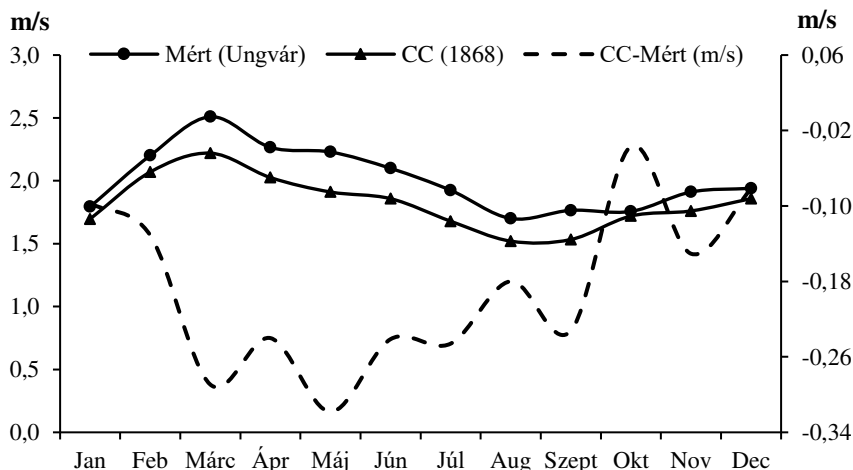
3.3. táblázat. A CarpatClim (CC) éghajlati adatbázis 1468-as számú rácspontjának és az ungvári meteorológiai mérőállomás napi átlagos szélességeinek (m/s) alapstatisztikai mutatói (m/s, a *dőlt és aláhúzott* mutatóknak nincs mértékegysége)

Adatbázis	átlag	szórás	<i>variác. e.h.</i>	módusz	minimum	alsó kvart.	medán	felső kvart.	maximum
CC 1468. pont (121 m)	1,8	1,0	0,5	1,1	0,0	1,1	1,6	2,4	7,3
Ungvár (112 m)	2,0	1,0	0,5	1,4	0,0	1,3	1,8	2,6	7,7

Forrás: saját szerkesztés

Az eltérések időbeli eloszlását tekintve elmondható, hogy átlagosan minden hónapban a CarpatClimben alulbecslés tapasztalható. Azonban 5 éves átlagban és külön-külön évenként is megfigyelhető, hogy a márciustól szeptemberig tartó időszakban van a legnagyobb alulbecslés, míg októbertől februárig az eltérések kisebbek (3.6. ábra). Havi

átlagban felülbecslés nincs, azonban a napi átlagos szélesség esetében az összes pozitív eltérés az utóbbi időszakra esett.



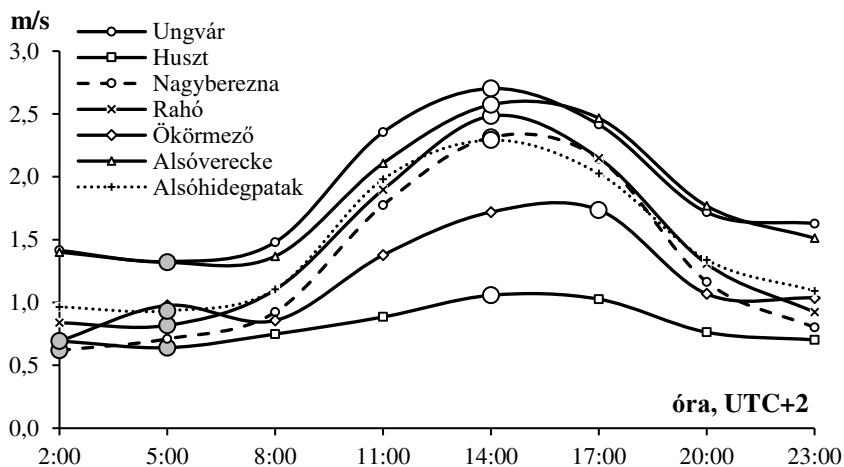
3.6. ábra. A CarpatClim (CC) éghajlati adatbázis 1468-as számú rácspontjának és az ungvári meteorológiai mérőállomás havi átlagos szélességeinek (bal oldali függőleges tengely), illetve ezek havi átlagos különbségeinek (jobb oldali függőleges tengely) éves menete 2006–2010 között

Forrás: saját szerkesztés

Összefüggést próbáltunk keresni a mért havi átlagos szélesség és az eltérések havi átlagos értékei, illetve havi variációs együtthatói között, azonban sztochasztikus kapcsolatot egyik esetben sem találtunk. Tehát az alul- vagy felülbecslés mértéke szignifikánsan nem függ a mért szélességtől, sem annak változékonyságától.

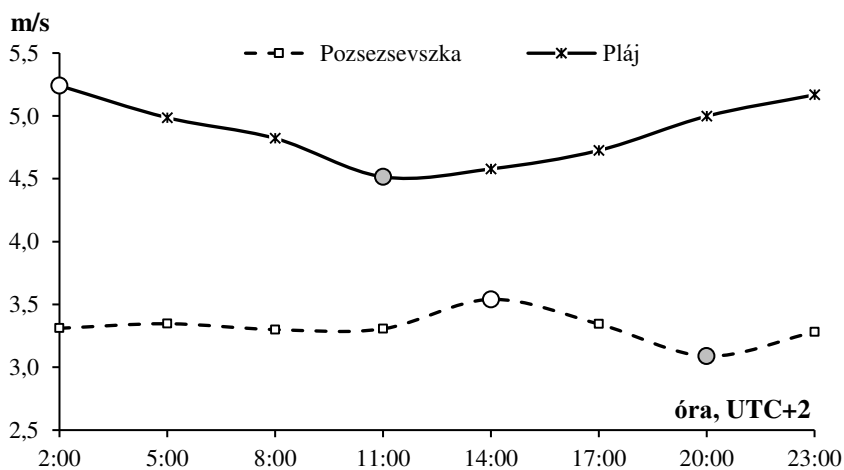
3.1.5. A szélesség napi menetének jellemzői

Energetikai szempontból fontos ismerni a szélmező ezen tulajdonságát, mivel a szélgenerátorok üzemeltetése során figyelembe kell venni a nap folyamán szolgáltatható energia mennyiségét, tekintettel az igény és az átvételi ár napszakonkénti változására is (Sembery – Tóth 2004). A szélesség 3 órás terminusokra (UTC+2) számolt átlagai határozott napi menetet mutatnak (3.7.-3.8. ábra). A két hegyeségi mérőpontot a magasabb szélességei és a többitől eltérő napi meneteik miatt külön diagramra helyeztük.



3.7. ábra. Az alföldi és nem alföldi folyóvízgyi állomások terminus időpontokénti átlagos szélsőségeinek (m/s) napi menete 2011–2015 között (fehér kör jelölő – maximum, szürke kör jelölő – minimum érték)

Forrás: saját szerkesztés



3.8. ábra. A hegyes Pozsezevszka és a Pláj állomások terminus időpontokénti átlagos szélsőségeinek (m/s) napi menete 2011–2015 között (fehér kör jelölő – maximum, szürke kör jelölő – minimum érték)

Forrás: saját szerkesztés

Az alföld (Ungvár és Huszt) és a folyóvölgyek (Nagyberezna, Rahó, Alsóverecke és Alsóhidegpatak) állomásain napi egy maximum és egy minimum lép fel. Az is megállapítható, hogy ezeken a legmelegebb órákban legerősebbek a szelek, átlagosan 14 órakor, Ökörmezőn viszont egy terminussal később, azaz 17 órakor. A minimum bekövetkezésének időpontja a legtöbb állomáson (Ungvár, Huszt, Rahó, Alsóverecke és Alsóhidegpatak) hajnalban, 5 órakor van. Nagyberegen és Ökörmezőn viszont korábban, 2 órakor. Ökörmezőn 5 órakor egy nagyon enyhe másodmaximum jelentkezik a szélsébség napi menetében.

Az egyes terminus időpontokhoz tartozó szélsébség átlagok variációs együttthatója éves viszonylatban 0,1 (Pozsezevszka) és 0,5 (Nagyberezna) között változik (3.4. táblázat).

3.4. táblázat. Az állomások terminus időpontokhoz tartozó átlagos szélsébségeinek (m/s) éves és évszakos variációs együttthatói 2011–2015 között

Időszak	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverecke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
éves	0,3	0,2	0,5	0,5	0,3	0,3	0,4	0,1	0,1
tél	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
tavas	0,3	0,3	0,5	0,5	0,4	0,3	0,4	0,1	0,1
nyár	0,4	0,3	0,7	0,7	0,6	0,4	0,6	0,1	0,1
ősz	0,3	0,1	0,6	0,5	0,3	0,3	0,4	0,1	0,1

Forrás: saját szerkesztés

A magas napi ingás negatívan hat az elvárt egyenletes áramtermelésre, viszont a maximum a fogyasztók által preferált nappali órákra esik. A hegységi Pozsezevszskán is átlagosan 14 órakor áll be a napi maximum, azonban az eddigiektől eltérően a minimum az esti órákban jelentkezik, 20 órakor és a szélsébség napközbeni ingadozása az összes állomás közül az átlaghoz képest itt a legkisebb. A szélgenerátorok áramtermelésének napszakonkénti tervezése szempontjából ez egy szintén kedvező tulajdonság. A nyitott, hegygerincen elhelyezkedő Pláj mérőpont szélsébségeinek napi menetében is egy maximum jelentkezik, de az eddigiektől eltérően éjfél és korahajnali órákban áll be, 2 órakor.

A minimum délelőtt, 11 órakor van. Vagyis a felszíntől távolodva a szélesebségnek egyre inkább fordított a napi menete: éjjeli maximum és nappali minimum a jellemző. Ez egyezik a szélesebség napi menete és a planetáris határréteg kapcsolatáról tett szakirodalmi megállapításokkal (Mezősi – Simon 1981, Lysen 1982, Patay 2003). A planetáris határréteg egy jellemző tulajdonsága, hogy a szélesebség a felszínközel rétegekben, ahol jelentős a súrlódás hatása, nappali maximummal rendelkezik, míg az éjszakai órákban, az 1-1,5 km magasságba érő hegycsúcsokon, gerinceken, a planetáris határréteg teteje környékén, nagyobb szélesebségek fordulnak elő. A szélesebség napon belüli variációs együtthatója éves viszonylatban 0,1. A Pláj állomás a szélesebség éjszakai maximuma tekintetében kedvezőtlen, viszont a viszonylag magas átlagos szélesebség (4,9 m/s), az alacsony napon belüli ingás alapján a szélenergia villamos energia előállításra történő hasznosításában az energetikai rendszerirányítás számára kedvező tulajdonsággal rendelkezik. Csupán a Pozsezevszka és a Pláj állomások azok, amelyeken a szélesebség a nap folyamán átlagosan 3 m/s felett mozog. Ez az ipari szél erőműveknél gyakorta az indító sebességet jelenti (Sembery – Tóth 2004).

Évszakos bontásban vizsgálva a szélesebség napi meneteit (lásd: 13. függelék) megállapíthatjuk, hogy a napi minimum (éjjel, Plájon nappal) és maximum (nappal, a Plájon éjszaka) szélesebség értékek közötti különbség nyáron a legnagyobb, tavasszal és ősszel kisebb és legkisebb télen. Ezért tehát főleg télen és ősszel elég nagy biztonsággal számíthatunk arra, hogy a szélesebség és ezzel együtt a szélenergia napon belüli változása is az irányítás számára kedvezőbb módon, azaz egyenletesebben jelentkezik. A hőmérséklettel való szoros kapcsolatot erősíti az is, hogy júliusban sokkal nagyobb a nappal és éjjel mért szélesebség értékek közötti különbség, mint januárban (3.5. táblázat). Olyannyira, hogy egyes mérőhelyeken a nappali maximum az éjjeli minimumnak több, mint hétszerese is lehet. Míg az alföldi és a folyóvölgyi állomásokon a januári maximumok általában 14 órakor, ritkábban 17 órakor, addig a két hegységi állomáson 2 és 5 órakor jelentkeznek. A júliusi maximumok a Plájt (23 óra) kivéve mindenhol 14-17 órakor jelentkeznek. Összefoglalva megtalálhatjuk a 3.6. táblázatban. A Pláj, mint a „legszelesebb” mérőpont, szélesebségeinek éves és napi járását figyelembe véve, megállapítható, hogy a nyári és kora őszi hónapok dél

körüli óráiban a szélsébség átlagosan a legkisebb és legváltozékonyabb, míg a téli és kora tavaszi hónapok éjjeli óráiban a legnagyobb és legkiegyenlítettebb.

3.5. táblázat. A szélsébség napi menetében bekövetkező minimum és maximum havonkénti időpontjai (T, óra) és az azokhoz tartozó átlagos szélsébség (S, m/s)

Hónapok	Ungvár (112 m)		Huszt (164 m)		Nagyberezna (205 m)		Rahó (430 m)		Ökörmező (456 m)		Alsóverceke (496 m)		Alsóhidegpatak (615 m)		Pláj (1330 m)		Pozsezevszka (1451 m)	
	a minimumok időpontjai és sebességei																	
	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S
Jan	8	1,8	5	0,6	5	1,1	2	1,2	2	1,1	20	1,9	2	1,5	17	5,6	17	4,0
Feb	8	1,4	2	0,7	2	0,7	8	1,0	2	1,0	8	1,9	8	1,3	8	4,5	23	3,2
Már	8	1,6	5	0,7	8	1,1	8	1,0	2	1,1	8	1,7	2	1,0	17	5,4	2	3,5
Ápr	5	1,6	5	0,7	2	0,7	5	1,0	2	0,9	2	1,3	5	1,0	11	4,6	20	2,8
Máj	5	1,5	5	0,6	2	0,7	2	0,6	2	0,5	5	1,1	5	0,7	11	4,1	20	1,9
Jún	5	1,2	5	0,6	2	0,4	5	0,3	2	0,4	5	1,0	5	0,5	11	4,0	20	2,2
Júl	5	1,0	5	0,5	2	0,3	5	0,3	2	0,2	5	0,6	5	0,5	11	3,7	20	2,1
Aug	5	0,8	5	0,5	2	0,2	2	0,3	2	0,2	5	0,7	5	0,5	11	3,0	2	1,8
Szep	8	1,0	5	0,7	2	0,4	5	0,4	2	0,4	2	0,8	2	0,5	11	4,1	23	2,7
Okt	8	1,1	5	0,6	2	0,4	20	0,7	2	0,5	8	1,0	8	0,7	17	3,9	17	3,0
Nov	2	1,1	20	0,6	2	0,5	5	1,0	2	0,8	8	1,4	8	1,1	17	5,1	20	3,3
Dec	5	1,4	23	0,7	8	0,8	8	1,0	2	1,2	8	1,7	8	1,4	11	5,3	11	4,7
	a maximumok időpontjai és sebességei																	
	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S
Jan	14	2,6	14	0,8	14	1,6	14	2,1	17	1,5	17	2,3	14	1,9	2	6,2	5	4,7
Feb	14	2,6	14	0,9	17	2,1	14	2,1	17	1,6	17	2,9	14	2,2	23	5,0	5	3,6
Már	17	3,3	17	1,3	14	3,1	14	3,5	14	2,4	17	3,0	14	2,6	2	6,1	14	4,3
Ápr	14	3,5	14	1,4	14	3,1	14	3,8	14	2,4	14	3,3	14	2,6	2	5,4	2	3,6
Máj	14	3,0	17	1,3	14	2,9	14	3,0	14	2,2	14	3,0	14	2,3	2	5,0	14	2,7
Jún	14	3,1	14	1,2	14	2,7	14	2,7	17	2,0	14	2,5	14	2,5	2	4,6	14	3,2
Júl	14	2,7	17	1,2	14	2,4	14	2,3	17	1,8	14	2,3	14	2,2	23	4,3	14	3,0
Aug	17	2,7	17	1,2	14	2,4	14	2,1	17	1,7	17	2,5	14	2,2	2	4,3	14	2,3
Szep	14	2,8	17	1,1	14	2,5	14	2,1	14	1,7	14	2,5	14	2,3	23	5,1	14	3,7
Okt	14	2,3	14	0,9	14	2,0	14	2,4	14	1,4	14	2,2	14	2,1	23	5,2	23	3,8
Nov	14	2,0	14	0,9	14	1,6	14	2,2	14	1,4	14	2,4	14	2,2	8	5,7	5	4,0
Dec	14	2,2	14	0,8	14	1,7	14	1,6	14	1,7	14	2,4	14	2,3	23	6,5	23	5,4

Forrás: saját szerkesztés

3.6. táblázat. A januári és júliusi napi minimum és maximum szélesebbesség bekövetkezésének leggyakoribb ideje az állomáscsoportok szerint 2011–2015 között

Hónap	Szélső értékek	Alföldi és folyóvölgyi állomások	Hegységi állomások	
			Pláj	Pozsezevszka
január	minimum	2-5 óra	17 óra	17 óra
	maximum	14-17 óra	2 óra	5 óra
július	minimum	2-5 óra	11 óra	20 óra
	maximum	14-17 óra	23 óra	14 óra

Forrás: saját szerkesztés

3.1.6. A szeles napok statisztikai szerkezete

Az eddigi megállapításainkra (a szélcsend aránya, a szélesebbesség adatsorok alapstatisztikái) alapozva elmondhatjuk, hogy Kárpátalján a szélenergia döntő hányadát a ritkán előforduló nagyobb szélesebbességek adják. Ennél fogva fontosnak tartjuk a 10 m/s-nál nagyobb maximális szélesebbességgel bíró napok, az ún. szeles napok (Péczy 1998) havi statisztikai szerkezetét is megvizsgálni, hogy a szélenergia előzetes becslésére egy könnyen hozzáférhető paramétert kapjunk. A szeles napok havi számát leíró valószínűségi változóból vett mintánkat D10-nek fogjuk nevezni. Ehhez a napi maximális szélesebbesség adatsorokat használtuk, amely 2013-2015 közötti időszakra terjed. A szeles napok (D10) egész időszakra számított legfontosabb statisztikai jellemzőit a 3.7. táblázatban közöljük. A táblázat első sora a figyelembe vehető hónapok számát (3×12 hónap) tartalmazza. A második sorban azoknak a napoknak a száma szerepel, amelyeken a szélesebbesség maximális értéke elérte vagy meghaladta a 10 m/s-ot (D10). A harmadik sorban annak valószínűségét közelítjük, hogy ez bekövetkezen: a D10-es napok összes számát elosztjuk a vizsgált időszak összes napjainak számával. Ahogy várható volt, a D10 esemény bekövetkezésének a Plájon a legnagyobb a valószínűsége, és elég magas értéket mutat, ami a szélenergia mennyisége szempontjából megnyugtató. A további sorrend pedig: Alsóhidegpatak, Alsóverecke, Ungvár, Pozsezevszka, Nagyberezna, Ökörmező, Huszt és végül Rahó. Természetesen ugyanez az egy hónapra eső szeles napok átlagos számának sorrendje is, ami éles orografikus elkülönülést mutat. A szórás a D10 napok maximális és a minimális számának különbségeként előálló ingással mutat összefüggést: legki-

sebb Rahón, ahol az ingás 6 nap, legnagyobb pedig a Pozsezszevszán, ahol az ingás 22 nap. A táblázat következő két sorában azoknak a hónapoknak a %-os arányát közöljük, amelyekben a D10 napok száma 20-nál több, illetve 10-nél kevesebb volt. Itt még inkább megfigyelhetők az anemométer környezetének felszíni egyenetlenségeiből adódó differenciák. A havonként 20-nál több szeles nap előfordulásának gyakorisága csupán a Plájon (33,3%), a Pozsezszevszán, Alsóvereckén és Ungváron haladja meg a 0%-ot. A havi 10-nél kevesebb nap előfordulását tekintve csupán az előző három állomáson, kiegészülve még Alsóhidegpatakkal marad 100% alatt. Plájon a legalább 20 szeles nappal rendelkező hónapok gyakorisága 6-szorosa a 10 szeles napos hónapokénak. Kárpátalján évente átlagosan 86 szeles nap fordul elő.

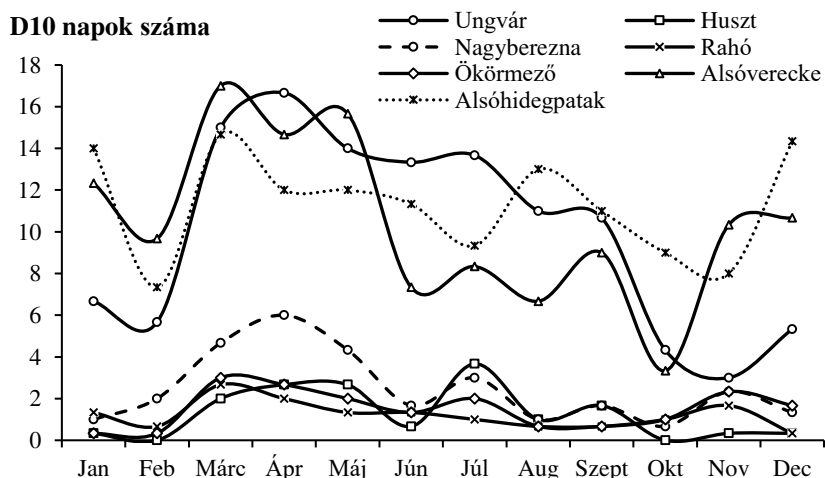
3.7. táblázat. A szeles (D10) napok havi számának alapstatisztikái a kárpátaljai mérőállomásokon 2013–2015 között

Statisztikai mutató	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverecke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezszevszka (1451 m)
Összes hónap	36	36	36	36	36	36	36	36	36
Összes D10 nap	358	46	89	44	54	375	408	636	309
Valószínűség	0,327	0,042	0,081	0,040	0,049	0,342	0,373	0,581	0,282
Egy hónapra eső átlag	9,9	1,3	2,5	1,2	1,5	10,4	11,3	17,7	8,6
Szórás	5,2	2,0	2,7	1,4	1,5	5,2	3,6	3,8	5,6
Medián	11	1	2	1	1	10	12	18	8
Maximum	21	10	10	6	6	22	19	24	22
Minimum	1	0	0	0	0	3	5	9	0
Ingás (max-min)	20	10	10	6	6	19	14	15	22
≥20 (%)	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	5,6	0,0	33,3	8,3
≤10 (%)	50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	58,3	38,9	5,6	69,4
Összes D15 nap	47	1	13	2	12	62	1	222	48
Összes D25 nap	1	0	1	0	0	1	0	12	1

Forrás: saját szerkesztés

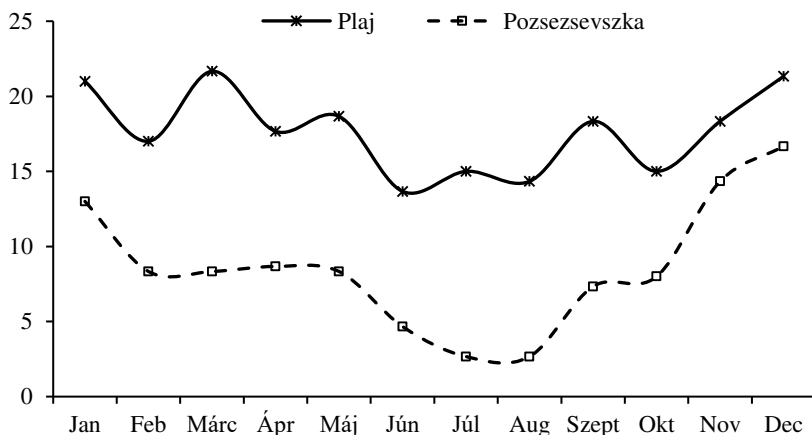
A szélerőművek jellemző szélsősebesség-teljesítmény görbéjén az indulási sebességen, a névleges teljesítményt jelentő szélsősebesség mellett megadják a legnagyobb megengedett szélsősebességet (v_{max}), ahol az erőmű épségének érdekében leállítják a termelést (Patay 2003). Ez az érték az ipari szélerőműveknél leggyakrabban a 25 m/s-os szélsősebesség. A 3.7. táblázat utolsó két sorában a D15 ($v \geq 15$ m/s), azaz a viharos napok (Justyák 2002) számát, illetve a D25 ($v \geq 25$ m/s) napok számát tüntettük fel. Utóbbi előfordulása esetén a szélturbinákat bizonyos ideig az üzemi biztonság érdekében le kell állítani. A vártnak megfelelően mind a két mutató Plájon legmagasabb. A viharos napok számát tekintve ki lehet emelni még Alsóverecskét, ahol ezen napok száma a 2 hónapot is eléri. Az üzemi biztonságot veszélyeztető szélsősebesség tekintetében szintén csak a Pláj állomást érdemes említeni, ahol évente átlagosan 12 ilyen nap fordul elő.

A 3.9. és 3.10. ábrákon D10 havi átlagai láthatók a 2013–2015 közötti 3 évre vonatkozóan. A D10 napok havonkénti átlagos számának évi futása miatt a hegységi állomásokat külön ábrán mutatjuk be.



3.9. ábra. A szeles napok (D10) havonkénti átlagos száma az alföldi és nem alföldi folyóvölgyi állomásokon 2013–2015 között

Forrás: saját szerkesztés

D10 napok száma

3.10. ábra. A szeles napok (D10) havonkénti átlagos száma 2013–2015 között a hegységi Pláj és a Pozsezevszka állomásokon

Forrás: saját szerkesztés

Rahó, Ökörmező, Alsóverecke, Alsóhidegpatak és a Pláj állomásokon az évi menet közös sajátossága a márciusi maximum (kb. 3 és 22 nap között). Ungváron, Nagybereznán és Ökörmezőn pedig az április (kb. 3 és 17 nap között). Huszton júliusban van a maximum, de az éves futása hasonló a többi nem hegységi állomásokéhoz, a másodlagos maximum áprilisban jelentkezik. A minimum helye viszont erősen változik, szinte mindegyik állomáson más hónapban van (lásd: 14. függelék) augusztus és október között. A Pozsezevszkaán decemberben következik be átlagosan a legtöbb D10 nap. A Plájon a havi átlagos értékek 14 és 21 között váltakozva novemberi maximumot és augusztusi minimumot mutatnak az ottani légréteg áramlási viszonyainak megfelelően. A két hegységi állomás havonkénti D10 napok átlagos számának évi futása hasonló ívet követ.

3.2. A napi átlagos szélességek gyakorisági eloszlása és azok közelítése valószínűségi eloszlásokkal

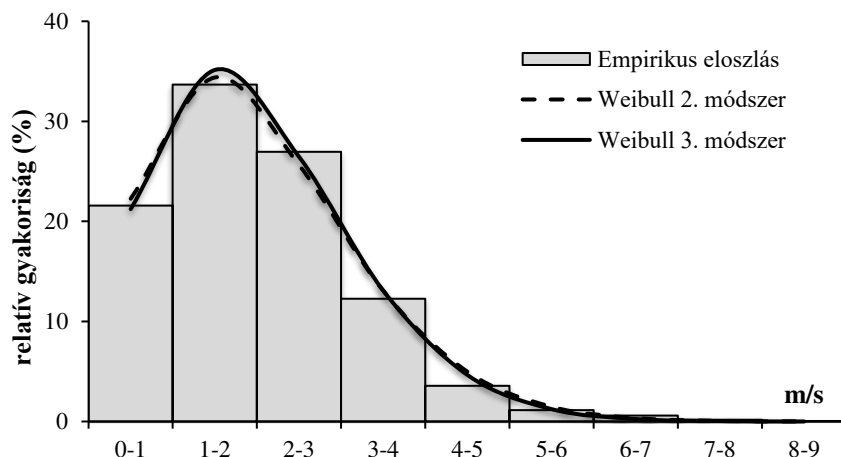
Az empirikus eloszlások elméleti eloszlásokkal való összehasonlítása, illeszkedésvizsgálata kiemelt jelentőséggel bír a szélklimatológiában. Feltételezve a szignifikáns illeszkedést, és ismerve az elméleti el-

oszlás típusát, következtethetünk az empirikus eloszlás szerkezetére, alakjára, illetve pontosabb becslést tudunk adni az adott terület szélpotenciáljára. A meteorológiai mérőállomások átlagos napi szélsébség adataiból előállított gyakorisági eloszlásokat a 2.4.3. alfejezetben bemutatott elméleti eloszlással vetettük össze, melynek eredményeit az alábbi alfejezetben mutatjuk be. Ezen eloszlások a következők: Weibull-, normál-, lognormál-, illetve gamma eloszlás. A szélklimatológiában a leggyakrabban az említett eloszlásokat alkalmazzák az empirikus szélsébségek gyakorisági eloszlásának közelítésére (Tar 2008b, Bonfils 2011, Costa Rocha et al. 2012, Xydis 2012, Khan et al. 2014, Kidmo et al. 2015, Kravchyshyn et al. 2016). Mindezek közül, a 2.4.3. alfejezetben leírtak aláján, a Weibull-eloszlás a szélenergetikai kutatásokban központi szerepet játszik.

Első lépésben a napi átlagos szélsébség adatsorokból meghatároztuk a statisztikai eloszlásfüggvények paramétereit, amelyek ezen eloszlások előállításához nélkülözhetetlenek. A Weibull-eloszlás két bemenő paramétere, ahogy azt a már említett alfejezetben leírtuk, több módszerrel is meghatározható (lásd: 2.4.3. fejezet, (2.11)-(2.17) összefüggések). A három választott módszer nem egyforma paraméter értéket adott. Ebből adódóan az illeszkedések sem bizonyultak ugyanolyan jónak. A továbbiakban, hogy különbséget tudjunk tenni az eltérő paraméterekből származtatott Weibull-eloszlások között, a Weibull 1 (a regressziós egyenlet konstansából), Weibull 2 (a szélsébség alsó és felső kvartilisének, valamint mediánjának felhasználásával), illetve Weibull 3 (a gamma-függvény segítségével lettek meghatározva) megnevezéseket használjuk.

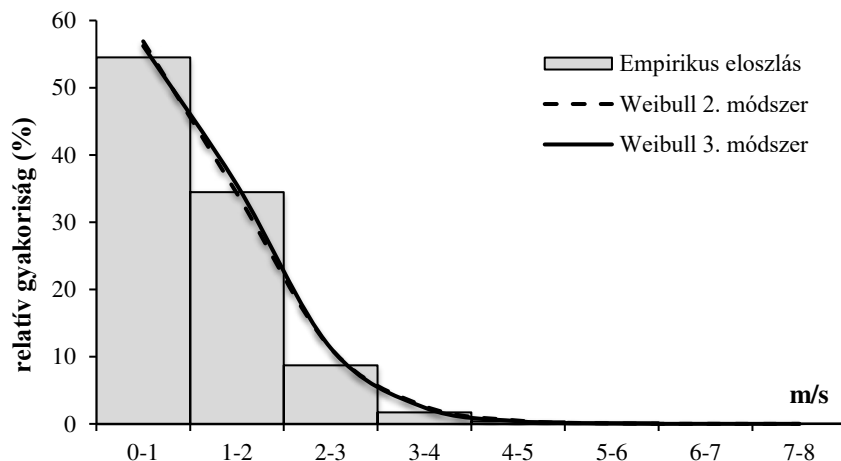
Második lépésben a szélsébség adatsorokat 1 m/s-os intervallumokra osztottuk (Morgan 1995, Reiszadeh – Motahar 2011, Costa Rocha et al. 2012, Xydis 2012, Kidmo et al. 2015) és előállítottuk a mért széladatok relatív gyakorisági eloszlását. A teljes időszakra vonatkozó adatsorból szerkesztett hisztogramok a helyi széljárás sajátosságai szerint állomásonként különböző képet mutatnak. Az alföldön és a hegyvidéki szűk folyóvölgyek alján elhelyezkedő állomásokon legfeljebb 6 (Alsóhidegpatak), 8 (Nagyberezna, Ökörmező, Alsóverecke) vagy 9 (Ungvár, Rahó) szélsébség osztályt lehet elkülöníteni. A hegységi gyakorisági eloszlás ennél több osztállyal írható le, Pozsepszevszkan 17-tel, Plájon mintegy 20-szal. Az alacsony szélsébségek miatt,

a 0-1 m/s-os osztályba Huszton az adatok 73,7%-a került. A teljes időszakra vonatkozó illeszkedések grafikus megjelenítését egy alföldi (Ungvár), egy folyóvölgyi (Ökörmező) és egy hegységi (Pláj) mérőpon-
ton a 3.11.-3.13. ábrákon figyelhetjük meg.



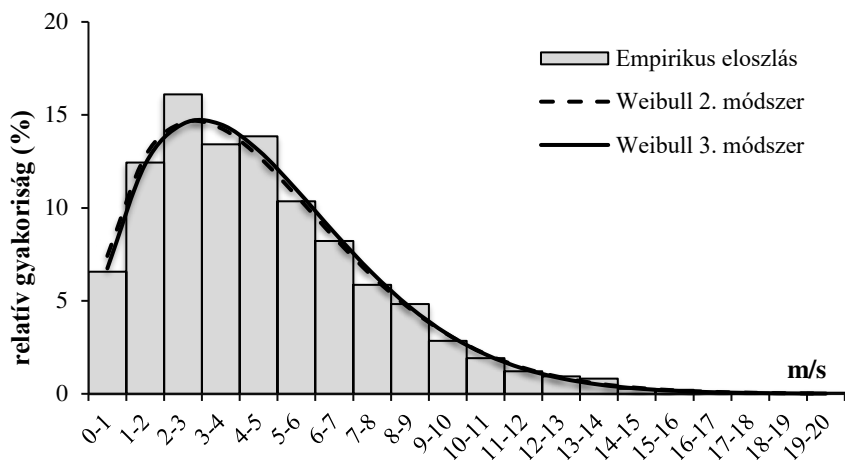
3.11. ábra. Ungvár napi átlagos szélesebbeségeinek relatív gyakorisági eloszlása és az arra szignifikáns illeszkedést adó elméleti eloszlások 2011–2015 között

Forrás: saját szerkesztés



3.12. ábra. Ökörmező napi átlagos szélesebbeségeinek relatív gyakorisági eloszlása és az arra szignifikáns illeszkedést adó elméleti eloszlások 2011–2015 között

Forrás: saját szerkesztés



3.13. ábra. Pláj napi átlagos szélesebbeségeinek relatív gyakorisági eloszlása és az arra szignifikáns illeszkedést adó elméleti eloszlások 2011–2015 között

Forrás: saját szerkesztés

Harmadik lépésben a feltételezhető domborzati különbségek kimutatására a származtatott és a megfigyelt értékek között χ^2 -próba segítségével elvégeztük az illeszkedés-vizsgálatot 10%, 5% és 1% szignifikancia szinteken. Ennek eredményeit a 3.8. táblázatban foglaltuk össze, jelölve azokat az eseteket, amelyekben a közelítés legalább a fenti szignifikancia szint valamelyikén jónak bizonyult. Amint a táblázatban látható a legtöbb esetben a Weibull-eloszlással lehetett a legjobb közelítést elérni a napi átlagos szélesebbesség idősorainak empirikus gyakorisági eloszlására. A lognormál eloszlás, és a Weibull-eloszlás egy speciális, a paraméter meghatározás szempontjából egyszerűbb esete, a Rayleigh-eloszlás, a kárpátaljai mérőállomások napi átlagos szélesebbesség idősoraira nem alkalmazható.

A teljes adatbázis illeszkedését vizsgálva elmondható, hogy a teljes időszak eloszlásainak illeszkedésvizsgálata csupán a Weibull 2, a Weibull 3 és a gamma-eloszlás esetében adott jó eredményeket 5%-os szignifikancia szinten. A Weibull 3 eloszlás a teljes időszakra, az orográfiai környezettől függetlenül, Husztot kivéve mindenhol (8 mérőpont), mindhárom szignifikancia szinten elfogadható illeszkedést adott. A Weibull 2 a teljes időszakra 5%-os szignifikancia szinten 5 mérőpont – Ungvár, Nagyberezna, Ökörmező, Alsóverceke,

Pláj és Pozsezevszka – esetében bizonyult jónak, a gamma-eloszlás pedig csupán Rahón és a Pozsezevszskán.

Az adatbázis évszakos tagolása után elmondható, hogy Huszt esetében így sem értünk el semelyik szignifikancia szinten jó illeszkedést. A Weibull 3 eloszlás Alsóhidegpatakat kivéve a többi 7 állomás minden évszakában, mindhárom szignifikancia szinten jó illeszkedést adott. A többi eloszlás „jóságának” megoszlása nem egyenletes. A normál eloszlás 2, Weibull 1 eloszlás 3, a gamma eloszlás 5, a Weibull 2 eloszlás 19 és a Weibull 3 eloszlás 30 esetben mutatott szignifikáns illeszkedést.

3.8. táblázat. Az empirikus és elméleti eloszlások illeszkedésének összesítő táblázata a teljes időszakra és évszakonként, különböző valószínűségi szinteken (*-gal jelölve, ahol szignifikáns illeszkedés van)

Eloszlás-típus	Időszak	Weibull 1. mód-szer			Weibull 2. mód-szer			Weibull 3. mód-szer			Normál			Log-normál			Gamma		
		10	5	1	10	5	1	10	5	1	10	5	1	10	5	1	10	5	1
Ungvár (112 m)	teljes				*	*	*	*	*	*									
	tél				*	*	*	*	*	*									
	tavas							*	*	*									
	nyár							*	*	*									
	ősz				*	*	*	*	*	*									
Huszt (164 m)	teljes																		
	tél																		
	tavas																		
	nyár																		
	ősz																		
Nagyberezna (205 m)	teljes				*	*	*	*	*	*									
	tél				*	*	*	*	*	*							*	*	*
	tavas							*	*	*									
	nyár							*	*	*									
	ősz				*	*	*	*	*	*							*	*	*
Rahó (430 m)	teljes							*	*	*							*	*	*
	tél				*	*	*	*	*	*									
	tavas							*	*	*									
	nyár							*	*	*									
	ősz						*	*	*	*									

A 3.8. táblázat folytatása

Eloszlás-típus	Időszak	Weibull 1. mód-szer			Weibull 2. mód-szer			Weibull 3. mód-szer			Normál			Lognor-mál			Gamma		
szignifikan-cia szint (%)		10	5	1	10	5	1	10	5	1	10	5	1	10	5	1	10	5	1
Ökörmező (456 m)	teljes				*	*	*	*	*	*									
	tél							*	*	*									
	tavaszi							*	*	*									
	nyár				*	*	*	*	*	*									
	ősz							*	*	*									
Alsóverceke (496 m)	teljes					*	*	*	*	*									
	tél	*	*	*	*	*	*	*	*	*									
	tavaszi							*	*	*									
	nyár				*	*	*	*	*	*									
	ősz				*	*	*	*	*	*									
Alsóhidegpatak (615 m)	teljes							*	*	*									
	tél				*	*	*	*	*	*	*	*	*						
	tavaszi																		
	nyár																		
	ősz				*	*	*	*	*	*									
Pláj (1330 m)	teljes				*	*	*	*	*	*									
	tél				*	*	*	*	*	*									
	tavaszi				*	*	*	*	*	*									
	nyár				*	*	*	*	*	*									
	ősz				*	*	*	*	*	*	*	*	*						
Pozsezevszka (1451 m)	teljes				*	*	*	*	*	*							*	*	*
	tél				*	*	*	*	*	*							*	*	*
	tavaszi	*	*	*	*	*	*	*	*	*							*	*	*
	nyár				*	*	*	*	*	*									
	ősz	*	*	*	*	*	*	*	*	*							*	*	*

Forrás: saját szerkesztés

3.2.1. A Weibull-eloszlás alak- és skálaparaméterének elemzése

A 3.2. alfejezetben bemutattuk a Weibull-eloszlás illeszkedését az állomások adatsoraira a három paraméter meghatározási módszerrel. A kárpátaljai mérőállomásokon az általunk Weibull 3-nak elnevezett módszer bizonyult a legjobbnak. Ez a módszer a momentum-becslésre

vezethető vissza, amelyhez ismernünk kell a szélesebbség átlagát, szórását és a gamma-függvény tulajdonságait. A továbbiakban az így kapott k és c paraméterek jellemzőit elemezzük. A Weibull-eloszlás bemenő k (mértékegység nélküli szám) és c (m/s) paraméterei nagy területi változékonyságot mutatnak, amit az orográfiai körülmények is befolyásolnak. A teljes időszakra vonatkozóan a k paraméter értéke állomásonként 1,00 (Rahó) és 2,71 (Huszt) között változott (3.9. táblázat).

3.9. táblázat. A (k) alakparaméter értékei (mértékegység nélküli szám) a teljes vizsgált időszakra és évszakos bontásban (*dőlt* – szignifikáns illeszkedést nem, de a legjobb közelítést adó érték; *félkövér* – a legnagyobb érték)

Időszak	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverecke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezszevszka (1451 m)
teljes	1,82	2,71	1,32	1,00	1,48	1,59	2,19	1,65	1,15
tél	1,68	2,24	1,21	0,79	1,43	1,56	2,07	1,65	1,18
tavaszi	2,12	2,79	1,50	1,36	1,84	1,82	2,64	1,76	1,23
nyár	2,20	3,95	1,78	1,38	1,79	2,04	2,66	1,81	1,44
ősz	1,61	2,74	1,13	0,87	1,31	1,46	2,04	1,58	1,17

Forrás: saját szerkesztés

Huszt adatsora egyik esetben sem volt közelíthető a Weibull-eloszlással, ezért a legjobban közelítő, de 0,90 elfogadási szint alatti Weibull-paramétereket használtuk. Az összes többi állomáson a k értéke 1,0 (Rahó) és 2,19 (Alsóhidegpatak) között alakult. A mintaterület egészére vonatkoztatva az ingás 2,07-ot jelent. A k értéke évszakos bontásban is változatos értékeket mutat a különböző állomásokon. A legnagyobb értékek nyáron (Ungvár, Huszt, Nagyberezna, Rahó, Alsóverecke, Alsóhidegpatak, Pláj és Pozsezszevszka) és tavasszal (Ökörmező) jelentkeznek. A legnagyobb évszakos értékek összehasonlításában is jelentős eltérés mutatkozik, 3,95 (Huszt) és 0,79 (Rahó) értékei között 3,16 különbség tapasztalható. Havi bontásban vizsgálva a k maximumai júniusban (Huszt, Nagyberezna, Alsóverecke, Alsóhidegpatak, Pláj), júliusban (Ungvár, Rahó, Ökörmező és Pozsezszevszka)

ka) jelentkeznek. A minimumai pedig novemberben (Ungvár, Nagyberezna, Ökörmező, Alsóverecke, Pláj és Pozsezsevszka), januárban (Rahó, Alsóhidegpatak) és májusban (Huszt) adódnak. A részletes havi bontás a 15. függelékben tekinthető meg.

Henessey (1977) szerint ahol az átlagos szélesebség a legnagyobb és a Weibull-eloszlás alakparamétere a legkisebb, ott a legnagyobb a teljes fajlagos szélteljesítmény. Kárpátalján a k értékek viszonylag alacsonyak, de ehhez nem párosul nagy átlagos szélesebség, így bizonyára nem magasak a fajlagos szélteljesítmények sem, ez alól a Pláj állomás képezhet kivételt. A nagy k értékek a szélteljesítmény kis változékonyságát jelenthetik.

A teljes időszakra vonatkozóan a c paraméter értéke (3.10. táblázat) állomásonként még nagyobb változékonyságot mutat. Az ötéves időszakra vetítve az értékek terjedelme 5 m/s. A legnagyobb érték a Pláj állomáson (5,23 m/s), míg a legkisebb a huszti állomáson (1,03 m/s) következik be. A két szélsőérték elhelyezkedése várható volt, hiszen a skálafaktor értékei követik az állomások évi átlagos szélesebség értékeinek nagyságát. A terjedelem mellett az évszakonkénti c paraméter variációs együttható értékei is alátámasztják a mérőpontok széljárásából adódó különbségeket, hiszen a huszti állomáson a c variációs együtthatója 0,38 m/s, a Pláj állomáson pedig 0,66 m/s, sőt a Pozsezsevszka állomáson a szórás 0,82 m/s, azonban mégsem itt a c értéke a legnagyobb, mivel az átlagos szélesebség sem itt a legnagyobb, csak az adatok szórása nagy. A c paraméter alapján felállított állomás sorrend teljesen követi a napi átlagos szélesebség variációs együtthatójának állomás sorrendjét. Mindez azt mutatja, hogy a széljárást illetően nagy különbségek vannak a mintaterület különböző részei között.

Az állomások c paraméterének maximuma Ungvár, Huszt, Nagyberezna, Rahó és Ökörmező esetében tavasszal, míg Alsóverecke, Alsóhidegpatak, Pláj és Pozsezsevszka állomások esetében télen következik be, ez az állomásokon ilyenkor tapasztalt elsődleges szélmaximummal hozható összefüggésbe. Havi bontásban a maximumok bekövetkezése változó. Az alacsonyabb tengerszint feletti magassággal rendelkező állomásokon április-március, illetve február, a magasabban fekvő mérőpontokon (Alsóverecke, Alsóhidegpatak, Pláj és Pozsezsevszka) a december. Ez a c paraméter és a tengerszint feletti magas-

ság összefüggésére utal. A minimumok hónapjai erősen szóródnak. A részletes havi bontás a 16. függelékben tekinthető meg.

3.10. táblázat. A (c) skálaparaméter értékei (m/s) a teljes vizsgált időszakra és évszakos bontásban

(*dőlt* – nincs szignifikáns illeszkedés; **félkövér** – a legnagyobb érték)

Időszak	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
teljes	2,30	1,03	1,42	1,44	1,30	2,02	1,66	5,23	3,59
tél	2,25	0,94	1,30	1,22	1,47	2,40	1,93	5,91	4,73
tavaszi	2,82	1,18	1,92	2,15	1,66	2,32	1,76	5,54	3,47
nyár	2,21	1,03	1,43	1,31	0,86	1,71	1,44	4,36	2,74
ősz	1,92	0,95	1,02	1,12	1,03	1,69	1,50	5,16	3,65

Forrás: saját szerkesztés

A kárpátaljai mérőállomások skálaparamétereinek értékét összevetettük azok tengerszint feletti magasságával. A 3.11. táblázatban összefoglaltuk mindhárom paraméter meghatározási módszer alapján kapott *c* értékeket és a korrelációs együtthatókat.

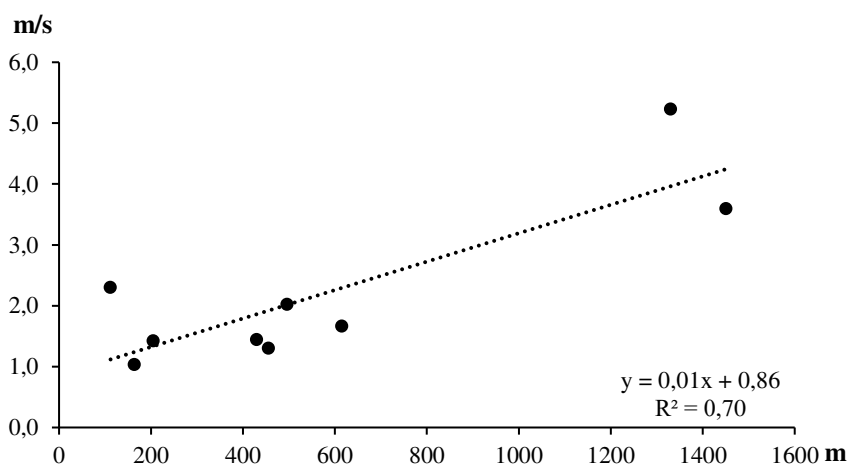
3.11. táblázat. A mérőállomások skálaparamétereinek (c) (m/s) összehasonlítása a tengerszint feletti magassággal (tszfm.) (m)

Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)	A korrel. együtth. (<i>r</i>) értéke
tszfm.	112	164	205	430	456	496	615	1330	1451	
C _w 1. módszer	9,82	12,58	25,78	13,97	11,41	9,72	5,43	3,56	8,54	-0,56
C _w 2. módszer	2,31	0,96	1,30	1,34	1,29	1,86	1,57	5,19	3,63	0,84
C _w 3. módszer	2,30	1,03	1,42	1,44	1,30	2,02	1,66	5,23	3,59	0,84

Forrás: saját szerkesztés

Látható, hogy egyazon állomáson az értékek mindhárom esetben különböznek, de főként a Weibull 1. módszerrel meghatározott értékek mutatnak jelentős különbséget az utóbbi kettőhöz viszonyítva. A Weibull 2. és Weibull 3. módszerrel kapott értékek abszolút különbségeinek átlaga 0,02 m/s, ami minimális elérést jelent.

A 3.14. ábrán a legtöbb esetben illeszkedést adó módszer (c_w 3. módszer) alapján meghatározott skálaparaméter és a tengerszint feletti magasság közötti lineáris korrelációt mutatjuk be. A korrelációs együttható átlagos értéke 0,84 volt. A korrelációs együttható megbízhatóságát t-próbával és a varianciaanalízis során alkalmazott F-próbával teszteltük. Mind a két próba alapján 5%-os megbízhatósági szinten állíthatjuk, hogy a két változó között megbízható összefüggés van, reális kapcsolat áll, az r szignifikánsan eltér 0-tól. A skálaparaméter összvarianciájának 70%-a a mérőpont tengerszint feletti magasságától való lineáris kapcsolatával magyarázható.



3.14. ábra. A tengerszint feletti magasság (m) és a skálaparaméter (c , m/s) közötti összefüggés

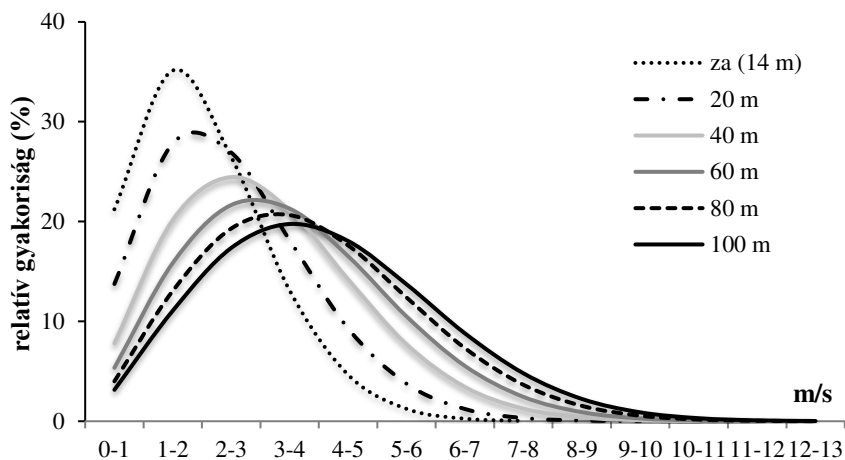
Forrás: saját szerkesztés

A Weibull-eloszlás skála- és alakparaméterének magassággal történő változását vizsgálva Kircsi – Tar (2008) azt tapasztalta, hogy az alakparaméter 120 m magasságig gyakorlatilag állandónak tekinthető. Az alaktényező a nagyobb szélesebségek előfordulási gyakoriságát

jellemzi. Nagy értéke esetén gyors lecsengésű az eloszlás, kicsi a szélsősebesség változékonysága. Túlbecslése csökkenti a szélklíma változékonyságát és az extrém szélsőbességek előfordulási valószínűségét. Így valóban a nagy alaktényező értékek a szélteljesítmény kis változékonyságát jelenthetik. A skálaparamétert befolyásolja a magasság és a magassággal bekövetkező átlagos szélsőbesség növekedés. A szélenergiát tehát a skálaparaméter határozza meg. Továbbá, a nagyobb skálaparaméter (nagyobb szélenergia), állandó alaktényezőt feltételezve, a függvény abszcissza irányú megnyúlását eredményezi a maximális függvényérték csökkenése és jobbra tolódása mellett.

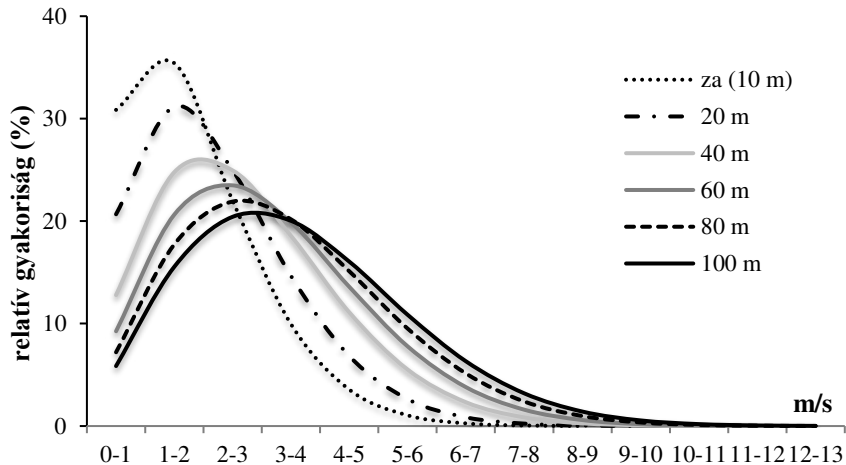
3.3. A napi átlagos szélsőbességek gyakorisági eloszlása különböző magasságokban a Weibull-eloszlás alapján

Bizonyos, hogy nem elég csupán a felszínhez legközelebb, az anemométer magasságában mért szélsőbességek relatív gyakoriságát és más energetikai paramétereit ismernünk. A napjainkban alkalmazott, főleg ipari szélerőművek tengelymagassága, típustól függően eléri a 80-120 m-t. Így energetikai szempontból fontos tudnunk ezekben a magasságokban is a szélsőbességek egyes karakterisztikáit. A szélklimatológiában erre a célra gyakran a gamma-függvények családjába tartozó Weibull-eloszlás tulajdonságai használhatók fel (Tar 2008b, Bonfils 2011, Kravchyshyn et al. 2016). Az eloszlás paraméterei meghatározhatók az anemométer magasságában mért szélsőbesség értékekből. A mérési szintre vonatkozó értékekből a paraméterek más magasságokra is kiszámolhatók, vagyis a Weibull-eloszlás segítségével a szélsőbesség gyakorisági eloszlása az anemométer magasságától (z_a) eltérő szintekben (z) is leírható. Ennek meghatározási módját a 2.4.3. alfejezetben szintén bemutattuk. A z_a értékeit a 2.1. táblázatból vettük, a választott magasságok pedig $z=20, 40, 60, 80$ és 100 m. Tehát itt a napi átlagsebességek eredeti mért, nem transzformált idősorait használtuk fel. Huszt esetében – ahogy azt a Weibull eloszlás paramétereinek elemzésekor is tettük, a legjobban közelítő, de $0,90$ elfogadási szint alatti paramétereket használtuk. Ezek segítségével előállítottuk minden állomáson a szélsőbesség gyakorisági eloszlását a z magasságokban. A 3.15-3.17. ábrákon egy választott síkvidéki (Ungvár), völgyi (Alsóverecke) és hegységi (Pláj) mérőpont szélsőbességeinek gyakorisági eloszlását mutatjuk be.



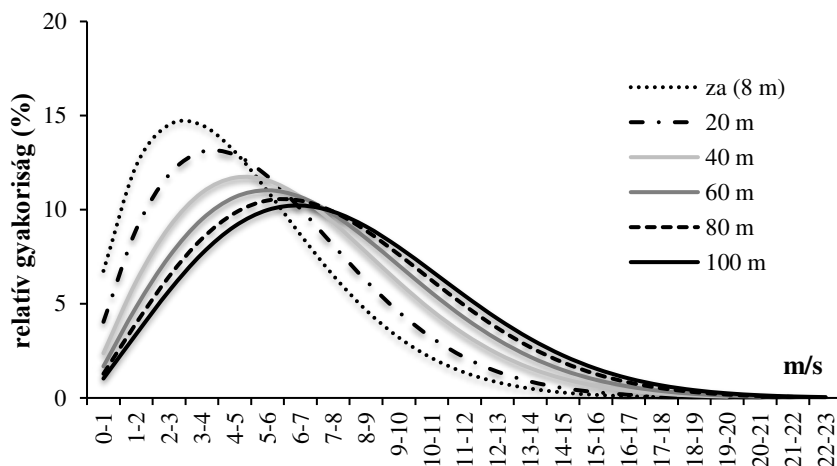
3.15. ábra. A napi átlagos szélesebségek relatív gyakorisági eloszlása Ungváron az anemométer magasságában (z_a) és további 5 szinten (2011–2015)

Forrás: saját szerkesztés



3.16. ábra. A napi átlagos szélesebségek relatív gyakorisági eloszlása Alsóvereckén az anemométer magasságában (z_a) és további 5 szinten (2011–2015)

Forrás: saját szerkesztés



3.17. ábra. A napi átlagos szélesebségek relatív gyakorisági eloszlása a Plájon az anemométer magasságában (z_a) és további 5 szinten (2011–2015)

Forrás: saját szerkesztés

3.3.1. A szélesebségek statisztikai jellemzői különböző magasságokban

A $z=20, 40, 60, 80$ és 100 m szinteken meghatároztuk az átlagos értékeket, a szórást, a móduszt és a variációs együtthatót, amelyeket az eloszlás paramétereivel együtt a 3.12. táblázatban közöltünk. Ezen paraméterek meghatározásához a 2.4.3. alfejezetben ismertetett (2.21)-(2.24) összefüggéseket használtuk. A táblázatban a z_a szint mellett szereplő értékek az anaemométer magasságára érvényesek. Az eltérő mérőmagasság (8 és 16 m között) miatt az összes állomást nem tudjuk összehasonlítani. A 10 m-es szintre transzformált statisztikai mutatók összehasonlítását a 3.1.1. alfejezetben már bemutattuk. A következőkben a további z magasságokban meghatározott értékeket elemezzük.

Az állomások közötti növekvő sorrend az átlagos szélesebség alapján minden magasságban (az anemométer magasságában és 10 m-en is) megegyezik: Huszt, Ökörmező, Nagyberezna, Rahó, Alsóhidegpatak, Alsóverecke, Ungvár, Pozsezsevszka és Pláj. Természetesen a szélesebség a magassággal növekszik, így 100 m-en 2,2 m/s (Huszt) és 7,7 m/s (Pláj) között változik. Az összes állomás átlagos szélesebségét figyelembe véve a terület átlagos szélesebsége 100 m-en eléri a 4 m/s-ot. Figyelemre méltó a hegységi Pláj és Pozsezsevszka állomás,

ahol az átlagos szélesség már kb. 50 m-en eléri a 7 m/s-ot, illetve az 5 m/s-ot. Az alföldön a legnagyobb szélességgel Ungvár rendelkezik, ahol 100 m-en átlagosan meghaladja a 4 m/s-ot. A völgyeket tekintve az átlagos szélesség még ebben a magasságban sem túl kedvező a szélenergia hasznosítás szempontjából, csupán Alsóhidegpatakon és Alsóvereckén haladja meg átlagosan a 3 m/s-ot.

3.12. táblázat. A napi átlagos szélesség eloszlását leíró Weibull-eloszlás paraméterei és az átlagos szélesség az anemométer (z_a) magasságában és további 5 szinten

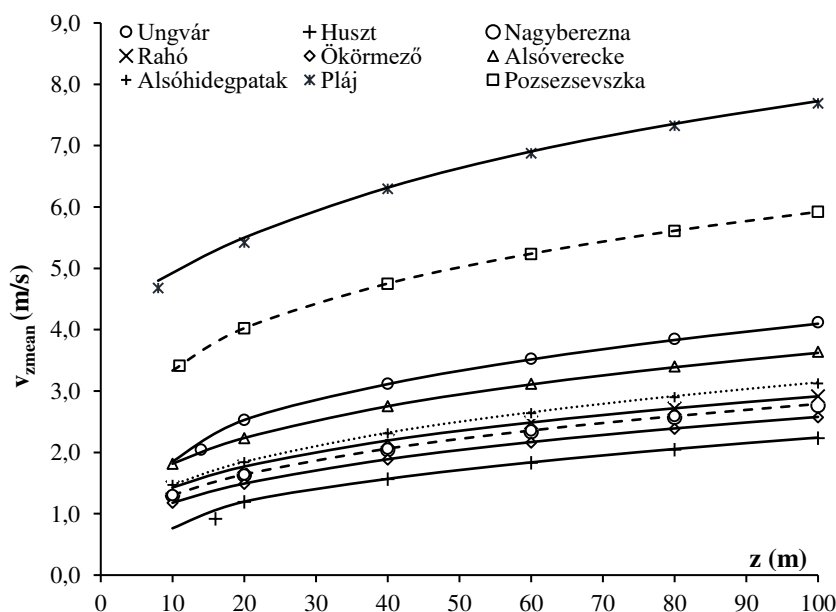
(kiemelve: **első**, **második** és **harmadik legnagyobb** és **legkisebb** érték)

Magasság	Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóvercke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsegszeka (1451 m)
	z_a (m)	14	16	10	10	10	10	10	8	11
	n	0,31	0,38	0,34	0,34	0,35	0,31	0,33	<u>0,22</u>	0,26
	k_a	1,82	2,71	1,32	<u>1,02</u>	1,48	1,59	2,19	1,65	1,15
z_a m	c_a (m/s)	2,30	<u>1,03</u>	1,42	1,44	1,30	2,02	1,66	5,23	3,59
	átlag (m/s)	2,1	<u>0,9</u>	1,3	1,4	1,2	1,8	1,5	4,7	3,4
20 m	k_z	1,88	2,77	1,40	<u>1,07</u>	1,58	1,70	2,34	1,79	1,22
	c_z (m/s)	2,85	<u>1,35</u>	1,79	1,82	1,66	2,51	2,08	6,10	4,29
	átlag (m/s)	2,53	<u>1,2</u>	1,6	1,8	1,5	2,2	1,8	5,4	4,0
40 m	k_z	2,01	2,96	1,50	<u>1,14</u>	1,69	1,81	2,60	1,91	1,30
	c_z (m/s)	3,52	<u>1,75</u>	2,27	2,30	2,11	3,10	2,97	7,10	5,14
	átlag (m/s)	3,1	<u>1,6</u>	2,1	2,2	1,9	2,8	2,6	6,3	4,8
60 m	k_z	2,10	3,09	1,56	<u>1,19</u>	1,76	1,89	2,68	1,99	1,36
	c_z (m/s)	3,98	<u>2,05</u>	2,60	2,64	2,43	3,51	3,27	7,76	5,71
	átlag (m/s)	3,5	<u>1,8</u>	2,3	2,5	2,2	3,1	2,8	6,9	5,2
80 m	k_z	2,16	3,18	1,61	<u>1,23</u>	1,82	1,95	2,68	2,06	1,40
	c_z (m/s)	4,35	<u>2,29</u>	2,87	2,91	2,68	3,84	3,27	8,27	6,15
	átlag (m/s)	3,9	<u>2,1</u>	2,6	2,7	2,4	3,4	2,9	7,3	5,6
100 m	k_z	2,21	3,26	1,65	<u>1,26</u>	1,86	2,00	2,75	2,11	1,43
	c_z (m/s)	4,66	<u>2,49</u>	3,09	3,13	2,90	4,11	3,51	8,69	6,52
	átlag (m/s)	4,1	<u>2,2</u>	2,8	2,9	2,6	3,6	3,1	7,7	5,9

Forrás: saját szerkesztés

A 3.18. ábrán az egész időszakra számított átlagsebességek ($v_{z\text{átl}}$) magasságtól való függését ábrázoljuk a 3.12. táblázat adatai alapján. A számított értékekre (6 pontra) hatványfüggvényt illesztettünk. A hatványfüggvény szerint $v_1=ah_1^\alpha$, $v_2=ah_2^\alpha$, azaz így felírható az ún. Hellman-féle összefüggésnek a széleenergia kutatásban szokásos alakja (2.2) a h_1 és h_2 szintek v_1 és v_2 átlagsebességeire.

A (2.6) és a (2.18) összefüggések – mivel skálafaktorok is m/s mértékegységgel bírnak – elméletileg ugyanazok, azaz $n=\alpha$. Erre utalnak az illesztés α -ra vonatkozó eredményei is. Ezek ugyanis a következők: Ungvár 0,30, Huszt 0,39, Nagyberezna 0,33, Rahó 0,31, Ökörmező 0,34, Alsóverceke 0,30, Alsóhidegpatak, 0,33, Pláj 0,21 és Pozsezevszka 0,24, amelyek jó egyezést mutatnak a 3.12. táblázat n -re vonatkozó adataival. Vagyis, ha valamilyen más módszerrel, pl. különböző szintekben történt szélesebesség mérésekkel az α értékét meghatároztuk, akkor egyben egy igen fontos Weibull-paramétert is megismertünk (Tar 2008b).



3.18. ábra. Az egész mérési időszakra számított átlagos szélesebességek (pontok) és a rájuk illesztett hatványfüggvény (vonalak)

Forrás: saját szerkesztés

A z magasságokban előállított variációs együttható alapján – amely azt mutatja, hogy hányadrésze a tapasztalati szórás a középértéknek – összehasonlíthatjuk az egyes mérőpontokon a szélsébségek relatív változékonyságát és elkülöníthetjük a legkevésbé és legjobban változékony széljárású területeket. A szélenergia kitermelés szempontjából az egyenletes széljárás a kedvezőbb, azaz ha a szélsébségek állandóan az átlag körül mozognak. Azok a kedvező széljárású területek, ahol az alacsony variációs együtthatóhoz magas átlagos szélsébség párosul. A 3.13. táblázat szerint minden z szintben (korábban 10 m-en is minden mérőpontban) a variációs együttható alapján az állomások közötti növekvő sorrend: Huszt, Alsóhidegpatak, Ungvár, Pláj, Alsóverecke, Ökörmező, Nagyberezna, Pozsezevszka, Rahó. A 100 m-es szintben 0,4 (Huszt) és 0,8 (Rahó) között változik. Amint láttuk a 3.12. táblázatban 10 m-en az átlagos szélsébségek legnagyobbak Ungváron, Pozsezevszskán és Plájon. Ezek közül a legkevésbé változékony széljárású Ungvár és Pláj. A két állomás különböző orográfiai környezetben található. Ha a magasabb szintek (80, 100 m) szélsébségeit vesszük figyelembe, akkor a szélenergia felhasználás szempontjából Kárpátalján, az alföldön az Ungi-sík, a hegyvidéken pedig a Borzsa-havas területén találhatunk a legkedvezőbb feltételekre.

A statisztikai középértékek közül a módusz szintén fontos információt hordoz a szélsébségek eloszlásáról, mivel az adatok közül ez az érték, amely a legtöbbször fordul elő. A z magassággal a módusz esetében változást tapasztalunk az állomások közötti sorrendben. Az anemométer magasságában és 10 m-en is tapasztalható növekvő sorrend: Pozsezevszka, Rahó, Nagyberezna, Huszt, Ökörmező, Alsóverecke, Ungvár, Alsóhidegpatak és Pláj. A 20 m-es szinttől Rahó, Nagyberezna, Pozsezevszka, Huszt, Ökörmező, Alsóverecke, Alsóhidegpatak, Ungvár és Pláj. Tulajdonképpen csak a Pozsezevszka és Ungvár lépett előrébb a sorban, azaz itt lett magasabb a módusz. Ennek magyarázata a függőleges szélprofil változásában keresendő. A nyitott helyeken a magassággal gyorsabban növekszik a szélsébség (Patay et al. 2008) mint a zárt, szűk völgyekben, ahol a felszíni érdekesség (domborzat, erdőborítás) is nagyobb. Kárpátaljai viszonylatban, a módusz tekintetében is kedvező telephelynek bizonyul Ungvár és Pláj, ahol a legvalószínűbb szélsébség 100 m-en eléri

a 3,6 m/s-ot, illetve a 6,4 m/s-ot. A másik hegységi állomás, a Pozsezszevszka is viszonylag magas átlagos szélsébséggel (100 m-en 5,9 m/s) rendelkezik, azonban a magas variációs együttható (100 m-en 0,7) és az alacsony módusz (100 m-en 2,8 m/s) miatt a szélturbinák folyamatos, kiegyenlített működése nem lehetséges.

3.13. táblázat. A szélsébség variációs együtthatója, módusza és a legnagyobb energiát hordozó szélsébség az anemométer z_a magasságában és további 5 szinten, a 2011–2015-ös időszakban (kiemelve: **első**, **második** és **harmadik** legnagyobb és **legkisebb** érték)

Magasság	Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláaj (1330 m)	Pozsezszevszka (1451 m)
	z_a	14	16	10	10	10	10	10	8	11
z_a m	var.eh.	0,6	<u>0,4</u>	0,8	1,0	0,7	0,7	0,5	0,6	0,9
	módusz (m/s)	1,2	0,9	0,8	0,7	1,0	1,0	1,3	3,0	<u>0,6</u>
	v_{maxE} (m/s)	3,5	<u>1,3</u>	2,9	4,2	2,3	3,4	2,2	8,5	8,6
20 m	var.eh.	0,6	<u>0,4</u>	0,7	0,9	0,7	0,6	0,5	0,6	0,8
	módusz (m/s)	1,9	1,1	0,9	<u>0,8</u>	1,2	1,5	1,6	3,9	1,0
	v_{maxE} (m/s)	4,2	<u>1,6</u>	3,4	4,9	2,8	4,0	2,7	9,3	9,5
40 m	var.eh.	0,5	<u>0,4</u>	0,7	0,9	0,6	0,6	0,4	0,5	0,8
	módusz (m/s)	2,5	1,5	1,2	<u>0,9</u>	1,6	2,0	2,5	4,8	1,7
	v_{maxE} (m/s)	5,0	<u>2,1</u>	4,0	5,6	3,4	4,7	3,3	10,3	10,5
60 m	var.eh.	0,5	<u>0,4</u>	0,7	0,8	0,6	0,6	0,4	0,5	0,8
	módusz (m/s)	2,9	1,8	1,4	<u>0,9</u>	1,9	2,4	2,6	5,5	2,1
	v_{maxE} (m/s)	5,5	<u>2,4</u>	4,4	6,1	3,7	5,2	3,7	11,0	11,1
80 m	var.eh.	0,5	<u>0,3</u>	0,6	0,8	0,6	0,5	0,4	0,5	0,7
	módusz (m/s)	3,3	2,0	1,57	<u>1,1</u>	2,1	2,7	2,8	6,0	2,5
	v_{maxE} (m/s)	5,9	<u>2,7</u>	4,7	6,4	4,0	5,5	4,0	11,5	11,6
100 m	var.eh.	0,5	<u>0,3</u>	0,6	0,8	0,6	0,5	0,4	0,5	0,7
	módusz (m/s)	3,6	2,1	1,76	<u>1,15</u>	2,2	2,9	3,0	6,4	2,8
	v_{maxE} (m/s)	6,2	<u>2,9</u>	5,0	6,69	4,29	5,8	4,3	11,9	12,0

Forrás: saját szerkesztés

A legnagyobb energiát hordozó szélesebesség (v_{maxE}) tekintetében (3.13. táblázat) a vártak megfelelően minden magassági szinten Huszton kaptuk a legalacsonyabb értékeket (20 m-en 1,6 m/s, 100 m-en 2,9 m/s) és Pozsezevszka a legmagasabbakat (20 m-en 9,6 m/s, 100 m-en 12,0 m/s). Az összes állomás közül a Pozsezevszka jelentkezik a legerősebb szelek és egyben a legnagyobb energiát hordozó szelek, de ezek időbeli eloszlása nem egyenletes. A Pláj állomáson kaptuk a második legmagasabb értékeket (20 m-en 9,3 m/s, 100 m-en 11,9 m/s) a legnagyobb energiát hordozó szélesebességre, amihez viszonylag alacsony variációs együttható is párosul, ez a szélerergia felhasználás szempontjából ugyancsak kedvező adottság. A harmadik legmagasabb értékekkel Rahó rendelkezik, ahol a Pozsezevszkaéhoz hasonló széljárást tapasztalunk. Rahón alacsonyabb az átlagos szélesebesség, azonban az alacsony módusz, a magas szórás és variációs együttható, továbbá a legnagyobb energiát hordozó szelek átlagsebessége azt bizonyítja, hogy az itteni széljárást szintén a gyakori szélcsend és az emellett jelentkező erős szelek jellemzik. Rahó a Fekete-Tisza folyó völgyében, Pozsezevszka pedig a Csornohorai-masszívum gerincén helyezkedik el. A különböző domborzati viszonyok között található két mérőpont hasonló széljárása valószínű, hogy az egymáshoz való közelség (légvonalban 35 km) és a folyóvölgy északkelet-dél nyugati csapásirányának tudható be, amely megegyezik a hegygerinc fölött jellemző ugyanilyen irányú áramlással, ezt a Pozsezevszka állomás szélrózsája is mutatni fogja.

3.3.2. Az energetikailag hasznosítható szélesebességek időtartama különböző magasságokban

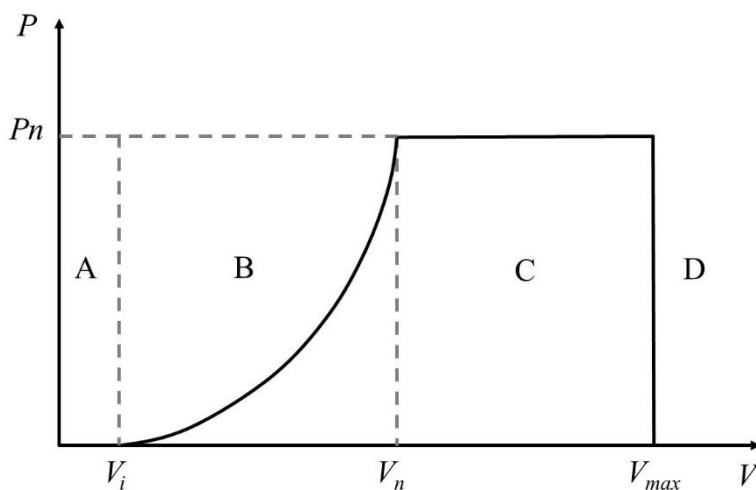
A 3.19. ábra a szélerőművek jellemző szélesebesség-teljesítmény görbét szemlélteti. A szélesebesség és a turbinatengelyen leadott teljesítmény között köbös összefüggés áll fent (Patay 2003, Sembery – Tóth 2004). A szélerergia hasznosíthatóság szempontjából a mért szélesebességeket három csoportba sorolhatjuk:

- a „meddő” szélesebességek (A), a legalacsonyabb sebesség értékek, amelyek tartománya modern szélturbinák esetében általában a szélcsendtől 3 m/s-ig terjed (a szélturbina által definiált küszöbérték). Ez energiatermelés szempontjából nem haszno-

sítható. A termelés tehát a v_i indulási sebességnél (cut-in speed, jellemzően ~ 3 m/s) kezdődik (B);

- az energetikailag felhasználható szélesebbesség, melynek értéke 3 m/s-tól azon szélesebbességig terjed, amely még elegendően gyakran előfordul ahhoz, hogy figyelembe vegyünk. Ez az üzemi szélesebbesség tartomány (C). Azt a legkisebb sebességet, aminél a szélturbina képes leadni a névleges teljesítményét (P_n) v_n jelöli (rated output speed, jellemzően ~ 13 - 14 m/s);
- korlátozottan hasznosítható szélesebbességek (D), amelyek előfordulása esetén az erőművet valamilyen védelemben kell részesíteni (üzemi biztonság).

A legnagyobb megengedett szélesebbesség a v_{max} , amellyel egyenlő vagy azt meghaladó szélesebbesség esetén az erőmű épségének érdekében leállítják a termelést (cut-out speed, jellemzően ~ 25 m/s). Az első tartományban (B), v_i és v_n között a cél a szélben meglévő teljesítmény maximális kihasználása (sebességszabályozás). A második tartományban (C), v_n és v_{max} sebesség között a cél az állandó, vagy szigetüzemben a fogyasztásnak megfelelő teljesítményre szabályozás (teljesítményszabályozás) (Sembery – Tóth 2004, Shchur 2017).



3.19. ábra. A szél erőművek jellemző szélesebbesség-teljesítmény görbéje

Forrás: saját szerkesztés Patay 2003, Sembery – Tóth 2004 nyomán

A szélenergia hasznosítás és tervezés szempontjából az adott földrajzi helyen fontos ismernünk az energetikailag hasznosítható szélesebségek ($3 \leq v < 25$ m/s) időtartamát, azaz a szélturbinák üzemóraszámát (OH – operating hours of wind turbine). Első lépésben állomásonként 10 m-es magasságban határoztuk meg az egész időszakra, majd évszakos és havi bontásban is ezt az energetikai mutatót, a 3 órás szélesebségek adatsorából. Az energetikailag hasznosítható szélesebségek időtartamát az alábbiak szerint határozhatjuk meg:

$$OH = \sum_{i=1}^n x_i t \quad (3.1)$$

ahol, x_i a $3 \leq v < 25$ m/s szélesebségek előfordulásának száma a nap folyamán, a t a két mérés között eltelt idő (óra).

A 3.14. táblázatban összesítettük az éves üzemóraszám statisztikai mutatóit (évszakos bontásban a 17. függelékben). A táblázat első sorában az év folyamán lehetséges órák számát ($OH_{\text{lehetséges}}$) tüntettük fel (azaz $365 \times 24 = 8760$ óra/év).

A második sorban a megfigyelt éves üzemóraszám ($OH_{\text{megfigyelt}}$) látható. A legmagasabb értékek, a vártak megfelelően, a Plájon és a Pozsepszvaskán jelentkeznek. Ezután Alsóverecke következik, ami meglepő, hiszen a legtöbb paraméter alapján a két hegységi állomást általában Ungvár követi. Alsóverecke a szélesebség adatsora elemeinek maximuma és felső kvartilise alapján szintén a harmadik helyet foglalja el az állomások között. Ez valószínűleg annak tudható be, hogy a mérőpontra, a viszonylag alacsony átlagos szélesebség ellenére, az év egy-egy szakában a szélesebség tartósan a $3 \leq v < 25$ m/s-os tartományban marad.

A harmadik sorban az energetikailag hasznosítható szélórák átlagos éves relatív értékeit ($OH_{\text{relatív}}$) mutatjuk be százalékban. Látható, hogy pl. Plájon átlagosan az év 62,7%-ban üzemelne egy 3 m/s-os indító sebességgel és 25 m/s-os legnagyobb megengedett szélesebséggel definiálható szélturbina. Ungváron, az alföldi részen ez az érték csupán 20% körül van. A folyóvölgyi állomásokon pedig 6,8% (Ökörmező) és 30,2% (Alsóverecke) között mozog.

A negyedikől a tizenegyedikig tartó sorokban az energetikailag hasznosítható szélesebségek időtartamának folyamatosságát ($OH_{\text{folyamatos}}$) jellemeztük.

3.14. táblázat. Az energetikailag hasznosítható szélesebségek időtartamának egyes paraméterei 10 m-es magasságban a 2011–2015-ös időszakban (kiemelve: **első**, **második** és **harmadik** legnagyobb és **legkisebb** érték)

Sorszám	Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
1	$OH_{\text{lehetséges}}$ (óra/év)	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760
2	$OH_{\text{megfigyelt}}$ (óra/év)	1685	<u>36</u>	1152	1282	599	2650	1086	5495	3414
3	$OH_{\text{relatív}}$ (%)	19,2	<u>0,4</u>	13,2	14,6	6,8	30,2	12,4	62,7	39,0
4	$OH_{\text{folyamatos, átlag}}$ (óra)	6,7	<u>3,8</u>	6,9	8,3	5,2	7,1	5,4	16,7	11,6
5	$OH_{\text{folyamatos, szórás}}$ (óra)	5,7	<u>1,7</u>	6,1	9,1	5,0	8,7	3,8	23,5	17,9
6	$OH_{\text{folyamatos, variációs együttható}}$	0,86	<u>0,45</u>	0,89	1,10	0,98	1,23	0,71	1,40	1,54
7	$OH_{\text{folyamatos, minimum}}$ (óra)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
8	$OH_{\text{folyamatos, maximum}}$ (óra)	51,0	<u>9,0</u>	57,0	117,0	78,0	159,0	27,0	246,0	252,0
9	$OH_{\text{folyamatos, maximum hónapja}}$	márc dec	jan ápr máj	márc	márc	márc	ferb	febr márc	jan nov	jan
10	$OH_{\text{folyamatos} \leq 3}$ óra (%)	21,5	67,1	21,0	15,8	38,9	22,6	31,7	6,5	12,2
11	$OH_{\text{folyamatos} > 3}$ óra (%)	78,5	<u>38,3</u>	79,0	84,2	61,1	76,4	68,3	93,5	87,8
12	$v < 3$ m/s időtar- tama (óra/év)	7080	8729	7613	7483	8166	6115	7679	<u>3251</u>	5347
13	$v < 3$ m/s relatív (%)	80,8	99,6	86,9	85,4	93,2	69,8	87,7	<u>37,1</u>	61,0
14	$v \geq 25$ m/s időtar- tama (óra/év)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	3,6
15	$v \geq 25$ m/s relatív (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,04

Forrás: saját szerkesztés

A szélturbina optimális működéséhez az üzemi szélesebesség minél nagyobb mértékű folyamatosságára van szükség. A szélenergia felhasználás szempontjából az a hely a kedvezőbb, ahol pl. az üzemórák éves összege nem rövid ideig tartó, az idősorban „tüskéként” jelentkező néhány magas és sok alacsony értékből áll össze, hanem ahol az üzemi szélesebességek hosszú, magas átlagú és kis szórású idősorokat képeznek. A 3.14. táblázatból kiderül, hogy a folyamatos üzemi szélesebességek ($3 \leq v < 25$ m/s) átlagos időtartama 3,8 óra (Huszt) és 16,7 óra (Pláj) között változik. Az alföldi és folyóvízgyi állomásokon az átlagos folyamatos üzemidő 10 óra alatt van, míg a hegységeken átlagosan 10 óra felett. A folyamatos üzemidő óráinak szórása és variációs együtthatója az összes állomáson magas értékeket mutat. A legváltozékonyabb e tekintetben Pozsezszevszka (1,5), Pláj (1,4) és Alsóverecke (1,2).

A folyamatos üzemóraszámok maximumainak állomássorrendje megegyezik a variációs együtthatóéval. A maximum óraszám a két hegységi állomáson elérheti a 250 órát, ez több mint 10 nap folyamatos generátorműködést jelent. A folyamatos üzemidőtartamok maximumainak bekövetkezése az alföld és folyóvízgyek állomásain átlagosan tavaszra vagy a tél végére esnek, míg a hegységeken az ős végére és télre.

A tizedik és tizenegyedik sorokban az átlagos folyamatos üzemidő két további paraméterét mutatjuk be, mégpedig a 3 óra vagy annál rövidebb ideig tartó ($OH_{folyamatos} \leq 3$ óra) és a 3 óránál hosszabb ($OH_{folyamatos} > 3$ óra) folyamatos üzemidők előfordulásának százalékos arányát az egyes állomások között. Ebből láthatjuk, hogy elsősorban Huszton, Ökörmezőn és Alsóhidegpatakon, ha jelentkezik is az üzemi szélesebesség, akkor az viszonylag rövid ideig is tart. A 3 óránál hosszabb folyamatos üzemidők előfordulásának gyakoriságai legmagasabbak Plájon (93,5%), Pozsezszevszkan (87,8%), Alsóvereckén (76,4%), és Husztot kivéve minden állomáson meghaladja az 50%-ot.

A 3.14. táblázat utolsó négy sorában a mérőpontokon az üzemi szélesebesség tartomány alá ($v < 3$) és fölé ($v \geq 25$) eső abszolút és relatív értékeket mutatjuk be. Az üzemi tartomány alá eső értékek legmagasabbak Huszton (99,6%), Ökörmezőn (93,2%) és Alsóhidegpatakon (87,7%). A felszínközeli szélmező ezen energetikai jellemzői alapján kijelenthető, hogy az alföldi és folyóvízgyi állomások szűk környezete a szélenergia felhasználásra alkalmatlanok. A két hegységi állomáson megjelennek az üzemi tartomány feletti korlátozottan hasznosítható szélesebességek is,

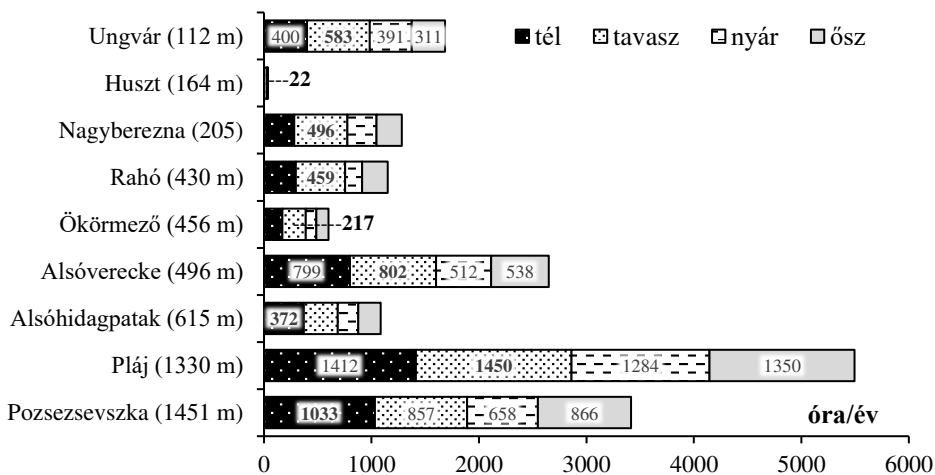
bár ezek aránya a Plájön is csupán 0,2%. A Pláj mérőpont esetében a 3.15. táblázatban ennek havi óraszámait is bemutatjuk. A maximum óraszámok novemberben, decemberben és januárban jelentkeznek.

3.15. táblázat. Az üzemi szélsébségtartomány felett jelentkező szélsébségek havi átlagos időtartamai (óra/hónap) 10 m-es magasságban a Pláj mérőponton

Hónap	Jan	Feb	Márc	Ápr	Máj	Jún	Júl	Aug	Szept	Okt	Nov	Dec
$v \geq 25$ m/s időtartama (óra/év)	6,0	0,6	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	3,6	4,2

Forrás: saját szerkesztés

Az 3.20. ábrán az energetikailag hasznosítható szélsébségek évszakonkénti időtartamát ábrázoltuk (havi bontásban lásd a 18a. függelékben). A legtöbb üzemórasszámmal rendelkező állomásokon, mint Pláj, Pozsezevszka, Alsóverecke és Ungvár esetében az oszlopdiagramjaikon feltüntettük az egyes évszakokra vonatkozó óraszámokat. A többi állomáson, az alacsony értékek miatt csak a legtöbb üzemórával rendelkező évszak óraszámát tüntettük fel.



3.20. ábra. Az energetikailag hasznosítható szélsébségek időtartama (óra/évszak) 10 m-en évszakonként a 2011–2015-ös időszakban (kiemelve: a legnagyobb évszakai érték)

Forrás: saját szerkesztés

Látható, hogy a leghuzamosabb üzemidő az alföldi és a folyó-völgyi állomások többségén (Ungvár, Huszt, Nagyberezna, Rahó, Ökörmező, Alsóverecke), illetve a Plájon is tavasszal jelentkezik. Alsóvereckén és Pozsegyseváskán pedig télen. Bár különösen a téli és a tavaszi üzemórák száma között helyenként (pl. Alsóverecke, Pláj) minimális különbség adódik.

A 3.21. ábrán az állomások havi üzemidőtartamainak relatív értékei alapján felállított éves meneteket láthatjuk, amelyek a fentebb vázoltak szerint alakulnak. Bár az egyes évszakokon belül is jelentkeznek eltérések, hiszen Huszton májusban, Ungváron és Rahón áprilisban, Nagybereznán, Ökörmezőn és Plájon márciusban, Alsóverecskén februárban, Alsóhidegpatakon és Pozsezszevszskán decemberben van a maximum. A Plájon a relatív értékek minden hónapban meghaladják az 50%-ot, az év $\frac{3}{4}$ -ben pedig 60% felett vannak. A havi relatív érték Pozsezszevszskán csak egy esetben (decemberben) haladja meg az 50%-ot. Az ábra színskálája szerint az alföldi és folyóvölgyi állomások szűk környezetében az év nagyobb részében egy 10-25%-os vagy akár ennél kisebb „termelési idővel” lehetne csupán számolni.

	21,5	18,3	26,5	28,9	23,9	20,8	17,7	14,7	18,6	13,6	10,6	15,7
Ungvár (112 m)	21,5	18,3	26,5	28,9	23,9	20,8	17,7	14,7	18,6	13,6	10,6	15,7
Huszt (164 m)	0,2	0,1	0,7	0,9	1,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,0	0,2	0,4
Nagyberezna (205 m)	11,9	14,8	25,2	21,5	20,7	16,2	10,3	10,4	12,7	10,7	8,9	12,3
Rahó (430 m)	15,6	15,6	23,8	23,9	14,8	8,8	6,5	6,3	8,3	10,3	14,1	10,2
Ökörmező (456 m)	8,2	7,1	12,7	8,8	8,1	7,3	3,5	2,8	4,8	4,3	6,2	8,3
Alsóverecke (496 m)	33,4	41,4	41,1	36,8	31,0	26,8	20,7	22,2	23,7	20,2	30,1	36,5
Alsóhidegpatak (615 m)	15,5	17,5	17,5	14,8	10,2	12,4	7,0	6,9	8,2	9,2	11,3	18,7
Pláj (1330 m)	64,5	61,9	69,8	65,8	61,4	63,0	55,7	55,9	62,0	59,0	64,6	69,4
Pozsezszevszka (1451 m)	46,4	38,8	46,5	40,2	29,8	33,7	30,5	25,4	37,1	36,9	45,0	57,5
	Jan	Feb	Márc	Ápr	Máj	Jún	Júl	Aug	Szept	Okt	Nov	Dec

legkisebb havi arány
%
legnagyobb havi arány

<10
10-25
25-50
50<
max

3.21. ábra. Az energetikailag hasznosítható szélességek időtartamának havi relatív értékei (%-ban) 10 m-en

Forrás: saját szerkesztés

A következőkben az energetikailag hasznosítható szélesebségek időtartamait mutatjuk be különböző magasságokban. Amint azt a 3.3. és 3.3.1. alfejezetekben bemutattuk, a Weibull-eloszlás paramétereinek segítségével előállítottuk a napi átlagos szélesebségek gyakorisági eloszlásait különböző magasságokban ($z=20, 40, 60, 80, 100$ m) is. A gyakorisági eloszlással a szélesebségek időtől való függése jellemezhető. Az eloszlások segítségével meghatározhatjuk az egyes kiválasztott szélesebség értékek fölötti eloszlástartomány terjedelmét. Ismerve a szélesebségátlagok vonatkozási idejét megtudhatjuk az egyes szélesebségtartományok időtartamát is. Szélenergetikai szempontból az egyik fontos mutató az energetikailag hasznosítható szélesebség tartomány ($3 \leq v < 25$ m/s) átlagos időtartamának, a szélturbinák üzemóraszámának (OH) ismerete az adott berendezés tengelymagasságában is. Ezt az eloszlások kiválasztott tartományainak kumulált gyakoriságaival határoztuk meg. Ennek eredményeit az említett magasságokra vonatkozóan az 3.16. táblázatban foglaltuk össze.

A 10 m-es szinten az energetikailag hasznosítható szélesebségek időtartama alapján az állomások közötti sorrend a következő volt: Huszt, Ökörmező, Alsóhidegpatak, Nagyberezna, Rahó, Ungvár, Pozsezevszka és Pláj. A felsőbb szinteken a sorrend megváltozik, 60 m-ig egyes állomások helyet cserélnek és a 60, 80, 100 m-es szinten már nincs változás. Egyes mérőpontokon lassúbb vagy gyorsabb növekedés figyelhető meg, illetve vannak olyan mérőpontok, amelyeknek a sorrendben elfoglalt helyük nem változik. A magasság növekedésével együtt Alsóhidegpatakon tapasztalható a hasznosítható sebességtartomány kumulált gyakoriságának a leggyorsabb növekedése. A mérőpont 10 m-en a növekvő sorrendben a harmadik helyen van, 100 m-en pedig az ötödiken. Gyorsabb növekedés figyelhető meg még Ungváron. Nagybereznán, Rahón és Alsóverecskén pedig a kumulált gyakoriságok lassúbb növekedése vehető észre. Huszt, Ökörmező, Pláj és Pozsezevszka a sorrendben nem változtatja helyét. A 60 m-es szinttől a sorrend már nem változik, állandó marad és megegyezik az átlagos szélesebség állomásközi sorrendjével: Huszt, Ökörmező, Nagyberezna, Rahó, Alsóhidegpatak, Alsóverecke, Ungvár, Pozsezevszka és Pláj. Az üzemóraszámok havi értékeit 100 m-es magasságban a 18b. függelék tartalmazza.

3.16. táblázat. Az energetikailag hasznosítható szélesebségek időtartamának egyes paramétereit a z magasságokban, a 2011–2015-ös időszakban

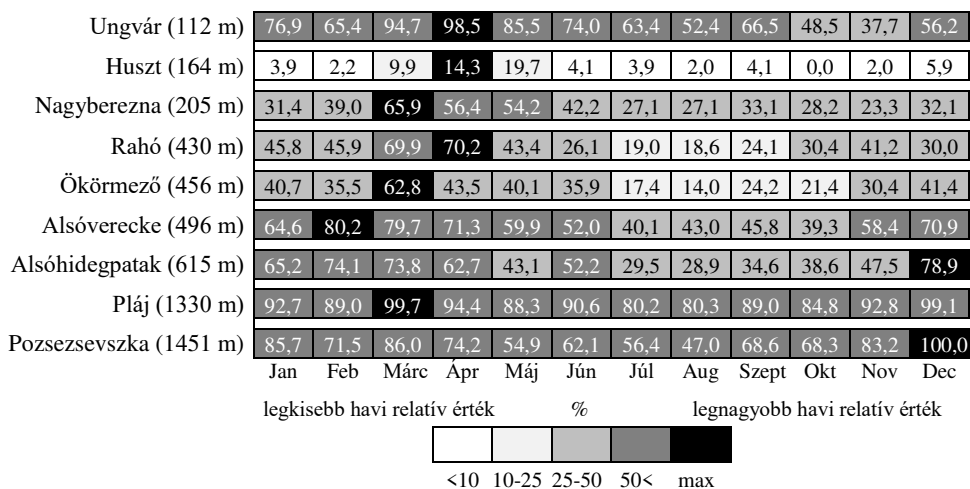
Magasság	Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsevszka (1451 m)
20 m	$3 \leq v < 25$ m/s átlagseb. napok száma (nap/év)	120	0	60	65	27	92	31	276	191
	$OH_{megfigyelt}$ (óra/év)	2880	0	1343	1560	648	2208	744	6624	4584
	$OH_{relatív}$ (%)	32,8	0	15,3	17,9	7,3	25,3	8,5	75,5	52,3
40 m	$3 \leq v < 25$ m/s átlagseb. napok száma (nap/év)	176	1	78	93	58	141	85	302	222
	$OH_{megfigyelt}$ (óra/év)	4224	24	1872	2232	1392	3384	2040	7248	5328
	$OH_{relatív}$ (%)	48,6	0,3	21,4	25,6	15,8	38,7	23,2	82,6	60,8
60 m	$3 \leq v < 25$ m/s átlagseb. napok száma (nap/év)	210	9	103	113	84	173	129	315	240
	$OH_{megfigyelt}$ (óra/év)	5040	216	2472	2712	2016	4152	3096	7560	5760
	$OH_{relatív}$ (%)	57,6	2,5	28,3	30,9	22,9	47,5	35,4	86,1	65,8
80 m	$3 \leq v < 25$ m/s átlagseb. napok száma (nap/év)	233	27	124	128	106	196	164	323	253
	$OH_{megfigyelt}$ (óra/év)	5592	648	2976	3072	2544	4704	3936	7752	6072
	$OH_{relatív}$ (%)	63,9	7,4	33,8	35,1	28,9	53,8	44,9	88,4	69,3
100 m	$3 \leq v < 25$ m/s átlagseb. napok száma (nap/év)	251	52	140	141	124	214	191	329	263
	$OH_{megfigyelt}$ (óra/év)	6024	1248	3360	3384	2976	5136	4584	7896	6312
	$OH_{relatív}$ (%)	68,6	14,2	38,4	38,6	34,0	58,7	52,2	90,0	72,0
minimum		%							maximum	

Forrás: saját szerkesztés

A hasznosítható szélesebségek időtartama minden magasságban Huszt-on van minimumban és Pláj-on a maximumban. A két állomás között 100 m-en ez a mutató 52 nap/év és 329 nap/év között változik. Ez azt jelenti, hogy Pláj mérőpontban egy 100 m tengelymagasságú

és $3 \leq v < 25$ m/s szélsősebesség-teljesítmény görbével jellemezhető szélgenerátor szélklimatológiai szempontból akár az év 90%-ban üzemelhet és termelhet elektromos áramot. Ezt követi Pozsezevszka (72,0%-kal) és Ungvár (68,6%-kal). A két utóbbi között 100 m-en alig 3,5% különbség adódik, viszont a Pozsezevszskán jelentkező erősebb szelek miatt a $v_i \geq 5$ m/s szélsősebességek kumulált gyakoriságában (mintegy 20%-os) és ezzel a szélteljesítményben is jelentős különbség mutatkozik. A többi állomást tekintve még 100 m-en is a hasznos szélórák relatív értékei csupán Alsóvereckén (58,7%) és Alsóhidegpatakon (52,2%) haladják meg átlagosan az év $\frac{1}{2}$ -ét. Máshol átlagosan 40% (146 nap/év) alatt marad.

A 3.22. ábrán, ahogy korábban azt a 10 m-es szint esetében is tettük, az eredményeket havi bontásban is bemutatjuk.



3.22. ábra. Az energetikailag hasznosítható szélsősebességek időtartamának havi relatív értékei (%-ban) 100 m-en

Forrás: saját szerkesztés

A havi relatív értékek éves menetei, Husztot kivéve, ahol egy hónappal korábbra csúszott a maximum, mindenhol megegyeznek a 10 m-en jellemezőkkel. A különbségek természetesen a havi relatív értékek nagyságában adódnak, hiszen 100 m-en a hasznosítható időszakok hosszabbak. Plájón a minimum (augusztus, 80,3%) és a maximum (március, 99,7%) között mindegy 20%-os különbség adódik és novem-

bertől egészen júniusig tartó időszakban átlagosan 90% feletti relatív értékek jelentkeznek. Pozsepszsevszán a decemberi abszolút maximum és az ősz végi, illetve téli magas relatív értékek ellenére nyáron alacsonyabb értékek jelentkeznek, mint az alföldön elhelyezkedő Ungváron. Ungváron, Alsóvereckén és Alsóhidegpatakon ebben a magasságban a hasznosítható szélórák relatív értékei alapján a tavasz lehet a legbiztosabb a szélenergetika számára.

A felhasznált adatsor lehetőségeiből adódóan a szélturbinák éves üzemórászámát napi 8, azaz háromóránkénti tízperces átlagokból határoztuk meg. Szeretnénk megjegyezni, ennek pontosabb becsléséhez nagyobb időbeli felbontású adatsorra lenne szükség. Ellenőrzés képen, összehasonlítottuk az 1 és 3 óránkénti mérésekből meghatározott üzemórászámokat. Erre az Ungvári állomásról származó 2013-tól 2015-ig tartó 1 órás felbontású adatsort használtunk fel. Más állomásról nem állt rendelkezésre ilyen adatsor. Megállapítottuk, hogy az 1 és 3 óránkénti mérésekből számolt teljes éves üzemórászám ($OH_{megfigyelt}$, óra/év) esetében a különbség 1%-on belül van. Azonban a folyamatosan rendelkezésre álló üzemi szélsébségek átlagos időtartamának ($OH_{folyamatos}$, átlag) meghatározásakor a 3 óránkénti méréseket használva közel 40%-os felülbecslést, a leghosszabb folyamatos üzemórászám ($OH_{folyamatos}$, maximum) esetében pedig közel 50%-os felülbecslést kaptunk.

3.4. A fajlagos szélteljesítmény különböző magasságokban

Amint a 2.4.9. alfejezetben leírtuk a Weibull-eloszlás k és c paraméterének ismeretében a gamma-függvény ($\Gamma(x)$) segítségével a mérőpontban, az adott időszakra vonatkozó fajlagos szélteljesítményt is definiálhatjuk (lásd: (2.44) összefüggés). A Weibull-eloszlás tulajdonságai szerint a fajlagos szélteljesítmény megadható különböző magasságokban, a Weibull-paraméterek által előállított relatív gyakorisági eloszlások segítségével (lásd: (2.45) összefüggés). Minden állomásra meghatároztuk a rendelkezésre álló fajlagos szélteljesítményt (P_f), amely a mérőhely és kisebb környezete hasznosítható szélenergiájának felmérésénél egy alapvetően fontos paraméter. Először, amint a többi szélenergetikai paraméter jellemzésénél is tettük, a fajlagos szélteljesítményt a 10 m-es szinten 3 órás mérések és a napi átlagok relatív gyakorisági eloszlásaiból is meghatároztuk (3.17. táblázat). A további $z=20, 40, 60$,

80, 100 m-re a napi átlagokat használtuk, hiszen a 3.2. alfejezetben foglaltak szerint, ezek gyakorisági eloszlásaira illeszthető a Weibull-eloszlás. A 3 órás mérések felhasználásával kapott fajlagos szélteljesítmények magasabbak, mivel így nagyobb az adatsűrűség és a napi átlagok elfedik a rövid ideig tartó kiugró értékeket. Az összehasonlítás végett csupán a napi átlagok alapján kapott eredményeket elemezzük.

Az állomások szélteljesítmény értékeiből felállított sorrendet látva a két szélső pozíció az éves viszonylatban már a megszokott: Huszton van a minimum ($0,5 \text{ W/m}^2$) és Plájon a maximum ($169,0 \text{ W/m}^2$). Az átlagos szélesebesség, a szeles napok száma, az energetikailag hasznosítható szélesebesség tartományok relatív gyakoriságai, stb. és azok folyamatossága kihat a rendelkezésre álló szélenergia mennyiségére. A felsorolt néhány energetikai paraméter területi kontrasztossága a fajlagos szélteljesítmény mezőben hatványozottan érvényesül. Ez nem csupán a domborzati viszonyokból adódhat, hanem abból, hogy a szélteljesítmény a szélesebesség harmadik hatványával arányos, ezért a nagy átlagos szélesebességű pontokon jóval nagyobb szélteljesítmény is jelentkezik.

3.17. táblázat. Az éves és az évszakos fajlagos szélteljesítmény (W/m^2)

10 m-en a 2011–2015 közötti időszakban

(kiemelve: **első**, **második** és **harmadik** legnagyobb és *legkisebb* érték)

Adatsűrűség	Időszak	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
3 órás	éves	15,9	<u>0,7</u>	8,4	17,1	5,4	12,9	5,6	269,3	129,7
	tél	12,9	<u>0,6</u>	6,0	21,1	7,7	18,7	6,5	379,1	248,6
	tavaszi	27,2	<u>1,4</u>	15,8	24,1	8,4	17,3	6,1	287,3	107,6
	nyár	13,2	<u>0,5</u>	6,7	8,8	2,6	6,4	4,6	147,9	38,7
	ősz	10,2	<u>0,4</u>	5,0	14,3	3,0	9,5	5,4	267,8	127,7
napi átlag	éves	9,6	<u>0,5</u>	4,5	12,7	2,8	9,8	3,5	169,0	106,7
	tél	9,9	<u>0,4</u>	4,6	24,5	4,2	16,8	5,7	237,5	213,5
	tavaszi	14,8	<u>1,2</u>	8,3	14,6	4,1	11,6	3,6	180,3	78,5
	nyár	6,9	<u>0,1</u>	2,8	3,1	1,2	4,0	2,0	83,9	20,9
	ősz	6,6	<u>0,3</u>	2,4	8,5	1,8	6,8	2,7	174,3	114,0

Forrás: saját szerkesztés

Éves szinten a második legnagyobb érték Pozsezevszán ($106,7 \text{ W/m}^2$) van. A 10 m-es szinten a maximumok minden évszakban Plájon következnek be, majd a 20 m-es szinttől kezdve (3.18. táblázat) a téli maximum áthelyeződik Pozsezeszkára. Éves szinten a harmadik legmagasabb érték 10 m-en Rahóra ($12,7 \text{ W/m}^2$) esik, a további magasságokban pedig Ungvárra. Évszaks bontásban 10 m-en a harmadik legnagyobb szélteljesítmény érték télen és ősszel Rahón, míg tavasszal és nyáron Ungváron jelentkezik. A 20 m-től magasabb tartományban Rahó csupán a téli harmadik legmagasabb értékekkel rendelkezik. Pozsezsvszka és Rahó hasonló széljárása tehát, főleg az őszi és a téli évszakban, a fajlagos szélteljesítmény évi járásában is megmutatkozik.

Kárpátalján a fajlagos szélteljesítmény 100 m-en $9,3 \text{ W/m}^2$ (Huszt) és $506,8 \text{ W/m}^2$ (Pláj) között változik, ami igen nagy különbségnek mondható. Az alföld és a folyóvölgyek állomásaira a jellemző átlagos mennyiségek még 100 m-en is csupán $30\text{-}70 \text{ W/m}^2$ körül vannak, melyek viszonylag nagyon alacsonyak. A Radics (2004) által 10 m-es felszín feletti magasságra modellezett rendelkezésre álló szélteljesítmény-mezőben (lásd: 10. függelék) Északnyugat-Magyarországon, a Kisalföld területén már ebben a magasságban is $60\text{-}80 \text{ W/m}^2$ értékek jelentkeznek. Az állomások közül a fajlagos szélteljesítmény alapján ki kell emelnünk Ungvárt (100 m-en $76,0 \text{ W/m}^2$), Pozsezevszrát ($368,7 \text{ W/m}^2$) és Plájt ($506,8 \text{ W/m}^2$), ahol ebben a magasságban, kárpátaljai viszonylatban, a legkedvezőbbek az energiahasznosítás feltételei.

Ha megvizsgáljuk a fajlagos szélteljesítmény magassággal való változását az egyes állomás csoportok között, akkor megállapíthatjuk, hogy a viszonylag nyitott környezettel rendelkező alföldi Ungváron a felszíntől emelkedve 10 m-enként kb. 0,7-szeresére, a szűk völgyekben található állomásokon szintén 0,7-szeresére, míg a hegyvidéki Plájon és Pozsezevszán 0,6-szorosára növekszik a fajlagos szélteljesítmény. Ez azt jelenti, hogy az alföldön kb. $7\text{-}8 \text{ W/m}^2/10 \text{ m-es}$, a szűk völgyekben $3\text{-}5 \text{ W/m}^2/10 \text{ m-es}$, a hegygerinceken $30\text{-}35 \text{ W/m}^2/10 \text{ m-es}$ növekedés jelentkezik a fajlagos szélteljesítményben.

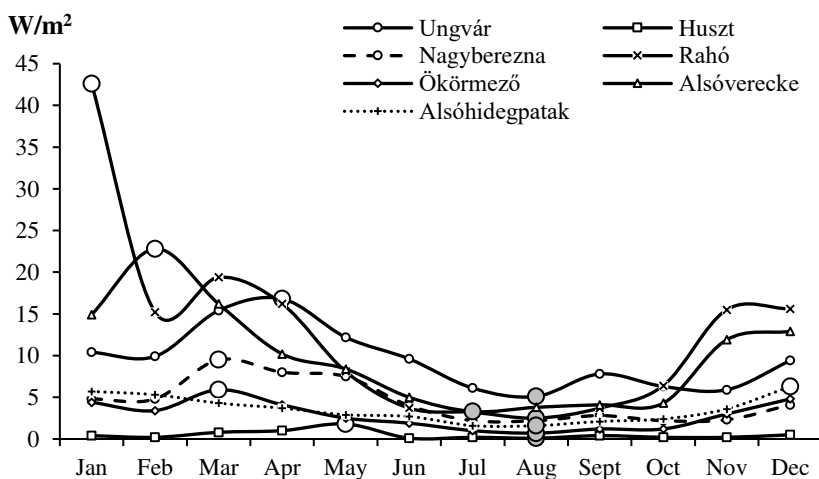
3.18. táblázat. Az éves és az évszakos fajlagos szélteljesítmény (W/m^2) a z magasságokban a 2011–2015 közötti időszakban (kiemelve: **első**, **második** és **harmadik** legnagyobb és **legkisebb** érték)

Magasság	Időszak	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláji (1330 m)	Pozsegszeka (1451 m)
20 m	éves	19,8	<u>1,7</u>	8,1	19,1	5,2	16,5	6,5	225,6	155,7
	tél	20,2	<u>1,3</u>	8,1	38,2	7,8	28,3	10,7	306,9	311,4
	tavaszi	30,1	<u>4,1</u>	14,9	22,7	7,6	19,5	6,7	240,7	114,5
	nyár	14,1	<u>0,4</u>	5,0	4,9	2,2	6,8	3,7	112,0	30,5
	ősz	13,5	<u>1,0</u>	4,3	13,3	3,3	11,4	5,0	232,6	166,3
40 m	éves	36,3	<u>3,3</u>	14,4	30,8	9,6	27,8	12,1	314,0	222,7
	tél	37,7	<u>2,5</u>	14,5	59,6	14,3	47,6	19,8	441,1	445,4
	tavaszi	56,2	<u>7,9</u>	26,5	35,5	14,0	32,8	12,4	335,0	163,8
	nyár	26,2	<u>0,8</u>	8,9	7,6	4,1	11,4	6,9	155,9	43,7
	ősz	25,2	<u>1,9</u>	7,7	20,7	6,0	19,1	9,4	323,8	237,8
60 m	éves	50,4	<u>5,5</u>	20,2	40,0	13,7	37,6	17,4	380,9	279,2
	tél	52,3	<u>4,1</u>	20,4	77,3	20,5	64,5	28,5	535,3	558,4
	tavaszi	77,9	<u>13,2</u>	37,2	46,0	20,1	44,5	17,9	406,4	205,3
	nyár	36,4	<u>1,3</u>	12,4	9,9	5,8	15,4	9,9	189,2	54,8
	ősz	34,9	<u>3,2</u>	10,7	26,9	8,6	25,9	13,4	392,9	298,2
80 m	éves	62,1	<u>7,0</u>	25,7	48,1	17,7	46,7	22,5	455,7	326,2
	tél	64,5	<u>5,3</u>	26,0	92,9	26,4	80,1	36,8	640,2	652,5
	tavaszi	96,1	<u>16,9</u>	47,4	55,4	25,9	55,2	23,1	486,1	239,9
	nyár	44,9	<u>1,7</u>	15,8	11,9	7,5	19,2	12,8	226,3	64,0
	ősz	43,0	<u>4,1</u>	13,7	32,4	11,1	32,2	17,4	469,9	348,4
100 m	éves	76,0	<u>9,3</u>	31,0	55,5	21,6	55,2	27,5	506,8	368,7
	tél	78,8	<u>7,1</u>	31,3	107,3	32,1	94,7	45,0	712,1	737,5
	tavaszi	117,5	<u>22,5</u>	57,1	63,9	31,5	65,3	28,2	540,7	271,2
	nyár	54,9	<u>2,3</u>	19,1	13,7	9,1	22,7	15,7	251,7	72,3
	ősz	52,6	<u>5,4</u>	16,5	37,3	13,5	38,1	21,2	522,7	393,8

Forrás: saját szerkesztés

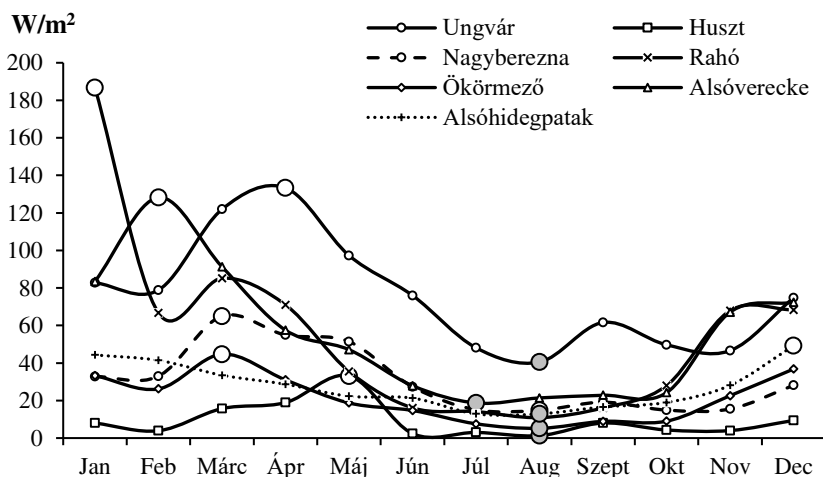
A továbbiakban a fajlagos szélteljesítmény éves menetét havi bontásban is bemutatjuk. Külön ábrázoltuk a 10 m-es (3.23. és 3.24. ábra) és 100 m-es (3.25. és 3.26. ábra) szinteken az adott hónap egy napjára eső átlagos fajlagos szélteljesítményt, illetve az egyes állomások értékeinek olykor eltérő nagyságrendje miatt az alföldi és a folyóvölgyi állomásokat és a két hegységi állomás értékeit is külön diagrammokon szemléltetjük.

Az alföldi és folyóvölgyi állomásokon a 10 és 100 m-es magasságban egyformán kirajzolódnak a téli és a tavaszi hónapokra: január (Rahó, $42,6 \text{ W/m}^2$ és $186,8 \text{ W/m}^2$), február (Alsóverecke, $22,8 \text{ W/m}^2$ és $128,2 \text{ W/m}^2$), márciusra (Nagyberezna, $9,5 \text{ W/m}^2$ és $65,0 \text{ W/m}^2$; Ökörmező, $5,9 \text{ W/m}^2$ és $44,7 \text{ W/m}^2$), áprilisra (Ungvár $16,8 \text{ W/m}^2$ és $133,3 \text{ W/m}^2$), májusra (Huszt, $1,8 \text{ W/m}^2$ és $33,1 \text{ W/m}^2$) és decemberre (Alsóhidegpatak, $6,3 \text{ W/m}^2$ és $49,2 \text{ W/m}^2$) eső maximumok. A minimumok mind a 10 és 100 m-es szinten a nyár végére: júliusra (Alsóverecke) és augusztusra (növekvő sorrendben Huszt, Ökörmező, Alsóhidegpatak, Nagyberézna, Rahó, Alsóverecke és Ungvár) esik. Látható, hogy Rahó esetében a téli maximum első sorban a januári magas értéknek tudható be.



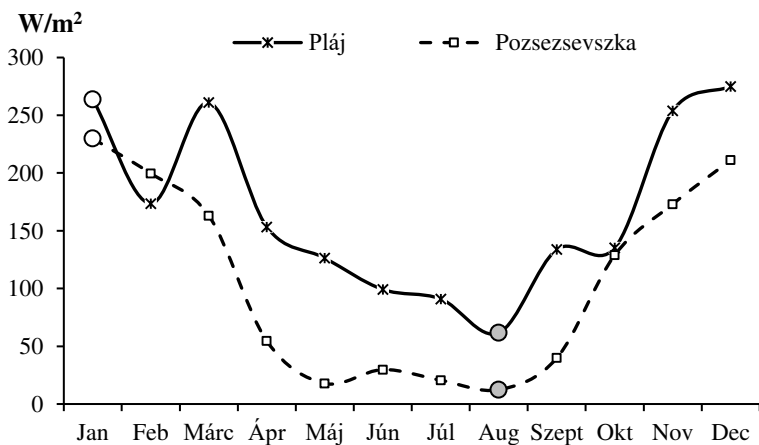
3.23. ábra. A havi átlagos fajlagos szélteljesítmény (W/m^2) az alföldi és a folyóvölgyi állomásokon 10 m-es magasságban, 2011–2015 között (fehér kör jelölő – maximum, szürke kör jelölő – minimum érték)

Forrás: saját szerkesztés



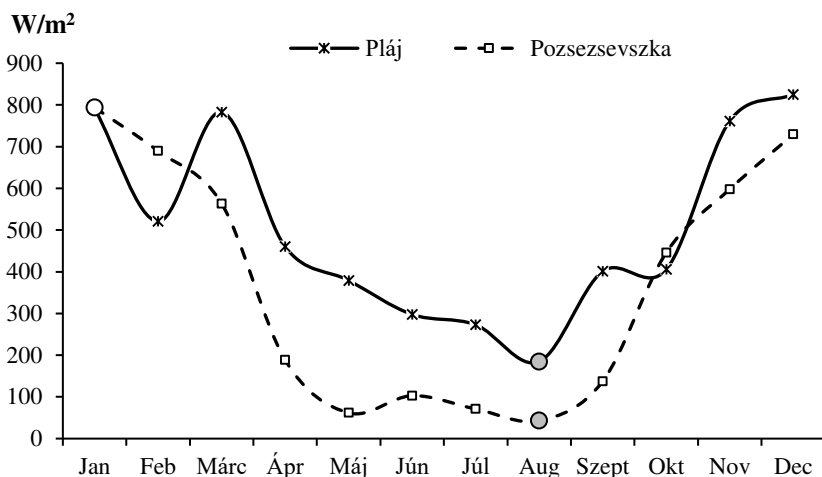
3.24. ábra. A havi átlagos fajlagos széltejesítmény (W/m²) az alföldi és a folyóvölgyi állomásokon 100 m-es magasságban, 2011–2015 között (fehér kör jelölő – maximum, szürke kör jelölő – minimum érték)

Forrás: saját szerkesztés



3.25. ábra. A havi átlagos fajlagos széltejesítmény (W/m²) a hegységi állomásokon 10 m-es magasságban, 2011–2015 között (fehér kör jelölő – maximum, szürke kör jelölő – minimum érték)

Forrás: saját szerkesztés



3.26. ábra. A havi átlagos fajlagos szélteljesítmény (W/m^2) a hegységi állomásokon 100 m-es magasságban, 2011–2015 között (fehér kör jelölő – maximum, szürke kör jelölő – minimum érték)

Forrás: saját szerkesztés

A hegységi állomásokon a maximumok januárra (Pozsezevszka, $229,8 \text{ W/m}^2$ és $793,6 \text{ W/m}^2$; Pláj, $263,8 \text{ W/m}^2$ és $791,1 \text{ W/m}^2$), a minimumok pedig augusztusra (Pozsezevszka, $20,6$ és $43,0 \text{ W/m}^2$; Pláj, $91,0$ és $187,4 \text{ W/m}^2$) esnek. A nyári hónapokban Pozsezevszka az alföldi és folyóvölgyi állomásokra jellemző alacsony értékek jelentkeznek, míg ősszel a szélesebbességgel együtt a fajlagos szélteljesítmény is a tél közepéig folyamatosan növekszik. Belátható tehát, hogy a hegységi részen, nem egyértelmű minden környezetéből kiemagasló hegygerinc vagy csúcs esetében az a megállapítás, hogy ezeken a területeken egész évben nagyobb a rendelkezésre álló szélteljesítmény, mint pl. az alföldön. A mezoléptékű bárikus mezők kölcsönhatásaiból adódóan az egyes évszakok között a hegységi részen számottevő különbségek adódhatnak, amit a szélenergia felhasználás tervezésénél fontos figyelembe venni.

A 19. függelékben az összes állomásra közöljük a 10, 20, 40, 60, 80 és 100 m-es magasságokra érvényes fajlagos szélteljesítményeket havi bontásban.

A 20. függelékben pedig a teljes időszakra és évszakosan is összesítettük a 10 és 100 m-es magasságra vonatkozóan a legtöbb ener-

giát hordozó szélesebbesség tartományt ($E_{max}\Delta x$), az adott tartományra eső fajlagos szélteljesítmény relatív értékét (E_I) és az ebbe a tartományba eső szélesebbességek éven belüli átlagos időtartamát ($T_{E_{max}\Delta x}$).

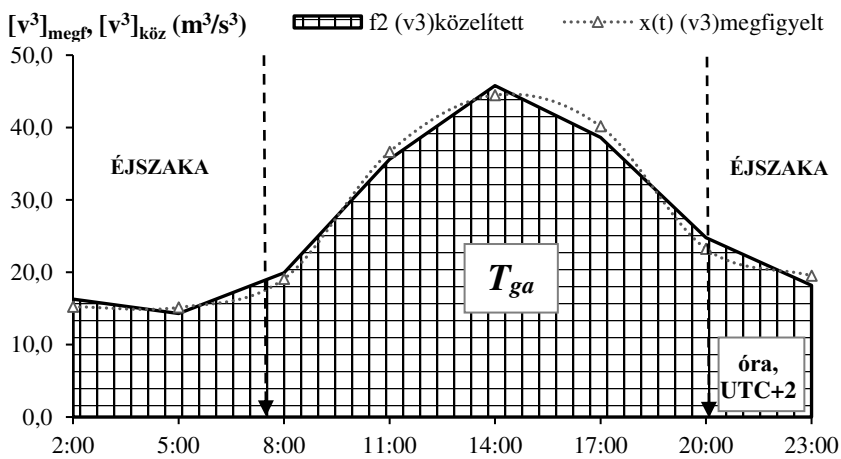
3.5. A havi átlagos fajlagos szélteljesítmény becslése közelítő függvény alapján

A különböző sebességgel áramló levegő mozgási energiájánál fogva munkavégzésre fogható. Amint a (2.37) képletből láttuk, ez a munkavégző képesség azonban nem közvetlenül a kinetikus energiával, vagyis az áramló légtömegek sebességének négyzetével, hanem a sebesség harmadik hatványával arányos (Troen – Petersen 1989). A meteorológiai széladatfeldolgozás esetén az átlagos szélesebbességet egyszerű átlagolással számítják. Helytelen azonban energetikai számításokhoz ezt a módszert alkalmazni, mert így alábecsüljük a szélben rejlő energiát. Ezért az adatfeldolgozásnál a szélesebbesség-köbök átlagát kell kiszámítani és ennek alapján meghatározni a fajlagos szélteljesítményt. A szélesebbesség-köbök átlaga a következő képlettel határozható meg (Patay 2003):

$$\overline{v^3} = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^3}{n} \quad (3.2)$$

A 2.4.10. alfejezetben bemutattuk, hogyan határozható meg egy adott időszak egy napjára átlagosan jutó fajlagos szélteljesítmény közelítő függvény felhasználásával. Az időszak egy napjára átlagosan jutó fajlagos szélteljesítményt (P_{fmd}) a következőképpen (3.27. ábra) definiáljuk (Tar 2008a, Tar – Szegedi 2011): a szélesebbesség köbök mérési időpontonkénti (3 órás terminus idő) átlagának napi menetét közelítő függvény görbe alatti területe (T_{ga}) szorozva a levegő sűrűségének ($\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$, 15 °C-on és 760 mm légnyomáson) felével ($\rho/2$).

A közelítő függvénygörbék meghatározását követően elvégeztük azok illeszkedésvizsgálatát. Az említett alfejezetben bemutattunk egy mérőszámot (s_{0m}), a függvény görbével való közelítés „jószágának” mérésére, amely a közelítés relatív mértékét definiálja és a meghatározásához az ún. reziduális szórásnégyzetet használjuk.



3.27. ábra. A szélsébség köb (m³/s³) átlagok számolt és a közelítő függvénynel előállított értékeinek napi menete
Forrás: saját szerkesztés

A következőkben előbb az (2.54) összefüggéssel meghatározott mérőszám legfontosabb statisztikai jellemzőit és térbeli változását elemezzük (3.19. táblázat). A számításokat az egész ötéves (2011–2015) adatsor egészére (éves), évszakosan, valamint a hónapokra is elvégeztük.

3.19. táblázat. A közelítés jóságát megadó paraméter (s_{02}) egyes statisztikai jellemzői

Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezszevszka (1451 m)
átlag	0,93	0,87	0,93	0,90	0,77	0,88	0,84	0,82	0,76
szórás	0,05	0,14	0,05	0,10	0,20	0,08	0,15	0,21	0,20
var. e.h.	0,06	0,16	0,06	0,11	0,25	0,10	0,18	0,26	0,26
min	0,80	0,59	0,80	0,68	0,22	0,69	0,56	0,16	0,28
max	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,97
>átlag (%)	64,7	58,8	64,7	64,7	23,5	41,2	41,2	35,3	11,8

Forrás: saját szerkesztés

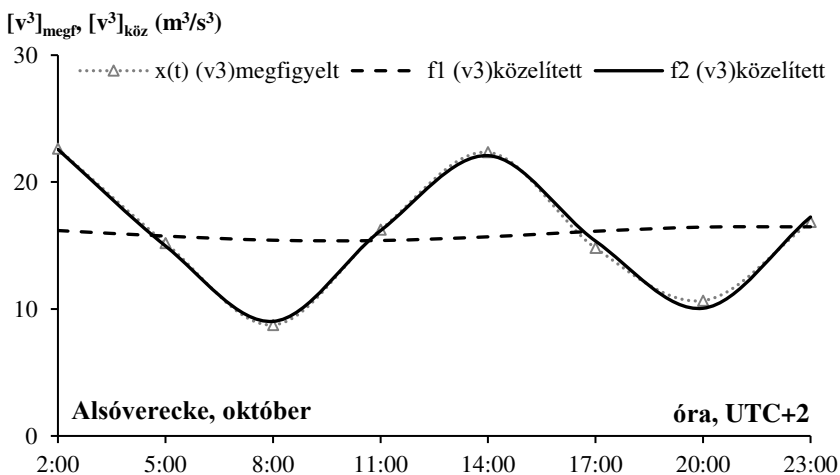
Az átlagértékekből látható, hogy a közelítés legjobban Ungváron (0,93) és Nagybereznán (0,93) sikerült, legkevésbé pedig Ökörmezőn (0,77) és Pozsezevszán (0,73). A változékonyságot bemutató variációs együttható az átlag sorrendjével fordítottnan változik az állomások között. A minimumok szintén nagyjából az átlag változását követik. A maximumok között viszont legfeljebb 0,02 különbség adódik.

A 3.19. táblázat utolsó sorában az átlagnál nagyobb paraméter értékek relatív gyakoriságát (%-ban) közöljük. Legkevésbé (11,8%) ilyen érték Pozsezevszán, a legtöbb (64,7%) pedig Ungváron, Nagybereznán és Rahón fordul elő.

Magyarországi mérőpontok esetében történtek arra vonatkozó vizsgálatok, hogy a közelítés jósága mennyire függ az adott időszak szélsőségségétől (Tar 2008a, Tar – Szegedi 2011). Ezt az s_{02} paraméter maximális értékeinek és a havi átlagos szélsőségek kapcsolatának vizsgálatával, azaz korrelációs számítással végezhető el. Az eredmények azt mutatják, hogy az alföldi állomásokon 0,05 szignifikancia szinten a két változó között sztochasztikus kapcsolat áll fenn.

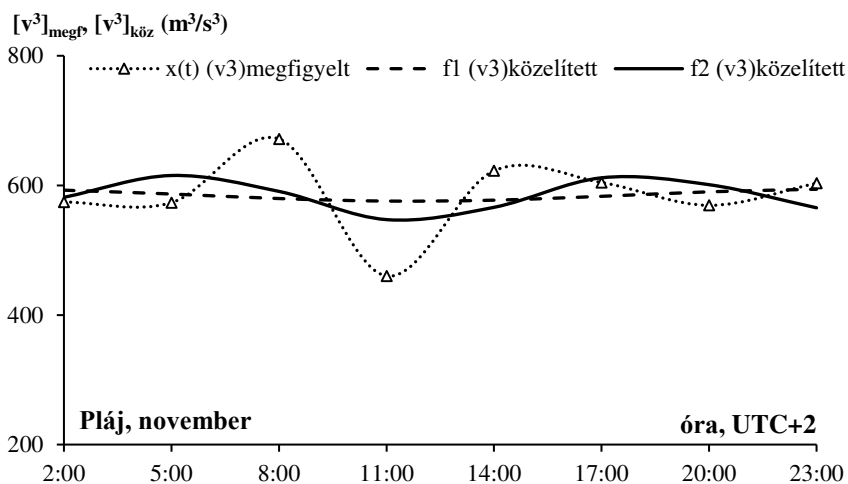
A kárpátaljai mérőpontok közül csak Ungváron látszott legjobban követni a két változó a tavaszi, április körüli maximumot és az őszi minimumot, azonban a korrelációs együttható értéke csupán $r=0,15$ volt, ami alacsonyabb az $n \approx 60$ elemszámhoz ($5 \cdot 12$ hónap) tartozó $|r_{0,05}| \approx 0,24$ kritikus értéktől, így itt sem bizonyítható a reális kapcsolat. A kárpátaljai állomások esetében tehát az a rend, hogy az s_{02} extrém értékei a legnagyobb átlagszélsőségekű hónapokban következnek be általánosan nem érvényesül.

A 3.28. és 3.29. ábrákon bemutatjuk a periodikus függvény „legjobb” és „legrosszabb” illeszkedéseit a szélsőségek napi menetére, ami Alsóverecke ($s_{02}=0,99$) és Pláj ($s_{02}=0,16$) esetében történt meg.



3.28. ábra. A periodikus függvény „legjobb” illeszkedése a szélsébséghöbök napi menetére

Forrás: saját szerkesztés



3.29. ábra. A periodikus függvény „legrosszabb” illeszkedése a szélsébséghöbök napi menetére

Forrás: saját szerkesztés

A harmonikus analízisben az amplitúdók várható értékét expektanciának (E) nevezik, amelynek meghatározása:

$$E = s_n \sqrt{\frac{\pi}{N}} \quad (3.3)$$

Annak eldöntésére, hogy az m . hullám $\frac{N}{m}$ periódusa véletlenszerű vagy reális, az amplitúdó (A_m) és az expektancia (E) arányát használják. Ha az A_m/E elég nagy, akkor kicsi annak valószínűsége (p), hogy a periódus az adatok véletlenszerű elrendeződéséből ered, így statisztikailag reálisnak tekinthető. Általában az $A_m/E > 2$ érték már elfogadható ($p=0,05$), de az időjárási adatok idősorának periódus elemzésénél az $A_m/E > 1,5$ esetben ($p=0,17$) is reálisnak tekintik az adott hullámot (Koppány 1978). A 3.20. táblázatban összefoglaltuk az egész napos és a félnapos hullám realitásának arányait a két szignifikancia szinten.

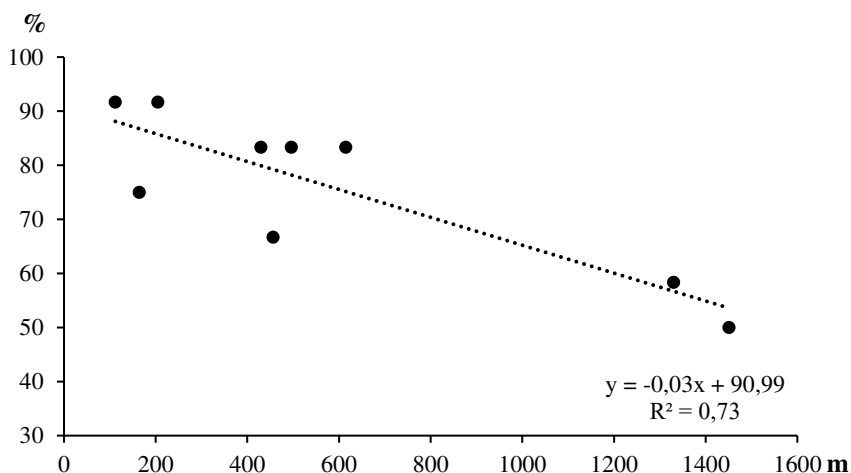
3.20. táblázat. Az egynapos és a félnapos hullám realitásának %-os arányai 0,05 ($A_k/E > 2$) és 0,17 ($A_k/E > 1,5$) szignifikancia szinteken

Hullám	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverecke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
$A_1/E > 2$	58,3	25,0	50,0	33,3	25,0	16,7	41,7	33,3	16,7
$A_1/E > 1,5$	91,7	75,0	91,7	83,3	66,7	83,3	83,3	58,3	50,0
$A_2/E > 2$	0,0	3,3	0,0	3,3	3,3	13,3	0,0	23,3	10,0
$A_2/E > 1,5$	11,7	13,3	10,0	31,7	15,0	28,3	6,7	26,7	36,7

Forrás: saját szerkesztés

Látható, hogy az egész napos hullám 0,05 szignifikancia szinten az esetek 16,7%-58,3%-ában (Pozsezevszka és Ungvár), 0,17 szignifikancia szinten pedig az esetek 50,0%-91,7%-ában (Pozsezevszka és Nagyberezna, Ungvár) nem tekinthető véletlenszerűnek. Megfigyelhető, hogy az egynapos hullám realitásának %-os arányai a mérőpontok tengerszint feletti magasságával együtt csökken. A két változó között negatív lineáris korreláció tapasztalható (3.30. ábra).

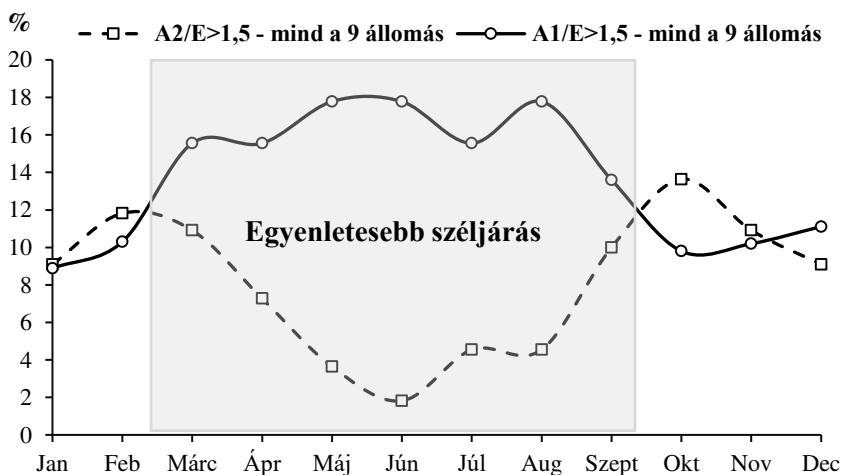
A korrelációs együttható értéke $-0,86$ volt, annak megbízhatóságát t -próbával és a varianciaanalízis során alkalmazott F -próbával is ellenőriztük, és 5%-os megbízhatósági szinten szignifikáns összefüggés állítható.



3.30. ábra. Az egynapos periódusú hullám ($A_1/E > 1,5$) realizálásának %-os aránya és a tengerszint feletti magasság (m) közötti összefüggés

Forrás: saját szerkesztés

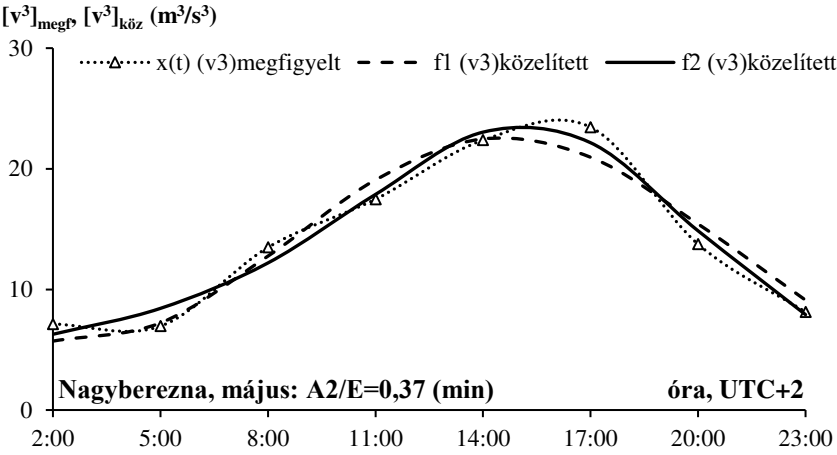
A félnapos periódusú hullám véletlenszerűségének intervallumai 0,05 szignifikancia szinten 0,0-23,3%, a 0,17 szinten 6,7-36,7% (Alsóhidegpatak és Pozsezevszka). A táblázatból látható, hogy Ungváron, Nagybereznán és Alsóhidegpatakon a kétnapos periódusú hullám realizációja a 0,05-ös szignifikancia szinten 0%, teljesen véletlenszerű, a 0,17 szinten pedig a legalacsonyabbak, azaz az év nagy részében az egynapos hullám dominál, amely realizációja természetesen itt a legmagasabb. A két hegységi mérőponton, Plájon és Pozsezevszskán és a folyóvölgyi Alsóverecskén találhatjuk félnapos hullám realizációjának maximumait. Összesítettük a 0,17 szignifikancia szinthez tartozó nem véletlenszerű egynapos ($A_1/E > 1,5$) és félnapos periódusú hullámok ($A_2/E > 1,5$) havonkénti megoszlását. A 3.31. ábrán a feltétel teljesülésének %-os gyakoriságát ábrázoltuk az összes állomáson együtt.



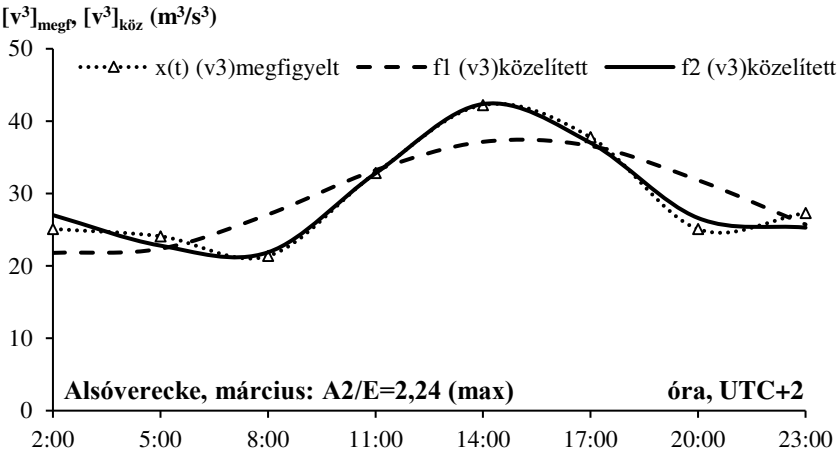
3.31. ábra. Az egynapos ($A_1/E > 1,5$) és a félnapos periódusú hullám ($A_2/E > 1,5$) realitásának havi gyakoriságai (%-ban), $p=0,17$ szignifikancia szinten mind a 9 állomáson

Forrás: saját szerkesztés

A villamos-energia termelés szempontjából azok a napok előnyösek, amelyeken a szélesebbesség köbök napi menete egyszerű, egy délkörűli maximummal rendelkezik, azaz egynapos hullámmal közelíthető. A 9 állomást együtt kezelve megállapítható, hogy az egynapos hullám realitása főként a tavasz elejétől az ősz elejéig érvényesül legjobban, őszen és télen a véletlenszerűsége növekszik. A szélesebbesség köbök 3 órás átlagára havonként illesztett trigonometrikus polinom félnapos periódusú hulláma tehát leginkább késő tavasszal és nyáron mutat véletlenszerűséget $p=0,17$ szignifikancia szinten, télen, kora tavasszal és őszen realitásának gyakorisága megnövekszik. Az utóbb felsorolt időszakban tehát számítani kell a szélerő napon belüli markáns változásaira: két minimális és két maximális értékre. Tavasszal és nyáron tehát elég nagy biztonsággal számíthatunk arra, hogy a szélerő napon belüli változása a rendszerirányítás számára kedvezőbb módon viselkedik. A 3.32. és 3.33. ábrákon ábrázoltuk a szélesebbesség köbök 3 órás átlagainak közelítését egy és két hullámmal igen gyenge és igen erős 2. hullám (félnapos periódusú) esetén.



3.32. ábra. A szélesebbesség köbök óraátlagainak közelítése napi egy- és kétperiódusú hullámmal igen gyenge 2. hullám (félnapos periódusú) esetén
Forrás: saját szerkesztés



3.33. ábra. A szélesebbesség köbök óraátlagainak közelítése napi egy- és kétperiódusú hullámmal igen erős 2. hullám (félnapos periódusú) esetén
Forrás: saját szerkesztés

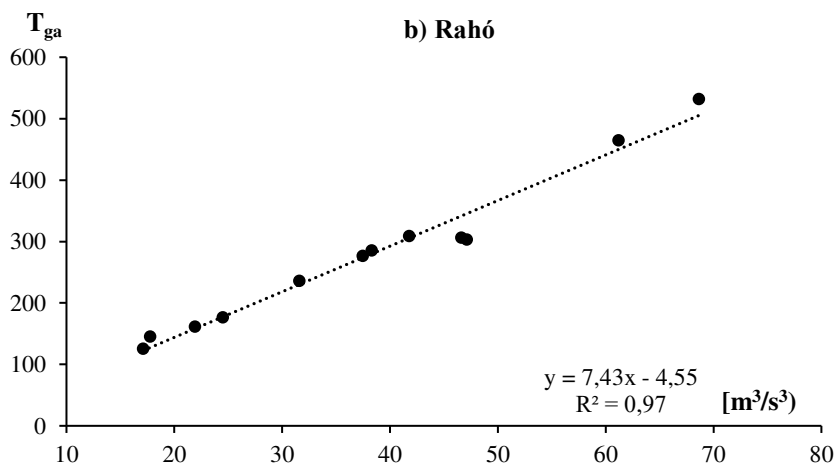
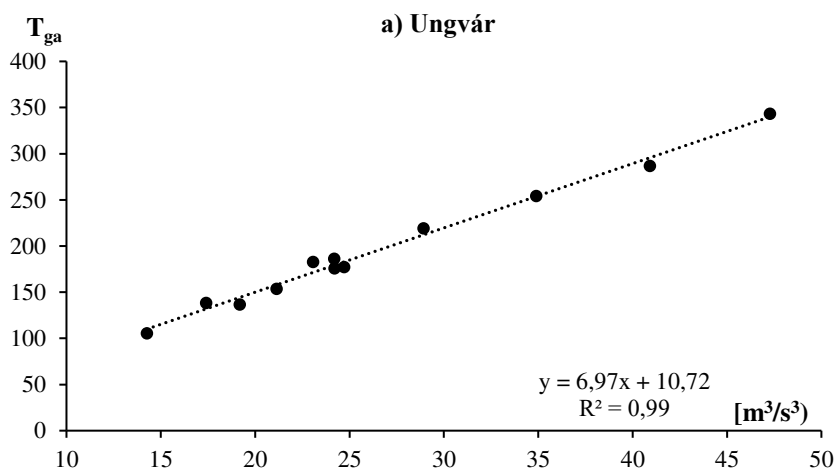
Az egyes időszakok (év, évszak, hónap) napi átlagos fajlagos szél-teljesítményeinek a közelítő függvény görbe alatti területével becsült értékei alapján a legnagyobb szélenergiával rendelkező hely az egész évre vonatkozóan és évszakosan mindig Pláj, a második Pozsezevszka, a harmadik pedig Rahó, bár a nyári és koraőszi hónapokban Ungvár veszi át az utóbbi helyét. Az összes állomásra vonatkozó illesztés a 21. függelékben található. Az egyes időszakok (év, évszak, hónap) napi átlagos fajlagos szél-teljesítményeit a 3.21. táblázatban mutatjuk be.

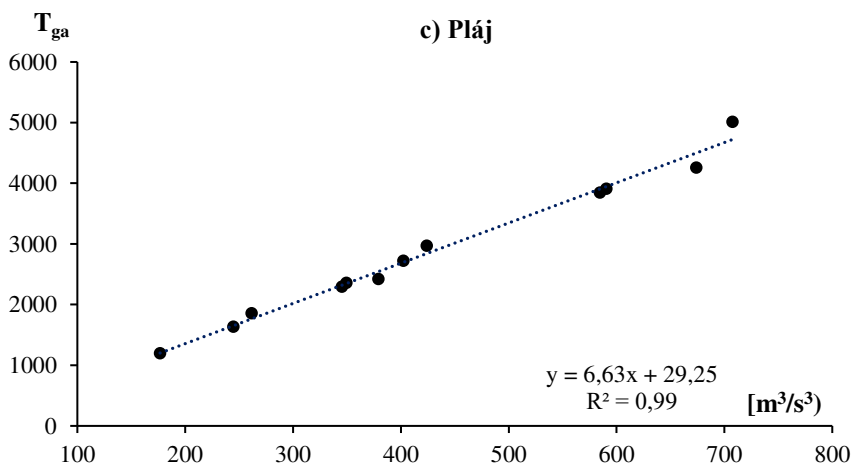
3.21. táblázat. Az egyes időszakok (év, évszak, hónap) napi átlagos fajlagos szél-teljesítményeinek a közelítő függvény görbe alatti területével becsült értékei (W/m^2) a 2011–2015-ös időszakra (10 m magasságban) (kiemelve: **első**, **második** és **harmadik** legnagyobb és *legkisebb* érték)

Időszak	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
éves	120,0	<u>8,2</u>	86,7	170,7	60,4	133,6	58,9	1770,6	960,6
tél	103,9	<u>7,1</u>	60,5	186,2	64,1	179,3	71,4	2578,2	1759,2
tavaszi	180,2	<u>13,0</u>	156,8	266,4	108,2	181,1	60,9	1849,7	825,5
nyár	107,2	<u>7,1</u>	72,7	92,1	31,9	72,0	41,0	956,8	312,3
ősz	87,7	<u>5,8</u>	54,7	137,6	37,8	103,6	62,8	1730,7	980,5
Jan	109,5	<u>10,9</u>	62,9	198,9	44,1	169,3	66,5	2789,9	1588,3
Feb	108,5	<u>4,8</u>	66,1	187,4	67,0	237,3	68,1	1816,9	1614,7
Már	175,5	<u>11,3</u>	185,1	325,7	192,5	220,8	74,2	2392,5	1280,0
Ápr	210,3	<u>14,4</u>	150,6	284,4	75,0	173,2	67,4	1666,2	888,9
Máj	155,7	<u>13,2</u>	134,5	188,9	55,8	148,8	41,2	1481,6	304,5
Jún	134,1	<u>7,2</u>	81,7	107,8	39,3	82,8	44,4	1001,6	410,2
Júl	104,9	<u>7,8</u>	72,3	92,5	28,3	64,6	37,5	1138,4	341,2
Aug	87,9	<u>6,2</u>	64,4	76,6	28,1	68,8	41,2	731,2	189,3
Szep	114,1	<u>8,3</u>	71,4	98,5	44,7	74,7	85,7	1402,9	601,9
Okt	84,6	<u>4,7</u>	52,9	144,4	27,4	81,5	47,8	1442,4	1149,5
Nov	64,6	<u>4,4</u>	39,9	169,2	41,8	154,9	55,7	2353,7	1179,7
Dec	94,1	<u>5,9</u>	53,5	174,5	79,9	137,1	79,2	3069,5	2046,4

Forrás: saját szerkesztés

A 3.34. ábrákon bemutatjuk a havi átlagos fajlagos szélteljesítménnyel arányos görbe alatti terület (T_{ga}) és a szélsősebesség köbök havi átlaga (v_m) közötti lineáris korreláció és regresszió vizsgálatának eredményét 3 különböző elhelyezkedésű állomás: a) Ungvár (alföld), b) Rahó (mély folyóvölgy) és a c) Pláj (nyitott hegygerinc) esetében. Mindhárom esetben a két változó között 0,05 szignifikancia szinten reális összefüggés van.





3.34. ábra. A havi átlagos fajlagos szélteljesítménnyel arányos görbe alatti terület (T_{ga}) és a szélesebség köbök havi átlaga (v_m) közötti lineáris korreláció és regresszió a) Ungvár, b) Rahó és c) Pláj állomás esetében (10 m magasságban)

Forrás: saját szerkesztés

A korrelációs és a regressziós együtthatók jó közelítéssel egyenlők a három, különböző orográfiai környezetben elhelyezkedő állomáson. Az összes állomást egybe véve sem lehet nagy különbség. A havi átlagos szélesebségből tehát jól becsülhető a hónap egy napjára átlagosan eső szélteljesítmény.

3.6. A mérőállomások szélesebség értékeinek területi elemzése

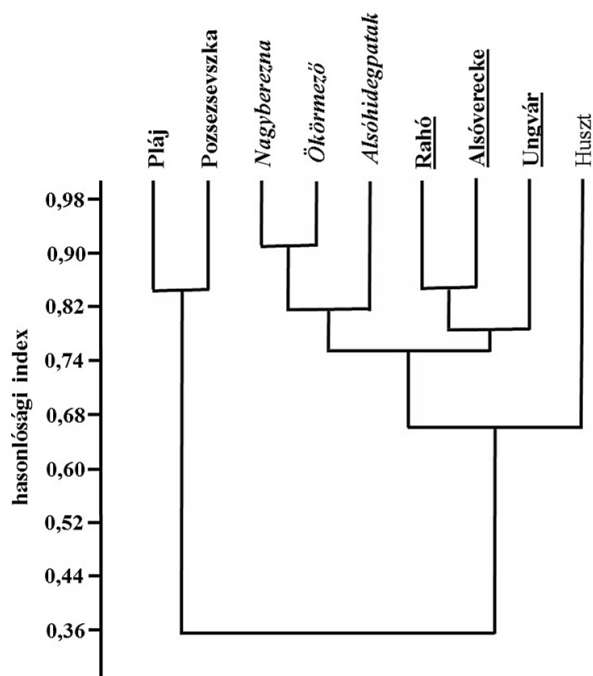
A fentiekben bemutatott a szélesebségek legfontosabb statisztikai és energetikai jellemzőit. A kapott eredmények, az egyes jellemzők értékei alapján igyekeztünk sorrendet felállítani a mérőpontok között, ezzel rámutattunk arra, hogy mely mérőpontok által reprezentált területeken számolhatunk a szélenergia felhasználás számára kedvezőbb feltételekkel. Végül soron megpróbálkoztunk – ahogy az a célkitűzéseink között szerepelt – a rendelkezésre álló mérőpont sűrűség és a felhasznált adatbázis adta lehetőségek alapján kiválasztani, lehatárolni Kárpátalján a szélenergia hasznosítására leginkább alkalmas régiókat.

Az egyes szélenergetikai jellemzőket elemezve, természetesen mindig fennállt egy sorrend az állomások között és amint tapasztaltuk egyes állomások hasonlóságot mutattak, míg mások jelentős különbségekkel külön csoportot alkottak. A területi elemzés során, hogy megtudjuk az azonos elhelyezkedésű állomások hasonló tulajdonságaik révén valóban elkülönülnek-e és alkotnak-e csoportokat, elsőként elvégeztük a mérőpontok Bray-Curtis hasonlósági indexen alapuló klaszter-analízisét. A Bray-Curtis formula (3.4) vagy más néven százalékos különbözőség (percentage difference) adta index (BC_{jk}) azt mutatja, hogy az összegzett értékek hányad részében van eltérés két objektum (mérőpont) között, azonban nem mutat rá, hogy mely tulajdonság (a szélklíma indikátorai, pl. átlagos szélsébség (10 m-en)) határozza meg a közös klaszterbe tartozó mérőpontokat (Bray – Curtis 1957):

$$BC_{jk} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_{ji} - x_{ki}|}{\sum_{i=1}^n |x_{ji} + x_{ki}|} \quad (3.4)$$

ahol, x_{ji} az egyik csoport (mérőpont) i tulajdonságának értéke, x_{ki} a másik csoport (mérőpont) i tulajdonságának értéke. A hasonlósági index értéke 0 és 1 közötti értéket vehet fel. A 0 azt jelenti, hogy a két csoport (mérőpont) között semmilyen hasonlóság nincs, az 1 pedig, hogy teljes hasonlóság tapasztalható.

Az elemzésbe 20 tényezőt vontunk be, amelyek alapján csoportosítottuk az állomásokat a meglévő hasonlóságok és különbségek szerint. A klaszteranalízis eredményét a hierarchikus fűrtképződést szemléltető dendrogram segítségével ábrázoltuk (3.35. ábra). Az ábrából megállapítható, hogy az azonos karakterisztikájú állomások adatai azonos vagy szomszédos csoportba tartoznak. A két legmagasabban fekvő és legszelesebb állomás (Pláj és Pozsezsevszka) a legmagasabb hierarchia szintig teljesen különálló csoportot alkot. Az alföldi és a folyóvölgyi állomások egy nagy közös csoportot hoznak létre, amelyen belül elkülöníthető 3 alcsoport: Nagyberezna, Ökörmező, Alsóhidegpatak, illetve Rahó, Alsóverecke, Ungvár, amelyek ezután egy közös csoportot alkotva egyesülnek a harmadikkal, a különálló és ezektől legkülönbözőbb Huszttal.



3.35. ábra. A mérőállomások klaszteranalízisének dendrogramja

Forrás: saját szerkesztés

Tovább vizsgálva a területi különbségeket kiválasztottuk azokat a jelzőket/indikátorokat, amelyek értékei alapján megpróbáltuk összegezni és megbecsülni az adott mérőpont által reprezentált régió „alkalmasságát” a szélenergia felhasználásra. Összesen 20 indikátort használtunk fel, amelyek értékei alapján az egyes állomások 1, 2 vagy 3 pontot kaptak (3.22. táblázat). A 3 pontot mindig az adott indikátoron belüli legjobb értékkel rendelkező állomás kapta (az indikátor típusától függően ez lehetett az állomások közötti legnagyobb vagy legkisebb érték), 2 pontot a második, az 1 pontot pedig a harmadik. A felhasznált indikátorok a következők:

1. elhelyezkedés, tengerszint feletti magasság;
2. a relatív szélcsend átlagos értéke (10 m-en);
3. átlagos szélsébség (10 m-en);
4. átlagos szélsébség (100 m-en);
5. variációs együttható (10 m-en);
6. variációs együttható (100 m-en);

7. módusz (10 m);
8. módusz 100 m;
9. maximum napi átlag (10 m-en);
10. a szélsébség átlagos napi menetének variációs együtthatója;
11. a szeles napok (D10) valószínűsége;
12. összes (D15) napok száma: a 15 m/s-ot meghaladó átlagszélsébségű napok gyakorisága;
13. legnagyobb energiát hordozó szélsébség (v_{maxE});
14. az energetikailag hasznosítható szélórák $t_{(3 \leq v_n \geq 25)}$ száma (óra/év);
15. az energetikailag hasznosítható egymást követő folyamatos szélórák $t_{(3 \leq v_n \geq 25)}$, átlagos időtartama (óra);
16. az energetikailag hasznosítható egymást követő folyamatos szélórák $t_{(3 \leq v_n \geq 25)}$, maximum időtartama (óra);
17. a 3 órát meghaladó az energetikailag hasznosítható egymást követő folyamatos szélórák $t_{(3 \leq v_n \geq 25)}$ relatív gyakorisága (%);
18. az éves fajlagos szélteljesítmény: a kinyerhető energia mennyiségét adja meg;
19. az egynapos hullám realitásának %-os aránya 0,17 ($A_k/E > 1,5$) szignifikancia szinten;
20. az év egy napjára átlagosan jutó fajlagos szélteljesítmény a közelítő függvény görbe alatti területével becsült értékei.

Összesítve látható, hogy a legtöbb indikátor alapján a két hegységi állomás alatt szerepel a legtöbb pont, az alföldön található Ungvár a harmadik. A sorrend természetesen nem meglepő, hiszen a legtöbb statisztikai és energetikai jellemző alapján ez áll fenn.

A beruházási döntések egyik alapját a szélklimatológiai és szélenergetikai elemzések eredményei adják. Azonban a terület domborzati, biogeográfiai és természetvédelmi adottságai szemszögéből belátható, hogy a konkrét döntések meghozatala előtt mindenképp szükséges lenne elvégezni a terület geoinformatikai alapokon nyugvó komplex földrajzi, ökológiai, gazdasági és infrastrukturális elemzését is.

A szélerőművek telepítése, a modern logisztikai megoldások széles eszköztára mellett is, legsikeresebben és a legkisebb ráfordítással a könnyen megközelíthető helyeken, a vonalas létesítmények, a villamoshálózat, a felhasználók és egyéb infrastrukturális eszközöket bizto-

sító környezet közelségében hajtható végre. Kárpátalján ezt viszont elsősorban az alföldi ipari- és települési környezet tudja biztosítani.

3.22. táblázat. A kiválasztott indikátorokon belül kapott pontszámok megoszlása és összege a 9 állomáson
(kiemelve: **első**, **második** és **harmadik** legnagyobb érték)

Indikátor	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsegyesvzka (1451 m)
1.	3	1	2						
2.	1	2						3	
3.	1							3	2
4.	1							3	2
5.	1	2					3		
6.	1	2					3		
7.	1						2	3	
8.	2						1	3	
9.				1				2	3
10.		1						2	3
11.						1	2	3	
12.	1							3	2
13.				1				2	3
14.						1		3	2
15.				1				3	2
16.						1		2	3
17.				1				3	2
18.				1				3	2
19.	3		2			1			
20.				1				3	2
Σ	15	8	4	6	0	4	11	44	28

Forrás: saját szerkesztés

3.7. A szélirányok statisztikai, energetikai jellemzése

A szélklimatológiai, szélenergetikai vizsgálatok egy szintén fontos szegmense a szélirányokra vonatkozó jellemzők és összefüggések feltárása, a legpontosabb következtetések levonása érdekében. Ezen alfejezet a 3 órás terminus időpontokban regisztrált szélesebséghez tartozó szélirányok elemzését tartalmazza a mintaterület mérőpontjain. Minden állomás esetében lehatároltuk azokat az időszakokat és kiválasztottuk azokat a szélirányokat, amelyek szélenergiában gazdagabbak a többinél.

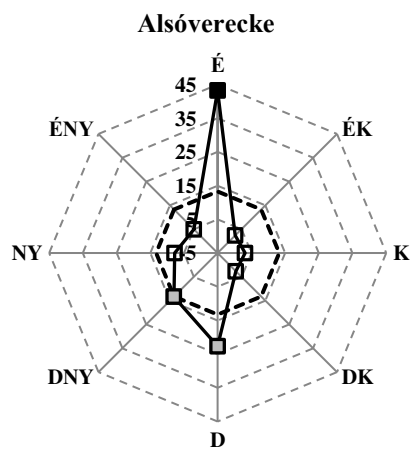
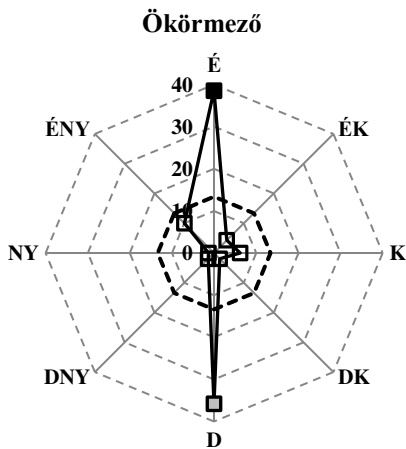
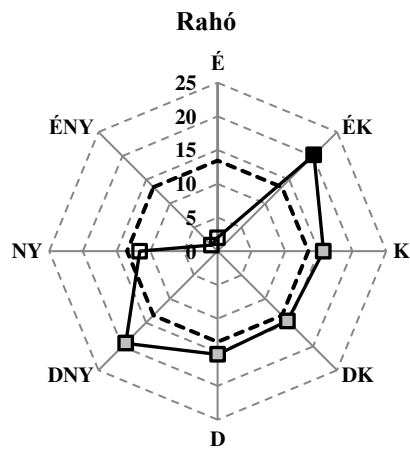
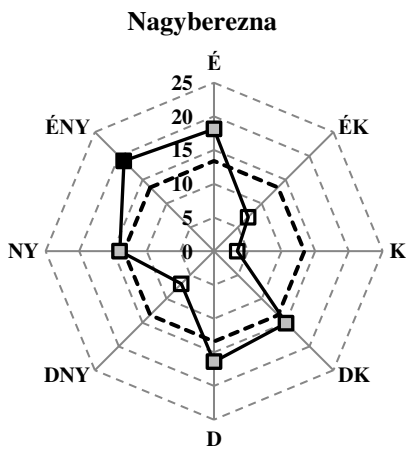
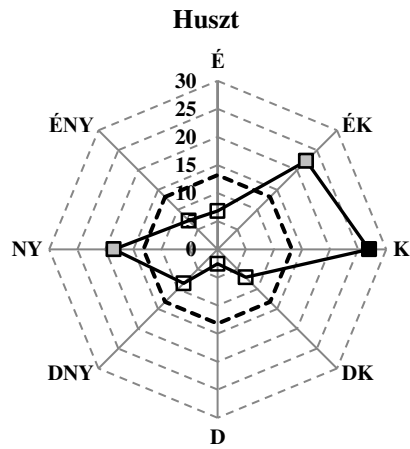
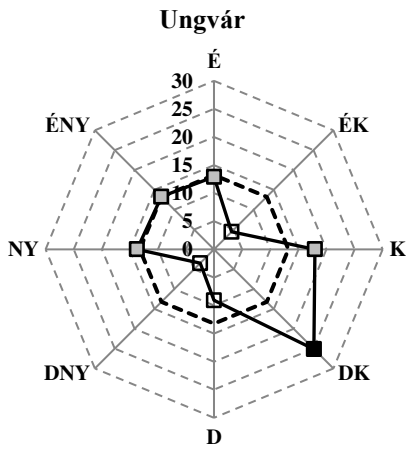
A mérőpont közeli tereptárgyak (épületek, fák) jelentősen befolyásolják a szél irányát, szélárnyékos területeket hozva létre. A mérőpont közvetlen környezetén felül a tágabb értelemben vett térség is hatást gyakorol a szélirányok gyakoriságára, eloszlására. A 2.3. alfejezetben bemutattuk a mérőpontok 2 km-es sugarú környezetében, 360°-ban, a szélmérés magasságban a domborzat, illetve az SRTM által tartalmazott egyéb felszíni érdekességet befolyásoló elemek (pl. magas épületek, erdő) horizontkorlátozását bemutató horizontdiagramokat, szemléltetve ezzel az állomások környezetében, az egyes égtájak felől a domborzat hatását a felszínközeli szélmező tulajdonságaira. Megállapítottuk, hogy a tagolt felszín a lokális szélviszonyok kialakulásának elsődleges tényezője.

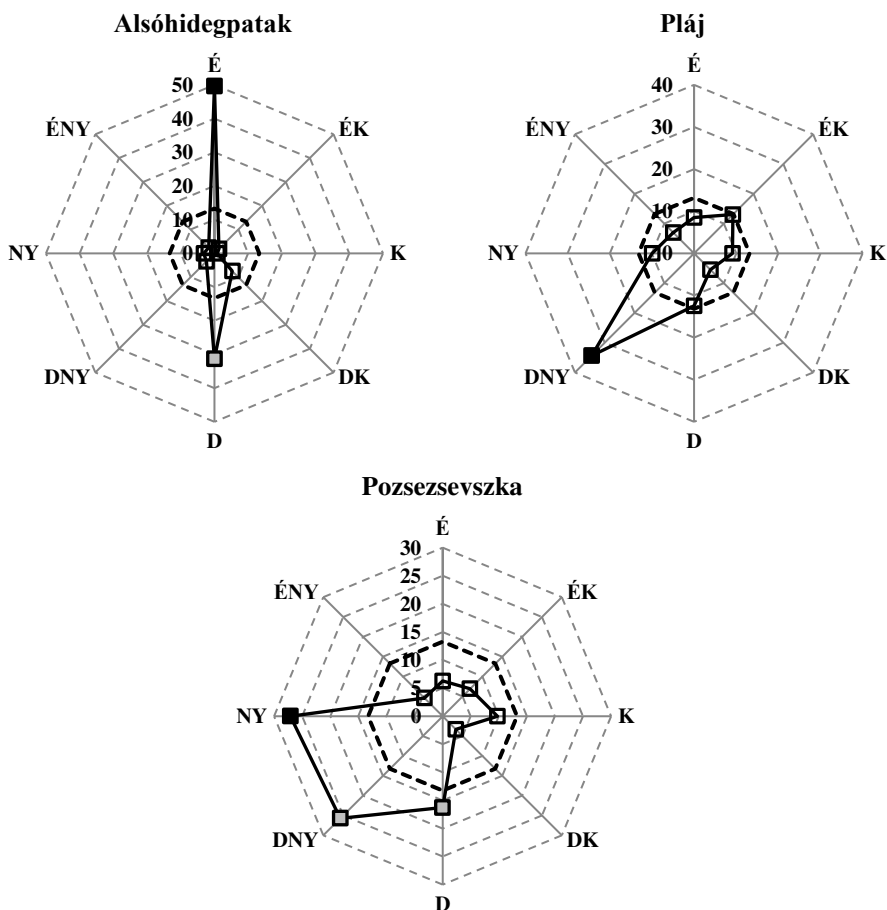
A vizsgált meteorológiai állomások szélirány adatait tekintve megállapítható, hogy a lokális szélviszonyok rendszere és ezek tulajdonságai többek között a Szász – Tőkei (1997) által leírt hegy-völgyi szél mechanizmusára vezethető vissza. Kárpátalja hegyvidéki részén sűrűn elhelyezkedő mély folyóvölgyek helyi áramlási mező létrejöttét okozzák. Ennek egyik jellegzetes formája a hegy-völgyi cirkuláció. A hegy-völgyi szelek, gyenge nagytérségi légmozgások mellett, különösen a nyári évszakban, a nap folyamán periodikus járást mutatnak (Herenchuk 1981, Bodnar 1987, Voropai – Kunytsa 1996). Nappal a völgy aljától a hegygerinc irányába, felfelé mozog a levegő, sok vízpárát szállítva a magasba. Éjjel viszont az áramlás megfordul, a hegycsúcsok, hegygerinc felől a völgy alsó részébe áramlik a levegő. Ehhez kedvező feltételek adóttak főleg az Ung, Latorca, Borzsa, Nagyg, Tarac és Talabor folyók völgyében (Buchynszkyi 1971).

3.7.1. A szélirányok empirikus relatív gyakorisága és a jellemző szélirányok

Első lépésben előállítottuk a mérőpontokon a szélirányok empirikus relatív gyakoriságát az egész időszakra és évszakosan is. Az energetikai vizsgálatoknál ugyan a 16 irányszektoros bontás javasolt (Lysen 1982, Patay 2003, Pivnyak et al. 2015) a szélirány gyakoriságok ábrázolására, azonban az általunk felhasznált adatbázis felbontása csupán 8 égtáji felosztást engedett meg. Következő lépésben a 2.5.1. alfejezetben bemutatott statisztikai próba segítségével meghatároztuk az állomások szélirány eloszlásaira azt a kritikus tartományt (h_1 és $h_2 > h_1$), amely alapján a $g_D > h_2$ egyenlőtlenség teljesülése esetén kiválaszthatók a jellemző szélirányok, amelyekből egy-egy állomáson akár több is lehet. A mérőpontok szélrózsáit az egész időszakra a 3.36. ábrán, évszakonként a 22. függelékben mutatjuk be.

Általánosan elmondható, hogy az eloszlások erősen tükrözik az orográfiai viszonyokat, különösen a szűk folyóvölgyekben elhelyezkedő állomásokon (Hadnagy – Tar 2019c). A szélrózsák feketével kitöltött jelölői a leggyakoribb jellemző irányokat, a szürkék az egyéb jellemző irányokat, a kitöltetlen jelölők a nem jellemző irányokat mutatják. A jellemző irányok száma 1 és 5 között változik, az összes gyakoriságuk pedig 34,4% (Pláj) és 85,0% (Alsóhidegpatak) között. Az alföldi állomásokon és egy-egy szélesebb folyóvölgyben egyenletesebb eloszlást és több jellemző szélirányt láthatunk (3-5), ilyen Ungvár (az Ungi-síkon, az Ung-folyó völgyében), Huszt (a Huszti-kapuban, a Tisza völgyében), Nagyberezna (az Ung-folyó völgyének egy kiszélesedő szakaszán), Rahó (a Fekete-Tisza-folyó egy kiszélesedő szakaszán). A magasabb tengerszint feletti területeken, a felszínbe mélyen bevágódó folyóvölgyek állomásain viszont legfeljebb 1-3 meridionális jellemző irányt találunk, ezek: Ökörmező (a Nagyág-folyó völgyében), Alsóverecke (a Latorca-folyó völgyében), Alsóhidegpatak (a Fehér-ág-folyó völgyében). Ez összefüggésben áll azzal is, hogy az Északkeleti-Kárpátoknak 1000 m alatt húzódó gerincvonala utat nyit a mérsékelt öv ezen részén uralkodó északnyugati, nyugati áramlásoknak, melyek megkerülik a hegyláncot és a folyóvölgyeken keresztül beáramlanak, illetve a hegy-völgyi cirkuláció is okozója lehet a meridionális áramlásnak (Hadnagy – Tar 2019c). A hegygerincen elhelyezkedő Pláj és Pozsezevszka egy más légréteg áramlási viszonyait mutatja, a nyitott környezet ellenére 1-3 jellemző irány adódik D, DNY és NY felől.





3.36. ábra. A szélirányok relatív gyakorisága (%) és a jellemző szélirányok a vizsgált állomásokon a 2011–2015 közötti időszakban (feketével kitöltött jelölő – a leggyakoribb jellemző szélirány, szürkével kitöltött jelölők – a többi jellemző szélirány, fekete szaggatott vonal – kritikus gyakorisági érték (h_2), amely fölött az adott szélirány jellemzőnek tekinthető, szürke vonal – szélrózsza)

Forrás: saját szerkesztés

A jellemző irányok egyes éves és évszagos statisztikai értékeit a 3.23. táblázatban mutatjuk be. Megállapítható, hogy évszagos felosztásban három állomáscsoportot lehet megkülönböztetni:

- ahol az éves és az egyes évszagos leggyakoribb szélirány megegyezik (Alsóverecke, Alsóhidegpatak és Pláj);

- ahol az éves és a tavaszi, nyári leggyakoribb szélirány megegyezik (Nagyberezna, Ökörmező és a Pozsepszvszka);
- ahol az éves és a téli, őszi leggyakoribb szélirány megegyezik (Ungvár, Huszt és Rahó).

A leggyakoribb jellemző szélirányokat tekintve tehát az első csoportba tartozók a legkevésbé változékonyak, ahol a leggyakoribb szélirány kevés eséllyel, esetleg egy-egy hónapban térhet el az évestől. A többi állomáson a változások az éves irányhoz képest leggyakrabban télen és ősszel, nagyon ritkán tavasszal és nyáron következnek be. A leggyakoribb szélirány relatív gyakorisága Alsóhidegpatakon tavaszra esik, amikor a völgy irányával megegyező É szélirány 56,0%-os relatív gyakorisággal érvényesül. Az egy jellemző szélirány átlagos gyakoriságának maximuma pedig a Plájon, télen jelentkezik 44,6%-kal.

3.23. táblázat. A leggyakoribb szélirány (MFWD) és relatív gyakorisága ($MFWD_F$), a jellemző szélirányok (CWD), $g_D > h_2$ egyenlőtlenség h_2 értéke, a jellemző szélirányok együttes és átlagos relatív gyakorisága (CWD_F és CWD_{F1}) a 2011–2015-ös időszakban (kiemelve: **félkövér** – a legnagyobb, dőlt – a legkisebb érték)

Időszak	MFWD	$MFWD_F$ (%)	CWD	h_2 (%)	CWD_F (%)	CWD_{F1} (%)
Ungvár (112 m)						
éves	DK	25,1	K,DK,NY,ÉNY	13,2	83,0	16,6
tél	DK	40,1	DK	14,0	40,1	40,1
tavaszi	K	18,8	É,K,DK,NY,ÉNY	13,9	82,0	16,4
nyár	K	19,3	É,K,DK,NY,ÉNY	14,0	78,9	15,8
ősz	DK	29,5	K,DK	14,0	50,7	27,3
Huszt (164 m)						
év	K	26,9	ÉK,K,NY	13,2	67,7	22,6
tél	K	29,5	ÉK,K,NY	14,0	70,6	23,5
tavaszi	ÉK	24,8	ÉK,K,NY	13,9	65,8	21,9
nyár	K	23,1	ÉK,K,NY	13,9	63,5	21,2
ősz	K	33,3	ÉK,K,NY	14,0	71,7	23,9
Nagyberezna (205 m)						
éves	ÉNY	18,9	É,DK,D,NY,ÉNY	13,4	82,6	16,5
tél	D	22,6	É,DK,D,ÉNY	14,3	74,8	18,7
tavaszi	ÉNY	22,1	É,ÉNY	14,1	43,7	21,9
nyár	ÉNY	21,4	É,DK,NY,ÉNY	14,3	77,5	<u>15,5</u>
ősz	D	21,1	É,DK,D,NY,ÉNY	14,5	84,1	16,8

A 3.23. táblázat folytatása

Időszak	MFWD	MFWD _F (%)	CWD	h ₂ (%)	CWD _F (%)	CWD _{F1} (%)
Rahó (430 m)						
éves	ÉK	20,2	ÉK,K,DK,D,DNY	13,5	85,2	17,0
tél	ÉK	21,6	ÉK,DNY	14,5	46,4	23,2
tavaszi	ÉK	23,4	ÉK,K,D,DNY	14,2	74,3	18,6
nyár	K	16,6	ÉK,K,DK,D,DNY	14,4	81,6	16,3
ősz	ÉK	19,5	ÉK,DK,D,DNY	14,6	71,6	17,9
Ökörmező (456 m)						
éves	É	38,5	É,D	13,4	74,4	37,2
tél	D	46,8	É,D	14,2	80,8	40,4
tavaszi	É	40,9	É,D	14,1	69,7	34,8
nyár	É	40,9	É,D	14,4	69,4	34,7
ősz	D	39,7	É,D	14,5	78,1	39,0
Alsóverceke (496 m)						
éves	É	43,2	É,D,DNY	13,3	79,2	26,4
tél	É	35,9	É,D,DNY	14,0	85,2	28,4
tavaszi	É	49,3	É,D	14,0	67,5	33,7
nyár	É	46,7	É,D	14,0	63,1	31,6
ősz	É	40,7	É,D	14,1	66,6	33,3
Alsóhidegpatak (615 m)						
év	É	49,6	É,D	13,3	80,9	40,4
tél	É	44,1	É,D	14,0	85,0	42,5
tavaszi	É	56,0	É,D	14,0	80,5	40,2
nyár	É	51,6	É,D	14,1	75,2	37,6
ősz	É	46,1	É,D	14,2	82,5	41,2
Pláj (1330 m)						
éves	DNY	34,4	DNY	13,2	34,4	34,4
tél	DNY	44,6	DNY	13,9	44,6	44,6
tavaszi	DNY	30,4	ÉK,DNY	13,8	49,4	23,2
nyár	DNY	25,9	ÉK,DNY	13,8	42,9	21,4
ősz	DNY	36,9	D,DNY	13,9	53,5	26,7
Pozsezszevszka (1451 m)						
éves	NY	27,1	D,DNY,NY	13,3	69,1	23,0
tél	DNY	36,7	D,DNY,NY	14,0	81,4	27,1
tavaszi	NY	30,3	DNY,NY	14,0	50,3	25,2
nyár	NY	29,7	DNY,NY	14,0	48,6	24,3
ősz	DNY	27,6	D,DNY,NY	14,0	72,3	24,1

Forrás: saját szerkesztés

3.7.2. A szélirányok átlagsebességeinek jellemzői

A 3.24. táblázatban látható az állomások szélirányainak átlagszélsebességei. Az 1000 m feletti légrétegben elhelyezkedő két hegységi állomás legszelesebb DNY-i irányát (átlagosan 6,0 m/s) nem számítva Kárpátalján az északias (ÉNY,É,ÉK) szelek rendelkeznek a legnagyobb átlagsebességgel (2,5 m/s). A táblázatból kiderül az is, hogy:

- a maximum átlagsebesség a leggyakoribb szélirányhoz (Nagyberezna, Rahó, Ökörmező, Alsóverecke és Pláj) vagy
- a maximum átlagsebesség egy jellemző szélirányhoz (Ungvár, Huszt, Alsóhidegpatak és Pozsezevszka) tartozik.

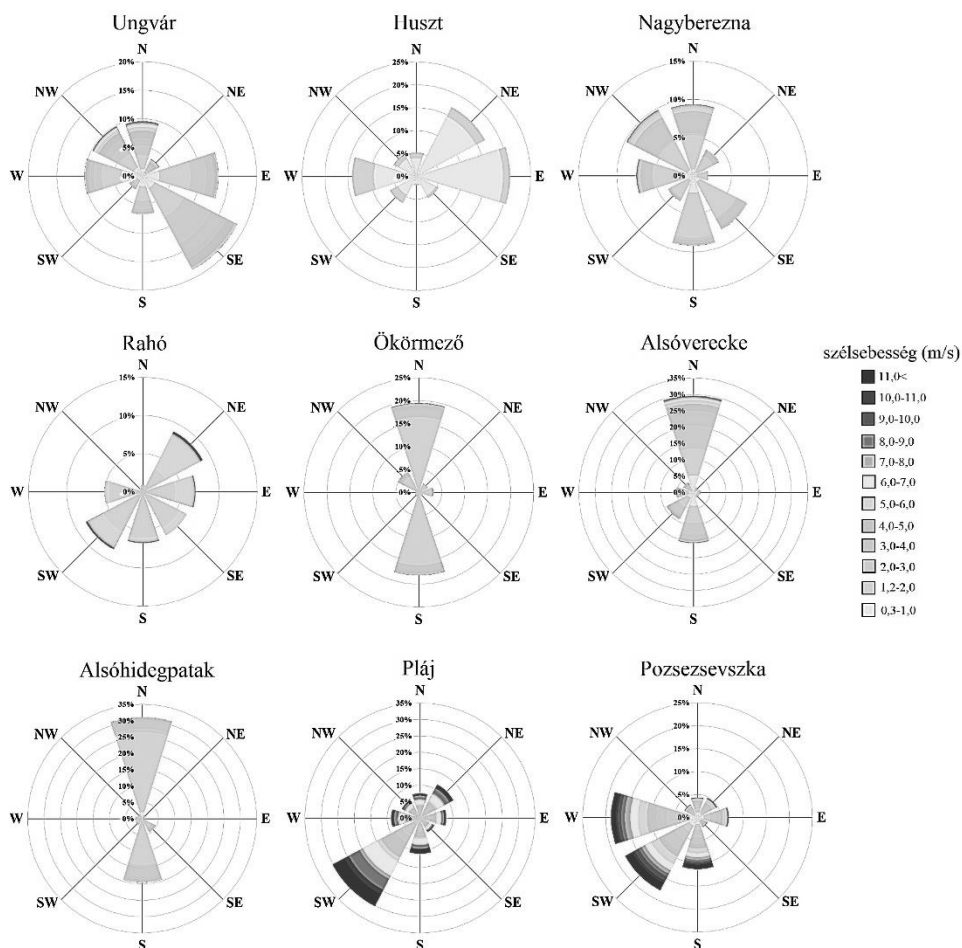
3.24. táblázat. Az állomások szélirányainak átlagsebessége (m/s)
(kiemelve: **félkövér** – az adott állomáson belüli legnagyobb szélesebesség,
sötétszürke – a leggyakoribb jellemző szélirány,
világosszürke – egyéb jellemző szélirány)

Szélirány	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverecke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
É	3,3	1,2	3,1	2,3	2,6	3,0	2,2	5,2	3,3
ÉK	2,9	1,0	2,5	4,6	2,2	2,3	2,2	5,6	3,6
K	2,2	1,0	2,0	3,6	2,2	1,7	2,2	4,6	3,4
DK	2,6	1,0	2,4	2,7	2,2	1,6	2,5	4,4	3,1
D	2,1	1,1	2,1	2,5	2,3	2,5	2,7	5,5	5,2
DNY	2,1	1,2	2,2	3,3	2,4	2,5	2,3	6,3	5,7
NY	2,0	1,2	2,7	2,5	2,3	2,4	2,1	5,3	5,2
ÉNY	3,1	1,1	3,2	2,7	2,5	2,8	2,4	4,7	3,3

Forrás: saját szerkesztés

A szélirányok szélesebesség értékeinek szemléletesebb megjelenítése érdekében elkészítettük az állomások szélirányonkénti szélesebesség eloszlásait (3.37. ábra). Megfigyelhető, hogy minden állomás sajátos, egyedi mintázattal rendelkezik. Az alföldi és folyóvölgyi mérőpontok sebességeloszlásaiban az irányonkénti sebességeloszlásban is érvényesül az orográfiai hatás, mivel a legnagyobb átlagsebességek a nyitott égtájak felől jelentkeznek. A jellemző szélirányok átlagsebessége 1,2 m/s-mal

nagyobb, mint a nem jellemzőké, 1,0 m/s-mal pedig az állomások éves átlagsebességénél. A jellemző irányok átlagsebességei legnagyobb Plájon (6,3 m/s), Pozsezevszán (5,4 m/s) és Rahón (3,3 m/s), legkisebbek Huszton (1,1 m/s). A nem jellemző irányok átlagsebessége szintén Huszton (1,0 m/s) a legkisebbek és Pozsezevszán (1,3 m/s) a legnagyobbak. A hegységi állomások jellemző szélirányainak átlagsebessége átlagosan 2,5-szer nagyobbak, mint az alföldi és folyóvölgyi állomásoké, a nem jellemző irányok esetében pedig ez az arány 2,0.



3.37. ábra. A szélirányszektorokhoz tartozó szélesség eloszlás (%) az egyes állomásokon a 2011–2015 közötti időszakban

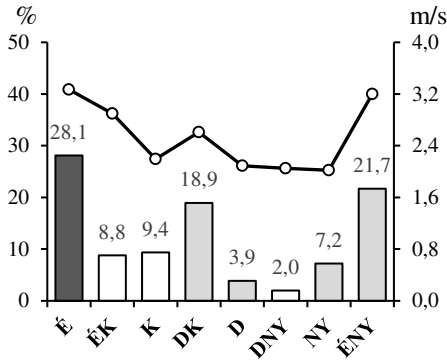
Forrás: saját szerkesztés

Mérőpontonként megvizsgálva a jellemző és nem jellemző szélirányok sebességeloszlásaiban a $v_i \geq 3$ m/s szélsébségek (a szelerőművek leggyakoribb indító sebessége) kumulált gyakoriságait megállapítható, hogy átlagosan a $v_i \geq 3$ m/s szélsébségek 74,8%-a a jellemző és 23,1% a nem jellemző szélirányokra esik. A jellemző irányok tekintetében a növekvő sorrend a következő: Pláj (37,0%), Huszt (55,0%), Ökörmező (75,4%), Alsóhidegpatak (78,1%), Pozsezsevszka (78,2%), Ungvár (79,1%), Alsóverecke (86,5%), Nagybereszna (90,0%), Rahó (94,2%). A $v_i \geq 3$ m/s szélsébségek megjelenésének gyakorisága alapján az állomások szélirány szélsébség eloszlásában látható, hogy az orográfiai hatás a szélirányok sebesség eloszlásaira legerősebben Alsóvereckén, Alsóhidegpatakon és Ökörmezőn jut érvényre. Ezen az állomásokon tapasztalható az egyes jellemző szélirányokhoz tartozó $v_i \geq 3$ m/s szélsébségek kumulált gyakoriságainak maximuma, mégpedig Alsóvereckén az É irányra 59,2%-a, Alsóhidegpatakon a D-i irányra 45,5%-a és Ökörmezőn szintén egy meridionális É-i irányra 43,8%-a esik.

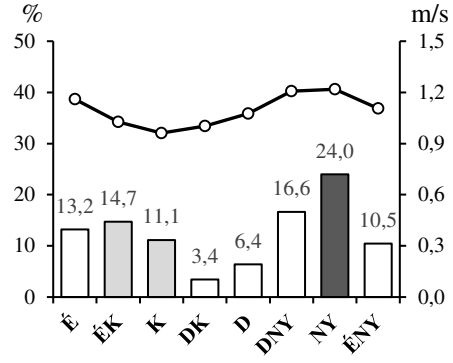
3.7.3. *A szélirányok relatív energiatartalma*

A 2.4.2. alfejezetben leírtak szerint meghatároztuk az egyes szélirányok relatív energiatartalmát. A meghatározás szerint a legnagyobb energiatartalommal bíró jellemző szélirányt az uralkodó széliránynak tekintjük (Tar 2003a, Tar – Verdes 2003, 2004b). A definíciót követve az 3.38. ábrán minden állomáson kijelöltük az energetikailag uralkodó szélirányt. Mivel a szélteljesítmény a szélsébség harmadik hatványával arányos (Patay 2003) ezért az uralkodó szélirány egyben a legnagyobb átlagsebességű is. A jellemző szélirányok összes relatív energiatartalma éves viszonylatban 47,4% (Pláj) és 94,6% (Rahó) között változik. A jellemző szélirányok átlagos relatív energiatartalma pedig 16,0% (Ungvár) és 47,4% (Pláj) között van és a kevés jellemző iránnyal rendelkező folyóvölgyi és hegységi állomásokon jelentkeznek a magasabb értékek. A nem jellemző szélirányok átlagos relatív energiatartalma éves tekintetben 1,8% (Rahó) és 10,0% (Huszt) között alakul.

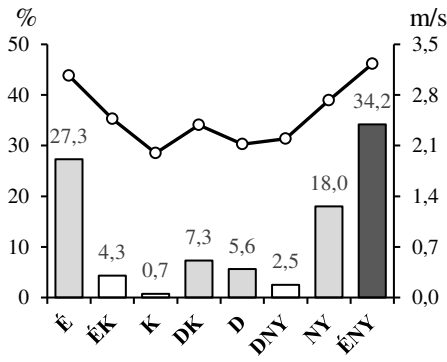
Ungvár



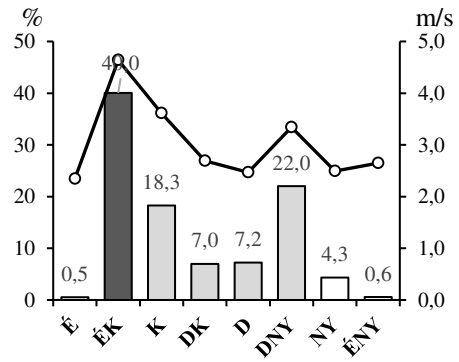
Huszt



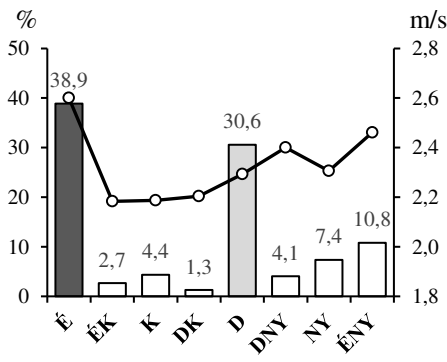
Nagyberezna



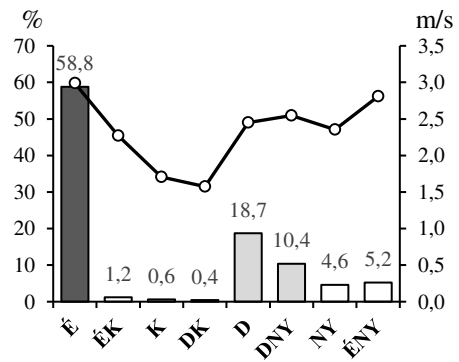
Rahó

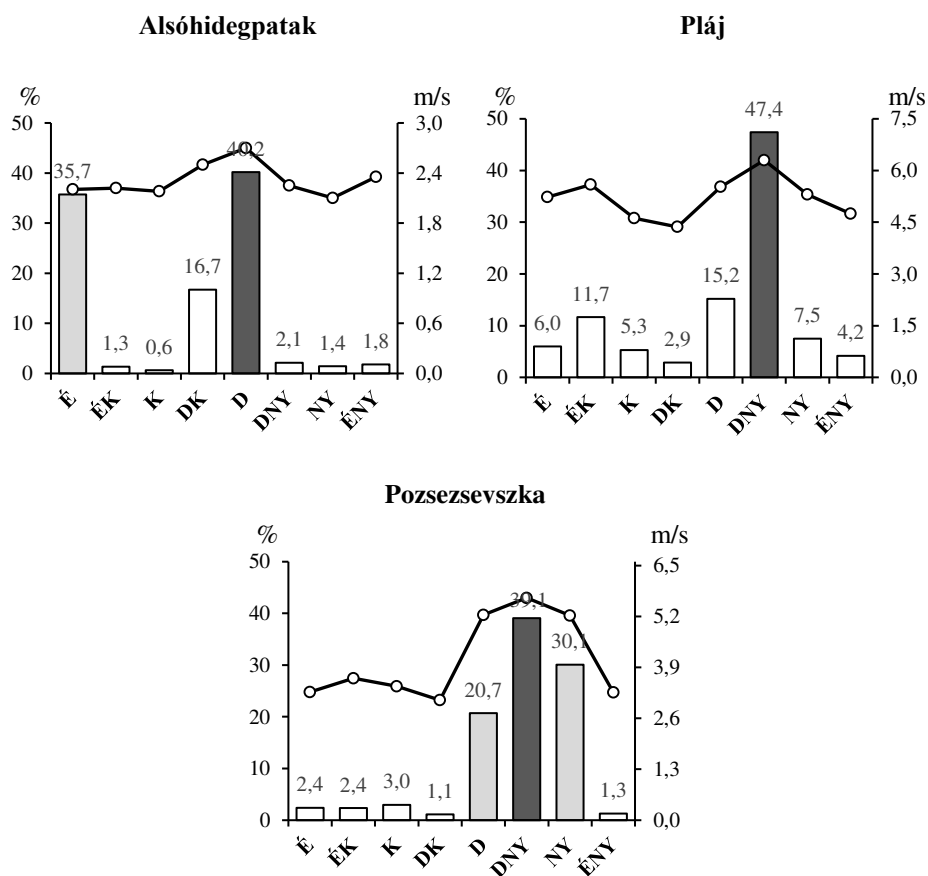


Ökörmező



Alsóverecke





3.38. ábra. A különböző szélirányok relatív energiatartalma (%), azok átlagsebessége (m/s, fekete vonal jelölőkkel), az energetikailag uralkodó szélirány (fekete oszlop) és a többi jellemző szélirány (szürke oszlopok), 2011–2015 között

Forrás: saját szerkesztés

Egy jellemző szélirány éves tekintetben átlagosan 8,0-szor több energiát szállít, mint egy nem jellemző irány, bár ennek értéke az állomások között erősen változik. A minimuma az orográfiailag legkevésbé zavart Ungváron (2,4) míg a maximuma a szélárnyékolás tekintetében legrosszabb környezetben fekvő Alsóvereckén (12,2) van (3.25. táblázat). Az uralkodó szélirányok nagyobb relatív energiatartalmai szintén az összetett orográfiajú állomásokon tapasztalható és 24,0% (Huszt) és 58,8% (Alsóverecke) között alakul.

A szélesebbesek relatív energiatartalmának évszakos sajátosságai (3.25. táblázat), hogy a jellemző szélirányok összes relatív energiatartalma az alföldi és folyóvízi állomásokon télen és ősszel kisebb, míg tavasszal és nyáron nagyobb, mint a hegységi állomásokon. Az alföldi és folyóvízi állomásokon a jellemző szélirányok átlagos relatív energiatartalma legkisebb ősszel (26,5%), ezt követi a nyár (26,9%), a tavasz (29,4%) és legnagyobb télen (30,5%). A hegységi állomásokon a sorrend: nyár (27,6%), tavasz (31,6%), ősz (32,1%) és tél (47,4%).

3.25. táblázat. A jellemző szélirányok együttes és átlagos relatív energiatartalma (CWD_E és CWD_{EI}), egy nem jellemző (NWD_{EI}) szélirány átlagos relatív energiatartalma, az energetikailag uralkodó szélirányok ($EPWD$), azok energiatartalma ($EPWD_{EI}$), egy jellemző és nem jellemző szélirány energiatartalmának aránya (CWD_{EI}/NWD_{EI}) a 2011–2015-ös időszakban (kiemelve: **félkörv** – a legnagyobb, dőlt – a legkisebb érték)

Időszak	CWD_E (%)	CWD_{EI} (%)	NWD_{EI} (%)	EPWD	$EPWD_{EI}$ (%)	CWD_{EI} / NWD_{EI}
Ungvár (112 m)						
év	79,8	16,0	6,7	É	28,1	2,4
tél	39,9	39,9	8,6	DK	39,9	4,7
tavasz	87,6	17,5	4,1	É	36,9	4,3
nyár	72,5	18,1	6,0	É	27,4	3,0
ősz	<u>36,6</u>	18,3	10,6	DK	24,3	1,7
Huszt (164 m)						
év	49,9	16,6	10,0	NY	24,0	1,7
tél	46,1	15,4	10,8	NY	29,7	1,4
tavasz	41,5	<u>13,8</u>	11,7	NY	<u>19,2</u>	<u>1,2</u>
nyár	61,7	20,6	7,7	NY	27,9	2,7
ősz	68,6	22,9	6,3	NY	28,3	3,6
Nagyberezna (205 m)						
év	92,4	18,5	2,5	ÉNY	34,2	7,4
tél	82,5	20,6	4,4	É	32,7	4,7
tavasz	69,2	34,6	5,1	ÉNY	39,0	4,8
nyár	86,0	21,5	3,8	ÉNY	36,4	5,7
ősz	93,2	18,6	2,3	É	24,1	8,1
Rahó (430 m)						
év	94,6	18,9	1,8	ÉK	40,0	10,5
tél	71,6	35,8	4,7	ÉK	40,1	7,6
tavasz	90,1	22,5	2,5	ÉK	40,6	9,0
nyár	88,3	17,7	3,9	ÉK	34,3	4,5
ősz	77,3	19,3	5,7	ÉK	42,4	3,4

A 3.25. táblázat folytatása

Időszak	CWDE (%)	CWDE _{E1} (%)	NWDE _{E1} (%)	EPWD	EPWD _{E1} (%)	CWDE _{E1} / NWDE _{E1}
Ökörmező (456 m)						
év	69,5	34,7	5,1	É	38,9	6,8
tél	60,1	30,0	6,7	D	37,8	4,5
tavaszi	73,8	36,9	4,4	É	51,5	8,4
nyár	67,2	33,6	5,5	É	40,4	6,1
ősz	82,3	41,2	2,9	É	46,9	14,2
Alsóverecke (496 m)						
év	87,9	29,3	2,4	É	58,8	12,2
tél	92,6	30,9	1,5	É	57,5	20,6
tavaszi	77,4	38,7	3,8	É	66,5	10,2
nyár	71,4	35,7	5,6	É	59,3	6,4
ősz	75,9	37,9	4,0	É	46,6	9,5
Alsóhidegpatak (615 m)						
év	75,9	38,0	4,0	D	40,2	9,5
tél	82,1	41,0	3,0	D	54,9	13,7
tavaszi	82,9	41,5	2,8	É	59,5	14,8
nyár	82,3	41,2	2,9	D	49,3	14,2
ősz	52,2	27,6	7,5	D	34,7	3,7
Pláj (1330 m)						
év	47,4	47,4	7,5	DNY	47,4	6,3
tél	63,3	63,3	5,2	DNY	63,3	12,2
tavaszi	55,2	27,6	7,5	DNY	35,3	3,7
nyár	45,6	22,8	9,1	DNY	29,0	2,5
ősz	68,9	34,5	5,2	DNY	49,3	6,6
Pozsezevszka (1451 m)						
év	89,9	30,0	2,0	DNY	39,1	15,0
tél	94,6	31,5	<u>1,1</u>	DNY	45,3	28,6
tavaszi	71,1	35,6	4,8	NY	44,2	5,3
nyár	64,6	32,3	5,9	NY	39,7	5,5
ősz	88,8	29,6	2,2	DNY	42,1	13,5

Forrás: saját szerkesztés

Az uralkodó szélirány egyes állomásokon Huszton, Rahón, Alsóverecskén és Plájon évszakonként változatlan marad, míg a többi állomáson egy-egy évszakban megváltozik, leggyakrabban télen és ősszel. Az uralkodó szélirányok átlagos relatív energiája télen a legnagyobb és ősszel a legkisebb. Egy jellemző szélirány télen átlagosan 10,9-szer, tavasszal 6,9-szer, nyáron 5,6-szor és ősszel 7,1-szer több energiát szállít, mint egy nem jellemző irány. Az abszolút maxi-

num Pozsezevszskán télen jelentkezik, amikor egy jellemző szélirány átlagosan 28,6-szor több energiát szállít.

A szélirányok gyakorisága és sebessége, illetve relatív energiatartalma közötti kapcsolatot lineáris korrelációval és regresszióval vizsgáltuk (3.26. táblázat). A korrelációs együttható 0,05 szignifikancia szinthez tartozó kritikus értéke esetünkben ($n=8$) $r_{0.05}=0,63$, vagyis a kapcsolat Ungvár és Huszt esetében sehol sem szignifikáns, míg Nagybereznán, Rahón, Alsóvereckén, Plájon és Pozsezevszskán mind a szélesebesség és a relatív energiatartalom összefügg a szélirányok gyakorisági eloszlásával. Alsóvereckén csak az energia esetében mutatható ki szignifikáns összefüggés, emellett minden állomáson a relatív energia korrelációs együtthatói magasabbak, tehát a kapcsolat a relatív energiatartalom esetében tekinthető statisztikai értelemben meghatározottnak. Ez azt is jelenti, hogy a szélirányok energiatartalmát nem a sebesség, hanem az előfordulás gyakorisága határozza meg elsősorban.

3.26. táblázat. Lineáris korreláció (r) és regressziós együttható (b) a szélirányok relatív gyakorisága, az átlagos szélesebesség és a relatív energiatartalom között (kiemelve: **félkövér** – szignifikáns esetek)

Lineáris korreláció és regressziós együttható		Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverecke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
átlagos sebesség	r	0,08	-0,35	0,70	0,65	0,55	0,65	0,28	0,85	0,94
	b	0,01	0,12	0,49	0,43	0,30	0,42	0,08	0,73	0,88
relatív energia	r	0,49	0,44	0,77	0,78	0,98	0,98	0,92	0,99	0,97
	b	0,24	0,19	0,60	0,61	0,96	0,96	0,84	0,99	0,93

Az $y=a+bx$ egyenletben a b regressziós együttható a függő változónak a független változó értékének egységnyi megváltozására való érzékenységet is mutatja (Obádovics 2003). A szignifikáns esetekben ez a következőképpen alakul: a relatív gyakoriság 1%-nyi megváltozása Plájon okozza az energiatartalom legnagyobb (0,99%), Huszton pedig a legkisebb (0,19%) megváltozását. Az egyes állomások esetében az 1 körüli értékek arra utalnak, hogy a szélirányok gyakorisága és relatív energiatartalma lényegében együtt változik.

ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmányban jellemeztük Kárpátalján a felszínközeli szélmező statisztikai és energetikai tulajdonságait, amelyek ismerete nélkülözhetetlen a szélenergia felhasználás tervezéséhez és a telepítési helyszínek kiválasztásával kapcsolatos döntések helyes meghozatalához. Az elért eredmények további szélenergetikai vizsgálatok alapját képezhetik. A monográfiában 9 meteorológiai mérőállomás 3 óránként regisztrált szélesebség és szélirány, illetve napi maximális szélesebség adatsorait használtuk fel. A vizsgált időszak 2011. január 1-től 2015. december 31-ig terjedt. Az állomások különböző orográfiai környezetben és tengerszint feletti magasságon helyezkednek el. A legalacsonyabban (Ungvár, 112 m) és a legmagasabban (Pozsezszevszka, 1451 m) fekvő állomás relatív szintkülönbsége 1339 m. Egész Kárpátalján, melynek területe 12800 km² a relatív szintkülönbség eléri az 1950 m-t. Ennek okán a mérőpontokat a vizsgálat során 3 csoportba soroltuk: alföldi (Ungvár és Huszt), nem alföldi folyóvölgyi (Nagyberezna, Rahó, Ökörmező, Alsóverecke, Alsóhidegpatak) és hegységi (Pláj és Pozsezszevszka) állomások.

A klimatológiai szél-adatsor statisztikai vizsgálata során megállapítottuk, hogy az átlagos szélesebség a teljes időszakra vonatkozóan 0,8 m/s (Huszt) és 4,9 m/s (Pláj) között változik. Az átlagos szélesebség alapján az állomások közötti növekvő sorrend a következő: Huszt, Ökörmező, Nagyberezna, Rahó, Alsóhidegpatak, Alsóverecke, Ungvár, Pozsezszevszka és Pláj. A szélesebségek variációs együtthatója alapján a legkevésbé változékony széljárású Ungvár és Pláj. A napi átlagsebességek módusza a Plájon kívül (2,1 m/s) sehol sem éri el a 2,0 m/s-ot. Az átlagos szélesebség térbeli eloszlásában a felszín inhomogenitása, főleg a domborzat áramlasmódosító hatása erősen megnyilvánul. A napi átlagsebességek éves menetében a két alföldi (Ungvár és Huszt) és három folyóvölgyi mérőponton (Nagyberezna, Rahó és Ökörmező) tavaszi szélmaximum, míg további két folyóvölgyi (Alsóverecke és Alsóhidegpatak) és a két hegységi állomáson (Pláj és Pozsezszevszka) téli szélmaximum jelentkezik. Kárpátalján átlagban évente 86 szeles nap fordul elő, amikor a szél legerősebb lökésének sebessége eléri, vagy meghaladja a 10 m/s-t, ezek közül 15 nap viharos, ennyi alkalommal nagyobb a széllökés 15 m/s-nál is.

A szélesebbesség napi meneteiben a minimum (éjjel, Plájon nappal) és maximum (nappal, a Plájon éjszaka) szélesebbesség értékek közötti különbség nyáron legnagyobb, tavasszal és ősszel kisebb és legkisebb télen. Ezért tehát főleg télen és ősszel elég nagy biztonsággal számíthatunk arra, hogy a szélesebbesség és ezzel együtt a szélenergia napon belüli változása is az irányítás számára kedvezőbb módon, azaz egyenletesebben jelentkezik. Júliusban sokkal nagyobb a nappal és éjjel mért szélesebbesség értékek közötti különbség, mint januárban, ez a hőmérséklettel való szoros kapcsolatot jelzi.

A kilencből nyolc mérőponton a napi átlagos szélesebbeségek gyakorisági eloszlása leírható a Weibull-eloszlással. Az eloszlás paramétereinek meghatározására alkalmazott módszerek közül a Weibull 3 bizonyult a legjobbnak. A módszer a momentum-bebecslésre vezethető vissza, amelyhez ismernünk kell a szélesebbesség átlagát, szórását és a gamma-függvény tulajdonságait. A Weibull 3 eloszlás a teljes időszakra, az orográfiai környezettől függetlenül, Husztot kivéve mindenhol, a χ^2 -próba alapján 10%, 5% és 1% szignifikancia szinten elfogadható illeszkedést adott. Évszakos bontásban a Weibull 3 eloszlás az esetek 83%-ban bizonyult megfelelőnek a szélesebbeségek empirikus gyakorisági eloszlásainak közelítésére. Az eloszlás c paraméterének évszakos értékei a mérőpontokon követik a szélesebbesség átlagértékeit. A skálaparaméter és az állomások tengerszint feletti magassága között 5%-os szignifikancia szinten lineáris kapcsolat van ($r=0,84$). A skálaparaméter összvariáciájának 70%-a a tengerszint feletti magassággal való lineáris kapcsolattal magyarázható.

A Weibull-eloszlás k és c paramétereinek segítségével előállítottuk a szélesebbesség gyakorisági eloszlását $z=20, 40, 60, 80$ és 100 m-en is. Bebizonyosodott a Weibull-eloszlás egyik paramétere (n) és a Hellmann-féle kitevő (α) közötti kapcsolat, ami azonban további vizsgálatra szorul. Az α ugyanis a felszíni érdesség és számos légköri tényező függvénye, míg az n csak a mérési szint skálafaktorának és magasságának.

A szélesebbesség a magassággal együtt növekszik, így 100 m-en $2,2$ m/s (Huszt) és $7,7$ m/s (Pláj) között változik. Az összes állomást együttevén a terület átlagos szélesebbesége 100 m-en eléri a $4,0$ m/s-ot. Kárpátaljai viszonylatban a szélenergia felhasználásra, a módusz tekintetében is kedvező telephelynek bizonyul Ungvár és Pláj,

ahol a legvalószínűbb szélesebbesség 100 m-en eléri a 3,6 m/s-ot, illetve a 6,4 m/s-ot. A másik hegységi állomás, a Pozsezszevszka is viszonylag magas átlagos szélesebbességgel (100 m-en 5,9 m/s) rendelkezik, azonban a magas variációs együttható (100 m-en 0,7) és az alacsony módusz (100 m-en 2,8 m/s) miatt a szélturbinák folyamatos, kiegyenlített működése nem lehetséges. A legnagyobb energiát hordozó szélesebbesség (v_{maxE}) tekintetében a vártnak megfelelően minden magassági szinten Huszton kaptuk a legalacsonyabb értékeket (20 m-en 1,6 m/s, 100 m-en 2,9 m/s) és Pozsezszevszka-n a legmagasabbakat (20 m-en 9,6 m/s, 100 m-en 12,0 m/s). Az összes állomás közül a Pozsezszevszka-n jelentkeznek a legerősebb szelek és egyben a legnagyobb energiát hordozó szelek, de ezek időbeli eloszlása nem egyenletes.

A szélerőenergia hasznosítás és tervezés szempontjából az adott földrajzi helyen fontos ismernünk az energetikailag hasznosítható szélesebbességek ($3 \leq v < 25$ m/s) időtartamát. Ennek legmagasabb értékei a két hegységi állomáson, a Plájon és a Pozsezszevszka-n jelentkeznek. A Plájon 10 m-en átlagosan az év 62,7%-ban (100 m-en 90%-ban) üzemelne egy 3 m/s-os indító sebességgel és 25 m/s-os legnagyobb megengedett szélesebbességgel definiálható szélturbina. Ungváron, az alföldi részen ez az érték csupán 20% körül van (100 m-en 68,6%). A folyóvízi állomásokon pedig 6,8% (34,0%) Ökörmező és 30,2% (58,7%) Alsóverecke között változik. Az alföldi és folyóvízi állomásokon az átlagos folyamatos üzemidő 10 óra alatt van, míg a hegységeken átlagosan 10 óra felett. Ennek variációs együtthatója az összes állomáson magas értékeket mutat. A legváltozékonyabb e tekintetben Pozsezszevszka (1,54), Pláj (1,40) és Alsóverecke (1,23). A maximum üzemóraszám a két hegységi állomáson elérheti a 250 órát, ez több mint 10 nap folyamatos generátorműködést jelent. A folyamatos üzemidőtartamok maximumainak bekövetkezése az alföld és folyóvölgyek állomásain átlagosan tavaszra vagy a tél végére esnek, míg a hegységeken az ősz végére és télre.

A Weibull-eloszlás k és c paraméterének ismeretében a gamma-függvény ($\Gamma(x)$) segítségével meghatároztuk a mérőpontokon, az év és az egyes hónapok átlagos fajlagos széltejesítményét és mindezt elvégeztük a $z = 20, 40, 60, 80, 100$ m-es szintekre is. Kárpátalján a fajlagos széltejesítmény 100 m-en 9,3 W/m² (Huszt) és 506,8 W/m² (Pláj) között változik, ami igen nagy különbségnek mondható. Az al-

föld és a folyóvölgyek állomásaira a jellemző átlagos mennyiségek még 100 m-en is csupán 30-70 W/m² körül vannak, melyek viszonylag nagyon alacsonyak. Az állomások közül a fajlagos szélteljesítmény alapján ki kell emelnünk Ungvárt (100 m-en 76,0 W/m²), Pozsezevszkat (368,7 W/m²) és Plájt (506,8 W/m²), ahol ebben a magasságban, kárpátaljai viszonylatban, a legkedvezőbbek az energiahasznosítás feltételei. Az alföldi és folyóvölgyi állomásokon a 10 és 100 m-es magasságban a téli és a tavaszi hónapokra jut a legnagyobb és nyár végére a legkisebb fajlagos szélteljesítmény. Megállapítottuk, hogy a viszonylag nyitott környezettel rendelkező alföldi Ungváron a felszíntől emelkedve 10 m-enként kb. 0,7-szeresére, a szűk völgyekben található állomásokon szintén 0,7-szeresére, míg a hegyvidéki Plájon és Pozsezevszskán 0,6-szorosára növekszik a fajlagos szélteljesítmény. Ez azt jelenti, hogy az alföldön kb. 7-8 W/m²/10 m-es, a szűk völgyekben 3-5 W/m²/10 m-es, a hegygerinceken 30-35 W/m²/10 m-es növekedés jelentkezik a fajlagos szélteljesítményben.

Elvégeztük a havi átlagos fajlagos szélteljesítmény becslését közelítő függvény alapján, amelyet a szélsébség köbök mérési időpontonkénti (3 órás terminus idő) átlagainak napi menetére illesztünk. A közelítés relatív mértékét definiáló mérőszám (s_{0m}) alapján a közelítés legjobban sikerült Ungváron (0,93) és Nagybereznán (0,93), legkevésbé pedig Ökörmezőn (0,77) és Pozsezevszskán (0,73). Megvizsgáltuk a szélsébség napi menetében az egynapos (A_1/E) és a félnapos (A_2/E) periódusú hullám realitásának arányait a $p=0,17$ és $p=0,05$ szignifikancia szinten. A 9 állomást együtt kezelve megállapítható, hogy az egynapos hullám realitása főként a tavasz elejétől az ősz elejéig érvényesül legjobban, ősszel és télen a véletlenszerűsége növekszik. A szélsébség köbök 3 órás átlagára havonként illesztett trigonometrikus polinom félnapos periódusú hulláma tehát leginkább a késő tavaszi és nyári hónapokban mutat véletlenszerűséget a 0,17 szignifikancia szinten, a téli, kora tavaszi és őszi hónapokban realitásának gyakorisága megnövekszik. Ezekben az utóbbi hónapokban tehát számítani kell a szélergia napon belüli markáns változásaira: két minimális és két maximális értékre.

A szélklimatológiai, szélergetikai vizsgálatok egy szintén fontos szegmense a szélirányokra vonatkozó jellemzők és összefüggések feltárása. Általánosan elmondható, hogy az állomások empiri-

kus szélirányeloszlásai erősen tükrözik az orográfiai viszonyokat, különösen a szűk folyóvölgyekben. A jellemző irányok száma átlagosan 1 és 5 között mozog, az összes gyakoriságuk pedig 34,4% (Pláj) és 85,0% (Alsóhidegpatak) között. Az alföldi állomásokon és egy-egy szélesebb folyóvölgyben egyenletesebb eloszlást és több jellemző szélirányt láthatunk (3-5 között), ilyen Ungvár (az Ungi-síkon, az Ung-folyó völgyében), Huszt (a Huszti-kapuban, a Tisza völgyében), Nagyberezna (az Ung-folyó völgyének egy kiszélesedő szakaszán), Rahó (a Fekete-Tisza-folyó egy kiszélesedő szakaszán). A magasabb tengerszint feletti területeken, a felszínbe mélyen bevágódó folyóvölgyek állomásain viszont legfeljebb 1-3 meridionális jellemző irányt találunk, ezek: Ökörmező (a Nagyág-folyó völgyében), Alsóverecke (a Latorca-folyó völgyében), Alsóhidegpatak (a Fehérág-folyó völgyében). Az 1000 m feletti légrétegben elhelyezkedő két hegységi mérőpontban a DNY-i irány rendelkezik a legnagyobb átlagsebességgel, átlagosan 6,0 m/s-al. Az alföldön és a hegyvidéki folyóvölgyekben pedig az ÉNY, É és ÉK irányok a legszelesebbek, mintegy 2,5 m/s átlagsebességgel. A hegységi állomások jellemző szélirányainak átlagsebessége átlagosan 2,5-szer nagyobbak, mint az alföldi és folyóvölgyi állomásoké, a nem jellemző irányok esetében pedig ez az arány 2,0.

A jellemző szélirányok összes relatív energiatartalma éves viszonylatban 47,4% (Pláj) és 94,6% (Rahó) között változik. A jellemző szélirányok átlagos relatív energiatartalma pedig 16,0% (Ungvár) és 47,4% (Pláj) között van és a kevés jellemző iránnyal rendelkező folyóvölgyi és hegységi állomásokon jelentkeznek a magasabb értékek. A nem jellemző szélirányok átlagos relatív energiatartalma éves tekintetben 1,8% (Rahó) és 10,0% (Huszt) között alakul. Egy jellemző szélirány éves szinten átlagosan 8,0-szor több energiát szállít, mint egy nem jellemző irány, bár ennek értéke az állomások között erősen változik. A minimuma az orográfiailag legkevésbé zavart Ungváron (2,4) míg a maximuma a szélárnyékolás tekintetében legrosszabb környezetben fekvő Alsóvereckén (12,2) van. A szélirányok gyakorisága és sebessége, illetve relatív energiatartalma közötti kapcsolatot lineáris korrelációval és regresszióval vizsgáltuk. Megállapítottuk, hogy a szélirányok energiatartalmát nem a sebesség, hanem az előfordulás gyakorisága határozza meg elsősorban.

Tehát, hasznosítható-e a szélenergia Kárpátalján? Igen, de e téren főleg a hegyvidéki régióra lehet támaszkodni. Főként a Havasi-vonulat (Róna-, Borzsa-, Kuk-, Kraszna-havas) gerincein akár a hálózatra termelő ipari szélerőművek működésére is van reális esély az ottani szélmező tulajdonságai révén. A hálózatra termelő egységek mellett a kis- és közepes szigetüzemű rendszerek kiépítése is perspektivikus lenne, főleg a hegyvidék azon részein, ahol központosan nincs kiépített elektromos és telekommunikációs hálózat.

Kárpátalja alföldi részén viszont még a szélklíma szempontjából „legmegfelelőbb” területeken (pl. az Ungi-sík) sem lenne célszerű ipari, több megawattos szélerőművek telepítése, mivel itt, az ezek folyamatos, kiegyensúlyozott működéséhez nincs elegendő szélesség és szélerő.

Kárpátalja változatos domborzattal rendelkezik, emiatt belátható az is, hogy az ún. alapáramlás sebességét és valószínűleg irányát az orográfia igen nagymértékben módosít(hat)ja. A klimatológiaiilag optimálisnak mutató helyeken is elengedhetetlen a kifejezetten energetikai célú helyszíni szélmérés a szélerőmű telepítése előtt, hiszen akár kis területen belül is rövid idő alatt változhat meg a szélenergia mennyisége és járása, amely a szélerőművek villamosenergia-rendszerbe történő illesztését és a folyamatos ellátást veszélyeztethetik.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK ÉS IRODALOM

- Achkasova O.O. – Tretyakov O.S. [Ачкасова О.О., Третьяков О.С.] 2009: Гіс-модельювання швидкостей вітру центральної частини вовчанського району Харківської області України [GIS-modeling of wind speeds of central part of Vovchans'k district of Kharkiv region, Ukraine]. Проблеми безперервної географічної освіти і картографії, 9, 13-17 с.
- Adrianov M.S. [Адрианов М.С.] 1951: О циркуляционных факторах климата западных областей УССР [On the Circulating Factors of the Climate of the Western Regions of the USSR]. Издательство Львовского университета, „Географ”, 1, 24-29 с.
- Adrianov M.S. [Адрианов М.С.] 1957: Вертикальная термическая зональность Советских Карпат [Vertical thermal zonation of the Soviet Carpathians]. Издательство Львовского университета, „Географ”, 4, 126 с.
- Adrianov M.S. [Адрианов М.С.] 1965: Загальні відомості про клімат Радянських Карпат [General information about the climate of the Soviet Carpathians]. Науковий вісник Чернівецького університету: Географія, 22 (2), 156 с.
- Агарова О.Л. [Агапова О.Л.] 2016: Картографування для потреб альтернативної енергетики в Україні [Mapping for alternative energy in Ukraine]. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата географічних наук, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 230 с.
- Ahmed A. – Ademola Bello A. – Habou D. 2013: An evaluation of wind energy potential in the northern and southern regions of Nigeria on the basis of Weibull and Rayleigh models. American Journal of Energy Engineering, 1 (3), pp. 37-42.
- Anapolska L.E. – Handyn L.S. [Анапольська Л.Е., Гандин Л.С.] 1978: Ветроэнергетические ресурсы и методы их оценки [Wind energy resources and methods of their estimation]. Метеорология и гидрология, 7 (15), 11-17 с.
- Aujeszkzy L. 1949: Meteorológiai előmunkálatok a magasépítésben végzendő szélterhelés számításokhoz. Időjárás, 53, pp. 15-25.
- AWS Truepower 2012: Wind resource map of Europe. URL: <https://www.awstruepower.com/knowledge-center/maps/>
- Azad A.K. – Rasul M.G. – Yusaf T. 2014: Statistical Diagnosis of the Best Weibull Methods for Wind Power Assessment for Agricultural Applications. Energies, 7, pp. 3056-3085.

- Babychenko V.N. – Barabash M.B. – Lohvynov K.T. [Бабиченко В.Н., Барабаш М.Б., Логвинов К.Т. и др.] 1984: Природа Украинской ССР. Климат [The nature of the Ukrainian SSR. Climate]. Наукова думка, Київ, 117-122 с.
- Bank K. 2008: Kooperációs reményeink a Kárpát-medence megújuló energiaforrásainak hasznosításában. In: Fodor I., Suvák A. (szerk.): A fenntartható fejlődés és a megújuló természeti erőforrások környezetvédelmi összefüggései a Kárpát-medencében. MTA Regionális Kutatások Központja, Pécs, pp. 131-137.
- Bansal R. – Bati T.S. – Kothari D.P. 2002: On Some of the Design Aspects of Wind Energy Conversion Systems. Energy Conversion and Management, 43 (16), pp. 2175-2187.
- Baranka Gy. – Weidinger T. – Mészáros R. – Mikó R. – Kovács R. 2001: A planetáris határréteg szerkezete, szél- és hőmérsékleti profilja. Meteorológiai Tudományos Napok 2001: A légköri erőforrások hasznosításának meteorológiai alapjai, OMSZ kiadványa, pp. 109-119.
- Bárány I. – Vörös E. – Wagner R. 1970: The influence of the wind conditions of the Hungarian Alföld on the geographical distribution of mills. Acta Climatologica, 9 (1-4), pp. 73-81.
- Baranyi B. (szerk.) 2009: Kárpátalja. Dialóg Campus Kiadó, Pécs-Budapest, 547 p.
- Barstein M.F. [Барштейн М.Ф.] 1984: Воздействие ветра на здания и сооружения. Динамический расчет зданий и сооружений. Стройиздат, Москва, 169-196 с.
- Bartholy J. – Radics K. 2000a: Természetes felszínek áramlasmódosító hatásai. In: Kircsi A. (szerk.): Erdő és Klíma Konferencia III. kiadványa, DE, Meteorológiai Tanszék, Debrecen, pp. 121-131.
- Bartholy J. – Radics K. (szerk.) 2000b: A szélenergia hasznosítás lehetőségei a Kárpát-medencében. Egyetemi Meteorológiai Füzetek, Budapest, 14, 80 p.
- Bartholy J. – Radics K. 2001: Selected characteristics of wind climate and potential use of wind energy in Hungary. Part I. Időjárás, 105 (2), pp. 109-126.
- Bartholy J. – Radics K. – Bohoczky F. 2003: Present state of wind energy utilization in Hungary: policy, wind climate and modelling studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 7 (3), pp. 175-186.
- Bartier P.M. – Keller C.P. 1996: Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW). Computers and Geosciences, 22, pp. 795-799.
- Bashynska Yu. – Hamkalo Z. [Башинська Ю., Гамкало З.] 2018: Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії. Видавництво Старого Лева, Львів, 592 с.
- Belynskyi V.A. – Pobuyakho V.A. [Белинский В.А., Побияхо В.А.] 1964: Аэрология [Aerology]. Гидрометеониздат, Львов, 464 с.

- Berényi D. 1932: Hegy-völgyi szelek a Tiszántúlon. Időjárás, 36, pp. 81-89.
- Bertram R. – Primova R. (editors) 2018: Energy Atlas 2018. Heinrich Böll Foundation, Berlin, Germany, Friends of the Earth Europe, Brussels, Belgium, European Renewable Energies Federation, Brussels, Belgium, Green European Foundation, Luxembourg, 56 p. URL: www.boell.de/energyatlas
- Bíróné Kircsi A. 2007: Makroskálájú szélklimatológiai vizsgálatok az Észak-Atlanti térségben. Kedvesző széllel Kunhegyestől Debrecenig. Tiszteletkötet Dr. Tar Károly 60. születésnapjára, Debrecen, pp. 77-85.
- Bíróné Kircsi A. 2008: A szélenergia hasznosítás klimatológiai vonatkozásai. Doktori értekezés, Debreceni Egyetem, Meteorológiai Tanszék, 145 p.
- Bíróné Kircsi A. – Hadnagy I. 2013: Szélsebesség területi modellezése és verifikációja Debrecen példáján. In: Lóki József (szerk.): Az elmélet és gyakorlat találkozása a térinformatikában IV. Térinformatika konferencia és szakkiallítás. Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, pp. 135-142.
- Bíróné Kircsi A. – Lázár I. – Tar K. – Costea M. 2012a: Experience of 3D wind measurements with SODAR in Debrecen, Hungary. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Ambientum*, 57 (1-2), pp. 57-66.
- Bíróné Kircsi A. – Lázár I. – Vass R. 2012b: A szélsebesség területi modellezése a Hernád-völgyben. In: Lázár István (szerk.): A megújuló energiaforrások hasznosításának természeti, társadalmi és gazdasági lehetőségei a Hernád-völgyben. Debreceni Egyetem, Meteorológiai Tanszék, pp. 33-45.
- Bíróné Kircsi A. – Tar K. – Lázár I. 2011: Módszer a szélenergia potenciál meghatározására a Hernád-völgy példáján. In: Szabó Valéria, Fazekas István (szerk.): Környezettudatos energiatermelés és –felhasználás. MTA DAB Megújuló Energetikai Munkabizottság, Debrecen, 160-166.
- Bodnar V. [Боднар В. (ред.)] 1987: Природні багатства Закарпаття [Natural resources of Transcarpathia]. Карпати, Ужгород, 50-66 с.
- Bohoczky F. 2004: A megújuló energiaforrások magyarországi felhasználása, energiahatékonysági helyzetkép. Megújuló energiaforrások felhasználása, szakmapolitikai keretek és a fejlődés lehetőségei Magyarországon és az Európai Unióban. Budapest, 2004. május 17.
- Bonfils S. 2011: Modeling wind speed and wind power distributions in Rwanda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 925-935.
- Borja M.A. – Gonzalez R. – Mejía F. – Hacuz J.M. – Medrano M.C. – Saldaña R. 1998: Estado del Arte y Tendencias de la Tecnología Eolo-eléctrica. (In spanish) Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE/UNAM, México, 141 p.

- Boutelli H. – Djafour A. – Bilal M. 2019: Estimation of wind power density in Ouargla region using Weibull Distribution. *International Journal of Control, Energy and Electrical Engineering (CEEE)*, 8, pp.18-24.
- Bray J.R. – Curtis J.T. 1957: An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, 27, pp. 325-349.
- Buchynskiy I. [Бучиський І.] 1971: Клімат Українських Карпат [The climate of the Ukrainian Carpathians]. Наукова думка, Київ, 12-25 с.
- Byba V.V. – Chmyr J.V. [Биба В.В., Чмирь О.В.] 2013: Розвиток альтернативних джерел енергії як інструмент забезпечення енергетичної безпеки України [Alternative energy sources development as an instrument of the energy security of Ukraine]. *Modern directions of theoretical and applied researches* 2013, Полтава, pp. 1-11. URL:https://reposit.pntu.edu.ua/bitstream/PoltNTU/1991/1/doclad_byba_chmyr.pdf
- Carrillo C. – Cidrás J. – Díaz-Dorado E. – Obando-Montaño A.F. 2014: An Approach to Determine the Weibull Parameters for Wind Energy Analysis: The Case of Galicia (Spain). *Energies*, 7, pp. 2676-2700.
- Castro F.A. – Palma L.M. – Lopes A.S. 2003: Simulation of the Askervein flow. Part 1: Reynolds averaged Navier-Stokes equations (k-epsilon turbulence model). *Boundary-layer Meteorology*, 107 (3), pp. 501-530.
- Chomjak P. – Tomič P. 2008: Environmental Presumption of Wind Power Building in Slovakia. *Životné prostredie*, 42 (6), pp. 297-301.
- Chumanenko S.M. – Pisnya L.A. – Cherepnov I.A. [Чуманенко С.М., Пісня Л.А., Черепнов І.А.] 2015: Впровадження вітроенергетичного потенціалу України для середнього та малого бізнесу АПК [Wind power potential promotion in small and medium business of agricultural complexes]. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, 156, 626-635 с.
- Costa Rocha P.A. – Coelho de Sousa R. – Freitas de Andrade C. – Vieira da Silva M.E. 2012: Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. *Applied Energy*, 89, pp. 395-400.
- Cressie N. 1990: The Origins of Kriging. *Mathematical Geology*, 22, pp. 239-252.
- Csákerényi-Nagy G. – Lázár I. – Szegedi S. – Tóth T. 2014: A szélenergia hasznosításának gyakorlati alkalmazhatósága alacsony beépítésű városi környezetben. In: Szabó V., Fazekas I. (szerk.): *Környezettudatos energiatermelés és -felhasználás III. MTA DAB Megújuló Energetikai Munkabizottsága*, Debrecen, pp. 77-82.

- Csikós N. – Szilassi P. 2015: Szélerőmű-park kialakítására alkalmas terület kiválasztása geoinformatikai módszerekkel Csongrád megye példáján. *Légkör*, 60, pp. 98-103.
- Davenport A.G. – Grimmond C.S.B. – Oke T.R. – Wieringa J. 2000: Estimating the roughness of cities and sheltered country. *Proceed. 12th Conf Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston*, pp. 96-99.
- De Renzo D. [де Рензо Д. (ред.)] 1982: Ветроэнергетика [Wind power]. Энергоатомиздат, Москва, 272 с.
- Derevska K.I. – Burlachenko J.V. – Borysenko K.A. (Деревська К.І., Бурлаченко Ю.В., Борисенко К.А.) 2019: Проблема вибору місць розташування вес. приклад Полонини Боржава в Українських Карпатах [The problem of selection of wind power plants locations the example of Borzhava massif in the Ukrainian Scarpethians]. VI. Міжнародна науково-практична конференція «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування». Трускавець, с. 1-6.
- Dévényi D. – Gulyás O. 1988: Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. Tankönyvkiadó, Budapest, 443 p.
- Derzhfektivnosti [Держефективності] 2021: Інформація щодо потужності та обсягів виробництва електроенергії об'єктами відновлюваної електроенергетики ким встановлено «зелений» тариф (станом на 01.04.2020) [Information on capacity and volume of electricity production by renewable energy facilities]. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України, 4 р. URL: https://saee.gov.ua/sites/default/files/1_kv_2020_VDE.pdf
<https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2021/04/konechenkov-wind.pdf>
- Dmytrenko L. – Barandych S. [Дмитренко Л., Барандич С.] 2007: Вітроенергетичні ресурси в Україні [Wind energy resources in Ukraine]. Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту, Науковий вісник, 256, 166-173 с.
- Dobi I. – Mika J. 2007: Adalékok a nap- és széleenergia felhasználásához az IPCC 2007. évi negyedik jelentéséhez kapcsolódva. Kedvező széllel Kunhegyestől Debrecenig. Tiszteletkötet Dr. Tar Károly 60. születésnapjára, pp. 101-109.
- Dobi I. – Varga B. – Tar K. – Tóth L. – Gergen I. – Csenterics D. 2006: Summary of Hungarian wind and solar energy. In: *Proceedings of International Conference on Climate Change: Impact and Responses in Central and Eastern European Countries*, pp. 289-293.
- Dobosi Z. – Felméry L. 1971: Klimatológia. Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, Budapest, 310 p.

- Dokur E. – Kurban M. 2015: Wind Speed Potential Analysis Based on Weibull Distribution. *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, Special Issue, 3 (4), pp. 231-235.
- Drew D.R. – Barlow J.F. – Cockerill T.T. 2013: Estimating the potential yield of small wind turbines in urban areas: A case study for Greater London, UK. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 115, pp. 104-111.
- Éghajlati összesítő [Справочник по климату СССР]. Украинская ССР. Ветер. 10 (3), Под. ред. Березиной С., Гидрометеиздат, Львов, 682 с.
- Emeis S. 2013: Wind Energy Meteorology. *Atmospheric Physics for Wind Power Generation*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 193 p.
- Engelbart D. – Steinhagen H. – Garsdorf U. – Neisser J. – Kirtzel H. – Peters G. 1999: First results of measurements with a newly-designed phased-array sodar with RASS. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 71, pp. 61-68.
- EurObserv'ER 2020: Wind Energy Barometer 2019 (Paris: March 2020), 7 p. URL: <https://www.eurobserv-er.org/wind-energy-barometer-2020/>
- EWEA (European Wind Energy Association) 2021: Wind energy in Europe – 2020. Statistics and the outlook for 2021-2025 (February 2021). 37 p. URL: https://s1.eestatic.com/2021/02/24/actualidad/210224_windeurope_combined_2020_stats.pdf
- Fidy J. – Makara G. 2005: Biostatistika. InforMed Kiadó, Budapest <http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/biostatistika-1/adatok.html>
- Figuerola-Espinoza B. – Salles P. 2014: On the wind power potential in the northwest of the Yucatan Peninsula in Mexico. *Atmósfera*, 27 (1), pp. 77-89.
- Fiskus O. (szerk.) 2005: Szélerergia és természetvédelem. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium Természetvédelmi Hivatala, Budapest, 15 p.
- Foken T. 2008: *Micrometeorology*. Springer, Heidelberg, 308 p.
- Francis F.A. – Nalamutt T.D. 2019: Statistical analysis of wind speed and evaluation of wind power density for Colaba, Mumbai. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, 10 (1), pp. 20-33.
- Galbičková B. – Bartošová Á. – Soldán M. 2014: Possibilities of using alternative energy sources in Slovakia. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 22, pp. 55-59.
- Global Wind Atlas 2018: Mean Wind Speed, Wind Power Density. GWA 2.3. URL: <https://globalwindatlas.info>
- Gombosné Nagy I. 2009: A Hajdúsági löszhát vízkészlet-kazdálkodási fejlesztésének térinformatikai értékelése. Doktori értekezés, Debreceni Egyetem, Víz- és Környezetgazdálkodási Tanszék, Debrecen, 137 p.

- González-Longatt F. – Medina H. – González J.S. 2015: Spatial interpolation and orographic correction to estimate wind energy resource in Venezuela. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, pp. 1-16.
- Gunturu U.B. – Schlosser C.A. 2012: Characterization of wind power resource in the United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, pp. 9687-9702.
- GWEC (Global Wind Energy Council) 2018: Global Wind Report – Annual Market Update 2017. (Brussels: February 2018). 72 p. URL: <http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/>
- GWEC (Global Wind Energy Council) 2019: Global Wind Report 2018 (Brussels: April 2019). 61 p. URL: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>
- GWEC (GWEC (Global Wind Energy Council) 2021: Global Wind Report 2020 (Brussels: March 2021). 80 p. URL: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>
- Habrel M.S. [Габрель М.С.] 2013: Особливості використання нетрадиційних та відновлюваних джерел енергозбереження у промисловості регіону [Features of the use of non-traditional and renewable energy sources in the region's industry]. *Всеукраїнський науково-виробничий журнал: Інноваційна економіка*, 40 (2), 101-106 с.
- Hadnagy I. – Tar K. 2018: A felszínközeli szélmező energetikai jellemzői Kárpátalján [Energy characteristics of the near-surface wind field in Transcarpathia]. In: Fazekas I. – Kiss E. – Lázár I. (szerk.): *Földrajzi tanulmányok 2018*. MTA DTB Földtudományi Szakbizottság, Debrecen, pp. 161-165.
- Hadnagy I. – Tar K. 2019a: The approximation of wind speed distributions with theoretical distributions of meteorological stations located in different orographic conditions. *Időjárás, Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 123 (3), pp. 329-349.
- Hadnagy I. – Tar K. 2019b: Determination of Energy Parameters of Near Surface Wind Field in Transcarpathia. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9 (1), pp. 437-447.
- Hadnagy I. – Tar K. 2019c: Szélirányok energetikai paramétereinek területi eltérése Kárpátalján. *Légkör*, 64 (3), pp. 115-121.
- Hadnagy I. – Tar K. – Molnár J. [Гаднадь І., Тар К., Молнар Й.] 2020: Сучасний стан та перспективи розвитку вітрової енергетики у світі, Європі та в Україні, зокрема на Закарпатті [Analysis of the current state of wind power in the world, Europe and Ukraine, especially in Transcarpathia]. *Український географічний журнал*, 109 (1), 59-70 с.

- Haidayenko I. [Гайдаєнко І.] 2013: Альтернативна енергетика в Україні: стан та перспективи розвитку [Alternative energy in Ukraine: status and prospects]. Нукові записки з української історії, збірник наукових статей, 34, 146-151 с.
- Hammar L. 2011: Distribution of Wind and Solar Energy Resources in Tanzania and Mozambique. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, Report 5, 12 p.
- Hegyfoky K. 1894: A szél iránya a Magyar Szent Korona országaiban. Királyi Magyar Természettudományi Társulat, Budapest, 173 p.
- Henessey J.P. 1977: Some aspects of wind power statistics. Journal of Applied Meteorology, 16, pp. 119-128.
- Herenchuk K. (Геренчук К. (ред.)) 1981: Природа Українських Карпат [The nature of the Ukrainian Carpathians]. Вища школа, Львівський університет, 156 с.
- Hou Y. – Peng Y. – Johnson A.L. – Shi J. 2012: Empirical Analysis of Wind Power Potential at Multiple Heights for North Dakota Wind Observation Sites. Energy Science and Technology, 4 (1), pp. 1-9.
- Hunyár M. 2004: A szélerergia potenciál hasznosítását korlátozó tényezők Magyarországon. Magyar Energetika, 4, pp. 3-10.
- Hunyár M. – Tar K. – Tóth P. 2004: Magyarország szélerergia potenciálja. Energiagazdálkodás, 45 (6), pp. 20-25.
- Hurter S. – Schellschmidt R. 2003: Atlas of geothermal resources in Europe. Geothermics, 32 (4-6), pp. 779-787.
- Huzsvai L. – Vincze Sz. 2012: SPSS könyv. Seneca Books, 325 p.
- IEA (International Energy Agency) 2005: Variability of Wind Power and others Renewables: Management Options and Strategies. IEA/OECD, Paris, 57 p. URL: <http://www.iea.org/textbase/papers/2005/variability.pdf>
- IEA (International Energy Agency) 2021: Electricity Statistics. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020. URL: <https://www.iea.org/statistics/electricity/>
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. IPCC, Cambridge University Press, pp. 3949.
- IRENA 2021: Renewable Energy Statistics 2021. The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 460 p. URL: <https://irena.org/publications/2021/Aug/Renewable-energy-statistics-2021>

- IRENA 2015: REmap 2030. Renewable Energy Prospect for Ukraine [Перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні]. Abu Dhabi (2015 February), IRENA. 53 p. URL: www.irena.org/remap
- Ivus G.P. – Semergey-Chumachenko A.B. – Zubkovich S.A. [Івус Г.П., Семергей-Чумаченко А.Б., Зубкович С.О.] 2009: Статистичні характеристики швидкості вітру над сходом України у січні на фоні кліматичних змін [Statistical characteristics of wind velocity over east Ukraine in January in the conditions of climate change]. Фізична географія та геоморфологія, 57, pp. 23-28.
- Ivus G.P. – Semerhei-Chumachenko A.B. – Ahaiar E.V. – Vakhovska H.O. [Івус Г.П., Семергей-Чумаченко А.Б., Агайар Е.В., Ваховська Г.О.] 2010: Динаміка формування приземного вітру в районі Севастополя за 20-річний період [The dynamic of surface wind formation near Sebastopol during 20 years]. Вісник ОДЕУ, 10, 80-87 с.
- Jamdade Sh.G. – Jamdade P.G. 2012: Analysis of Wind Speed Data for Four Locations in Ireland based on Weibull Distribution's Linear Regression Model. International Journal of Renewable Energy Research, 2 (3), pp. 451-455.
- Justus C.G. – Hargraves W.R. – Amir M. – Graber D. 1978: Method for estimating wind speed frequency distributions. Journal of Applied Meteorology, 17 (3), pp. 350-353.
- Justyák J. 2002: Magyarország éghajlata. Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 118 p.
- Kárpátalja atlasza [Атлас. Закарпатська область] 1991, СССР Комитет геодезии та картографии, Москва, 26 с.
- Kárpátalja energiahatékonysági és energiatakarékossági programja a 2016-2020-as évekre (Програма енергоефективності та енергозбереження Закарпатської області на 2016-2020 pp.). Закарпатська обласна державна адміністрація. Рішення обласної ради 17.03.2016 №189, 19 с. URL: <http://www.carpathia.gov.ua/ua/490.htm>
- КМА (Kárpátaljai Megyei Adminisztráció) 2020: A megújuló energetika fejlesztése Kárpátalján (Розвиток відновлювальної енергетики в Закарпатській області). URL: <https://oda.carpathia.gov.ua/storinka/rozvytok-vidnovlyuvalnoyi-energetyky-v-zakarpatskiy-oblasti-0>
- КМÁАÖTESZ (Kárpátaljai Megyei Állami Adminisztráció Ökológiai és Természeti Erőforrások Szakosztálya [Департмент Екології та Природних Ресурсів Закарпатської Обласної Державної Адміністрації]) 2016: Природно-заповідний фонд. URL: http://ecozakarp.at.gov.ua/?page_id=1655

- KMÁAÖTESZ (Kárpátaljai Megyei Állami Adminisztráció Ökológiai és Természeti Erőforrások Szakosztálya [Департамент Екології та Природних Ресурсів Закарпатської Обласної Державної Адміністрації]) 2019: Висновок з оцінки впливу на довкілля планової діяльності «Будівництво ВЕС 120 МВт на територія Воловецького та Свалявського району Закарпатської області». Ужгород, с. 124. URL: <http://eia.menr.gov.ua/uploads/documents/1379/reports/31da551ddaec324905884fad832e987d.pdf>
- Kartashov M.V. [Карташов М.В.] 2008: Імовірність, процеси, статистика [Probability, processes, statistics]. ВПЦ „Київський університет”, Київ, 504 с.
- Kertész S. – Szépszó G. – Lábó E. – Radnóti G. – Horányi A. 2005: Magyarország szélklíma előállítása globális mezők dinamikai leskáázásával. Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei. OMSZ, Budapest, pp. 82-93.
- Keskin M. – Dogru A.O. – Balcik F.B. – Goksel C. – Ulugtekin N. – Sozen S. 2015: Comparing Spatial Interpolation Methods for Mapping Meteorological Data in Turkey. *Energy Systems and Management, Springer Proceedings in Energy*, 3, pp. 33-42.
- Keveiné Bárányi I. 1991: A szélerő hasznosítás éghajlati adottságai az Alföldön. *Földrajzi Értesítő*, 40 (3-4), pp. 55-69.
- Keyhani A. – Ghasemi-Varnamkhasti M. – Khanali M. – Abbaszadeh R. 2010: An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran. *Energy*, 35, pp. 188-201.
- Khan P.A. – Halder P.K. – Rahman S. 2014: Wind energy potential estimation for different regions of Bangladesh. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy* 3 (3), pp 47-52.
- Kidmo D.K. – Danwe R. – Doka S.Y. – Djongyang N. 2015: Statistical analysis of wind speed distribution based on six Weibull Methods for wind power evaluation in Garoua, Cameroon. *Revue des Energies Renouvelables*, 18 (1), pp. 105-125.
- Kinash R.I. – Huk Ya.S. [Кінаш Р.І., Гук Я.С.] 2006: Методика розрахунку параметрів вітру для населених пунктів Закарпатської області, вершин і перевалів Карпат [Method of calculation of wind parameters for settlements of Transcarpathian region, peaks and passes of Carpathians]. *Металеві конструкції*, 11 (3), 209-216 с.
- Kinash R.I. – Huk Ya.S. [Кінаш Р.І., Гук Я.С.] 2010: Районування території Закарпатської області за вітровим навантаженням. *Збірник наукових праць УНДПІ сталевих конструкцій ім.В.М. Шімановського*, 5, 117-123 с.

- Kinash R.I. – Pichuhin S.F. – Huk Ya.S. [Кінаш Р.І., Пічугін С.Ф., Гук Я.С.] 2016: Визначення характеристичних значень вітрового тиску в липні і січні для дев'яти вершин карпат Закарпатської області [Determining of characteristic values of wind pressure in July and January for 9 carpathian peaks of Transcarpathian region]. Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво, 2 (47), 178-187 с.
- Kircsi A. – Tar K. 2008: Profile-tests for utilizing wind energy. *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica*, 4, pp. 107-123.
- Kircsi A. 2004: Szélsebesség adatok területi extrapolációja – lehetőségek és nehézségek. *A Magyar Szélenergia Társaság kiadványai*, 2, pp. 71-78.
- Kleyevska V.L. – Polishhuk O.O. [Клеєвська В.Л., Поліщук О.О.] 2010: Приземні метеорологічні спостереження [Ground-based meteorological observations]. Національний аерокосмічний інститут «Харківський авіаційний інститут», Харків, 52 с.
- КМНМК 2016: Kárpátaljai Megyei Hidrometeorológiai Központ adatai, Ungvár [Закарпатський обласний центр з гідрометеорології, Ужгород]. URL: <http://gmc.uzhgorod.ua/meteostations.php>
- Koppány Gy. 1978: Távprognosztika II. Tankönyvkiadó, Budapest, 174 p.
- Koppány Gy. 1989: Légköri erőforrások. JATE TTK, Szeged, 104 p.
- Koppány Gy. 2009: Potenciális szélenergia Európában és Magyarországon. *Légekör*, 54 (2), pp. 30-31.
- Kostohrizova N.O. – Dubrovskaya V.V. – Shklyar V.I. [Костоґрізова Н.О., Дубровська В.В., Шкляр В.І.] 2014: Статистичний аналіз результатів виміру швидкостей вітру [Statistical analysis of wind speed measurement results]. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2, 52-57 с.
- Kravchyshyn V.S. – Medykovskiy M.O. – Halushhak M.O. [Кравчишин В.С., Медиковський М.О., Галушак М.О.] 2016: Моделювання енергетичного потенціалу вітрової електричної станції [Modeling of energy potential of a wind power plant]. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Інформаційні системи та мережі, 854, 80-87 с.
- Kudrya S.O. – Yatsenko L.V. – Dushyna H.P. – Shynkarenko L.Ya. – Dovha V.T. – Vasko P.F. – Bryl A.O. – Shurchkov A.V. – Zabarnyi H.M. – Zhovmir M.M. – Vikharyev Yu.A. [Кудря С.О., Яценко Л.В., Душина Г.П., Шинкаренко Л.Я., Довга В.Т., Васько П.Ф., Бриль А.О., Шурчков А.В., Забарний Г.М., Жовмір М.М., Віхарев Ю.А.] 2001: Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України: Енергія вітру [Atlas of Energy Potential of

- Renewable and Unconventional Energy Sources in Ukraine: Wind Energy]. НАНУ, Інститут електродинаміки. Київ, 42 с.
- Kurbatova T. – Khlyap H. 2015: State and economic prospects of developing potential of non-renewable and renewable energy resources in Ukraine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52, pp. 217-226.
- Kurbatova T. – Sotnyka I. – Khlyap H. 2014: Economical mechanisms for renewable energy stimulation in Ukraine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, pp. 486-491.
- Lavnyi V. – Lässig R. [Лавний В., Lässig R.] 2009: Сильні вітри в Українських Карпат [Characteristic of Storms in the Ukrainian Carpathians]. *Науковий вісник НЛТУ України*, 19 (4), 239-246 с.
- Lázár I. 2015: Székelyföld szélklimájának statisztikai jellemzése. *Doktori értekezés*, Debreceni Egyetem, Debrecen, 158 p.
- Lázár I. – Csákberényi-Nagy G. – Túri Z. – Szegedi S. – Tóth J.B. – Tóth T. 2014: A szélpotenciált befolyásoló tényezők vizsgálata alacsony beépítésű városi környezetben. In: Szabó V., Fazekas I. (szerk.): *Környezettudatos energiatermelés és -felhasználás III. MTA DAB Megújuló Energetikai Munkabizottsága*, Debrecen, pp. 71-76.
- Lee J.C.Y. – Fields M.J. – Lundquist J.K. 2018: Assessing variability of wind speed: comparison and validation of 27 methodologies. *Wind Energy Science*, 3, pp. 845–868.
- Leithead W.E. 2007: Wind energy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365, pp. 957-970.
- Lopatka S.S. [Лопатка С.С.] 2004: Визначення профілів вітрового тиску на висотних конструкціях м. Львова методом безпосереднього вимірювання [Determination of wind pressure profiles at high-rise structures in Lviv by direct measurement method]. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, 495: Теорія і практика будівництва, 111-114 с.
- Lopes A.S. – Palma L.M. – Castro F.A. 2007: Simulation of the askervein flow. Part 2: Large-eddy simulations. *Boundary-layer Meteorology*, 125 (1), pp. 85-108.
- Lysen E.H. 1982: *Introduction to Wind Energy*. Publication CWD 82-1., Amesfoort, 309 p.
- Lyubimov O.D. – Kovalenko V.M. – Chubenko A.I. [Любимов О.Д., Коваленко В.М., Чубенко А.І.] 2011: Методика оброблення статистичних даних параметрів вітру для прийняття рішення щодо розміщення вітроенергоустановки в конкретному регіоні [The technique of processing statistics of wind parameters to decide on the location of wind farms in a specific region]. *Електроніка та системи управління*, 28 (2), 116-119 с.

- Makarovskiy Ye. – Zinych V. 2014: Wind energy potential assessment of Ukraine. *Geographia*, 58 (2), București, pp. 169-178.
- Maklad Y. – Glencross-Grant R. 2014: A Seasonal Analysis of Potential Wind Power for Armidale NSW, Australia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 4 (1), pp. 92-107.
- Makra L. – Tar K. – Horváth Sz. 2000: Some statistical characteristics of the wind energy over the Great Hungarian Plane. *International Journal of Ambient Energy*, 21 (2), pp. 85-96.
- Maksymov V.S. – Shven N.I. – Hil H.M. – Shoshyn V.M. – Kovalska L.H. [Максимов В.С., Швень Н.І., Гіль Г.М., Шошин В.М., Ковальська Л.Г.] 2011: Настанова гідрометеорологічним станціям і постам [Instruction to meteorological stations and posts]. Керівний документ. Метеорологічні спостереження на станціях, 3 (1). Державна гідрометеорологічна служба, УкрНДГМІ, ЦГО, Київ, 288 с.
- Mandryk O.M. [Мандрик О.М.] 2016: Аналіз використання потенціалу вітрової і сонячної енергії в Карпатському регіоні [Analysis of the use of wind and solar energy potential in the Carpathian region]. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування, 1, 158-166 с.
- Martazinova V.F. – Chaika D.Y. [Мартазинова В.Ф., Чайка Д.Ю.] 2009: Пространственное изменение поля давления воздуха над северным полушарием в период глобального потепления [Spatial change of sea-level pressure field above the Northern hemisphere during the period of global warming]. Фізична географія та геоморфологія, ВГЛ «Обрії», 57, 196 с.
- Masters G.M. 2004: *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley and Sons, Stanford University, USA, 95 p.
- Matyasovszky I. 2002: *Statisztikus klimatológia. Időszak elemzése*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 317 p.
- Mezősi M. – Simon A. 1981: A meteorológiai szélméreés elmélete és gyakorlata. *Meteorológiai Tanulmányok*, 36, OMSZ, Budapest
- Mika J. – Csabai E. – Dobi I. – Molnár Zs. – Nagy Z. – Rázyi A. – Tóth-Tarjányi Zs. – Pajtók-Tari I. 2014: Solar and wind energy resources of the Eger region. *Hungarian Geographical Bulletin*, 63 (1), pp. 17-27.
- Milligan M. – Schwartz M. – Wan Y. 2003: Statistical wind power forecasting models: results for U.S. wind farms, *Windpower 2003*, Austin, Texas, p. 17.
- Millward-Hopkins J.T. – Tomlin A.S. – Ma L. – Ingham D.B. – Pourkashanian M. 2013: Assessing the potencial of urban wind energy in major UK city using analytical model. *Renewable Energy*, 60, pp. 701-710.

- Molodan Ya.S. [Молодан Я.Є.] 2013: Сучасні підходи до оцінки та аналізу основних вітрових характеристик для цілей вітроенергетики [Modern approaches to the evaluation and analysis of the main wind's characteristics for the purposes of wind power]. ХНУ імені В.Н. Каразіна, Збірник наукових праць, 18, 115-199 с.
- Morgan V.T. 1995: Statistical distributions of wind parameters at Sydney, Australia. *Renewable Energy*, 6 (1), pp. 39-47.
- Morgan E.C. – Lackner M. – Vogel M.R. – Baise G.L. 2011: Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Conversion and Management*, 52, pp. 15-26.
- Mortensen N.G. – Landsberg L. – Troen I. – Petersen E.L. 1993: Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP). Risø Nat. Labs, Roskilde, Denmark, 126 p.
- Moskalchuk H.M. [Москальчук Н.М.] 2017: Перспективи вітроенергетики на Прикарпатті [Prospects for wind power in the Carpathian region]. ІФНТУНГ, Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування, 1 (15), 1-12 с.
- Moskalchuk H.M. – Prykhodko M.M. [Москальчук Н.М., Приходько М.М.] 2017: Оцінювання вітроенергетичного потенціалу Карпатського регіону України [The assessment of wind energy potential within the Carpathian region of Ukraine]. Науковий вісник НЛТУ України, 27 (1), 125-128 с.
- MSZIT [Magyar Szélerenergia Ipari Társaság] 2019: Szélerőművek Magyarországon. URL: <http://www.mszt.hu/dokumentumok/szeleromuvek-magyarorszagon/>
- Nekos A.N. – Molodan Ya.Ye. [Некос А.Н., Молодан Я.Є.] 2012: Оцінка вітрового режиму території Харківської області для цілей вітроенергетики [Assessment of the wind regime of the Kharkiv region for the purposes of wind power]. Людина та довкілля. Проблеми неоекології, 3 (4), 69-77 с.
- Nfaoui H. – Buret J. – Sayigh A.A.M. 1998: Wind characteristics and wind energy potential in Morocco. *Solar Energy*, 63 (1), pp. 51-60.
- Obádovics J.Gy. 2003: Valószínűség számítás és matematikai statisztika. *Scolar Kiadó*, Budapest, 334 p.
- Olaofe O.Z. – Folly K.A. 2012: Statistical Analysis of the Wind Resources at Darling for Energy Production. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2 (2), pp. 250-261.
- Oleiko V.M. – Strelbitska N.Ye. [Олейко В.М., Стрельбіцька Н.Є.] 2011: Енергетичний потенціал НВДЕ областей України [Energy potential nonconventional and renewable energy sources of areas of Ukraine]. Енергосбережение - Энергетика - Энергоаудит, 3 (85), 35-42 с.

- OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat) 2017a: Magyarország szél viszonyai. URL:http://met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/szel/
- OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat) 2017b: CarpatClim - A Kárpát-régió éghajlata. Digitális éghajlati atlasz. URL: http://www.met.hu/omsz/palyazatok_projektek/carpatclim/bevezeto/
- Osadchyi V.I. – Skrynyk O.A. – Skrynyk O.Ya. – Radchenko R.Yu. [Осадчий В.І., Скриник О.А., Скриник О.Я., Радченко Р.Ю.] 2014: Вітроенергетичні ресурси Українських Карпат [Wind energy resources of the Ukrainian Carpathians]. Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. Науковий вісник, 266, 3-11 с.
- Osadchyi V.I. – Skrynyk O.A. – Skrynyk O.Ya. [Осадчий В.І., Скриник О.А., Скриник О.Я.] 2015: Оцінка сучасного стану вітрових ресурсів Українських Карпат та їх зміни відносно базового кліматичного періоду [Estimation of a modern stage of wind resources in the Ukrainian Carpathians and their changes regarding the base climatological period]. Електронний ресурс, Доповіді Національної академії наук України, 8, 95-99 с.
- Oshurok D.O. [Ошурок Д.О.] 2017: Кліматологічна оцінка вітроенергетичних ресурсів обмежених територій [Climatological assessment of wind resources of small-scale areas]. Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 44 (1), 120-130 с.
- Oshurok D.O. [Ошурок Д.О.] 2020: Вітроенергетичні ресурси України в сучасних кліматичних умовах [Wind energy resources in Ukraine under the current climatic conditions. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Міністерство освіти і науки України, Київ, 204 с.
- Ozarkiv M.I. – Kulchytskyi-Zhyhailo I.Ye. – Dzhyhyrei V.S. [Озарків М.І., Кульчицький-Жигайло І.Є., Джигирей В.С.] 2009: Вплив альтернативно-відновлюваних джерел енергії на довкілля [The impact of alternative-renewable energy sources on the environment]. Науковий вісник НЛТУ України, 19 (3), 58-67 с.
- Ozay C. – Soner M. – Celiktaş A. 2016: Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alaçatı region. Energy Conversion and Management, 121, pp. 49-54.
- Özgönenel O.W.P. – Thomas D. 2012: Short-term wind speed estimation based on weather data. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 20 (3), pp. 335-346.

- Özgür M.A. – 2014: ANN-based evaluation of wind power generation: A case study in Kutahya, Turkey. *Journal of Energy in Southern Africa*, 25 (4), pp. 11-22.
- Palomino I. – Martin F. 1994: A Simple Method for Spatial Interpolation of the Wind in Complex Terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 34, pp. 1678-1693.
- Pap S. [Поп С.] 2003: Природні ресурси Закарпаття [Transcarpathian natural resources]. УжНУ, Ужгород, 291 с.
- Patay I. 2003: A szélenergia hasznosítása. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 119 p.
- Patay I. – Tóth L. – Schrempf N. 2008: A függőleges szélprofil hatása szél-erőművek üzemére. Első európai szélnap Magyarországon. Debrecen, 2007. június 15. Magyar Szélenergia Társaság kiadványai, 4, pp.33-42.
- Patel M.R. 2006: Wind and solar power systems: design analysis, and operation. 2nd ed. CRC Press, Florida (USA), 473 p.
- Péczeley 1957: Áramlási viszonyok Magyarországon különböző makroszinoptikus helyzetekben. *Időjárás*, 61, pp. 408-419.
- Péczeley Gy. 1963: A Magyar Alföld és a környező hegyvidék légcseréje. *Időjárás*, 67, pp. 233-238.
- Péczeley Gy. 1998: Eghajlatlan. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 336 p.
- Petruk V.H. – Kotsyubynska S.S. – Matsyuk D.V. [Петрук В.Г., Коцюбинська С.С., Мацюк Д.В.] 2011: Аналіз сучасного стану альтернативної енергетики та рекомендації по екологізації паливно-енергетичного комплексу України [Analysis of the current state of alternative energy and recommendations for greening the fuel and energy complex of Ukraine]. Збірник матеріалів II-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю, Альтернативна енергетика та ресурсоенергозбереження, Вінниця, 1-4 с. URL: http://eco.com.ua/sites/eco.com.ua/files/lib1/konf/2vze/zb_m/0069_zb_m_2VZE.pdf
- Pivnyak H. – Skrabets F. – Nojberher N. – Tsyolenkov D. [Півняк Г., Шкрабець Ф., Нойбергер Н., Циценков Д.] 2015: Основи вітроенергетики [Fundamentals of wind power]. МОН України, НГУ, Дніпро, 335 с.
- Pivnyak H. – Skrabets F. [Півняк Г., Шкрабець Ф.] 2013: Альтернативна енергетика в Україні: монографія [Alternative energy in Ukraine: monograph]. Національний гірничий університет, Дніпро, 109 с.
- Polishhuk V.M. [Поліщук В.М.] 2010: Сучасний стан та перспективи розвитку вітроенергетики [The current state and prospects of wind power development]. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування, 144 (4), 361-369 с.

- Prodius O.I. [Продіус О.І.] 2009: Основні напрямки енергозбереження в Україні в контексті світових тенденцій розвитку [The general tendencies in energy saving in Ukraine the context of world developments trends]. Труды Одесского политехнического университета, 1 (31), 184-188 c.
- Prutska O.O. – Fedyk O.Yu. [Прутська О.О., Федик О.Ю.] 2012: Сучасний стан та проблеми розвитку альтернативної енергетики в Україні [Current situation and problems of alternative energy in Ukraine]. Збірник наукових праць ВНАУ, серія: Економічні науки, 1 (56), 158-164 c.
- Pryhotko H.F. – Tkachenko A.V. – Babychenko V.N. [Прихотько Г.Ф. (ред.), Ткаченко А.В., Бабиченко В.Н.] 1967: Климат Украины [The climate of Ukraine]. Гидрометеоиздат, Львів, 413 c.
- Radics K. 1999: Mért és modellezett szélmezők összehasonlító elemzése. Egyetemi Meteorológiai Füzetek, 13. pp. 57-62.
- Radics K. 2004: A szélenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon: hazánk szélklímája, a rendelkezésre álló szélenergia becslése és modellezése. Doktori értekezés, ELTE, Budapest, 137 p.
- Radics K. – Bartholy J. 2002: Selected characteristics of wind climate and potential use of wind energy in Hungary. P-II. Időjárás, 106 (2), pp. 59-74.
- Radics K. – Bartholy J, 2005: Magyarország modellezett szélenergia térképei. Szélenergia Magyarországon, MSZET, Gödöllő, pp. 19-21.
- Raihenbah T.M. [Райхенбах Т.М.] 2010: Енергетичний потенціал нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії [Energy potential of non-traditional and renewable energy sources]. Університетські наукові записки, 2 (34), 332-339 c.
- Rasham A.M. 2016: Analysis of Wind Speed Data and Annual Energy Potential at Three locations in Iraq. International Journal of Computer Applications, 137 (11), pp. 5-16.
- Rehman Sh. – Halawani T.O. – Tahir H. 1994: Weibull parameters for wind speed distribution in Saudi Arabia. Solar Energy, 53 (6), pp. 473-479.
- Reimann J. – Tóth J. 1995: Valószínűségyszámítás és matematikai statisztika. Tankönyvkiadó, Budapest, 269 p.
- Reiszadeh M. – Motahar S. 2011: The wind energy potential in the coasts of Persian Gulf used in design and analysis of a horizontal axis wind turbine. World Renewable Energy Congress, Wind Energy Application, Linköping, Sweden, 8-13 May, pp. 4058-4065.
- REN21 2021: Renewables 2021, Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat), 371 p. URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf

- REU 2011: Renewable energy in Ukraine. State Agency for Investment and National Projects of Ukraine – Deloitte, 28 p. URL: http://www.investin.if.ua/doc/pub/Ovewview_Renewable-energy-in-Ukraine_230_230_WWW.pdf
- Rozhko A.O. [Рожко А.О.] 2007: Перспективи використання відновлювальних джерел енергії в Україні [Prospects for the use of renewable energy in Ukraine]. *Енергосбережение*, 2, 25-28 с.
- Rózsavölgyi K. 2007: Szélerőmű-telepek területi elhelyezése saját fejlesztésű klímaorientált modell (KMPAM) segítségével. „Települési Környezet” Konferencia Kiadványa, Debreceni Egyetem, pp. 262-264.
- Ruedas F.B. – Camacho C.A. – Marcuello S.R. 2011: Methodologies Used in the Extrapolation of Wind Speed Data at Different Heights and Its Impact in the Wind Energy Resource Assessment in a Region. In (edited by Suvire G.O.) *Wind Farm – Technical Regulations, Potential Estimation and Siting Assessment*, InTech, Chile, pp. 97-114.
- Şahini Z.A. – Aksakal A. 1999: A Statistical Analysis of Wind Energy Potential at the Eastern Region of Saudi Arabia, *International Journal of Energy Research*, 23, pp. 909-917.
- Saleh H. – Abou El-Azm Aly A. – Abdel-Hady S. 2012: Assessment of different methods used to estimate Weibull distribution parameters for wind speed in Zafarana wind farm, Suez Gulf, Egypt. *Energy*, 44, pp. 710-719.
- Salyuk M. – Melnychuk V. – Mykyta M. [Салюк М., Мельничук В., Микита М.] 2013: Аналіз несприятливих метеорологічних явищ на Закарпатті [Analysis of unfavorable meteorological phenomenon on Transcarpathia]. *Науковий вісник УжНУ: серія Географія. Землеустрій. Природокористування*, 2, 32-42 с.
- Shchur V.I. 2017: Energy efficient control of low power wind turbines for electrical and heat power generation. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, p. 22.
- Schönwiese C.-D. 2013: *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. 5. Vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 319 p.
- Schrempf N. 2007: Energetikai célú szélmérő rendszer kialakítása. Doktori (PhD) értekezés, SZIE, Gödöllő, 159 p.
- Sembery P. – Tóth L. (szerk.) 2004: *Hagyományos és megújuló energiák*. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 530 p.
- Shata A. – Hanitsch R. 2008: Electricity generation and wind potential assessment at Hurghada, Egypt. *Renewable Energy*, 33, pp. 141-148.
- Shkuridin Ye.Ye. [Шкурідін Є.Є.] 2014: Поняття альтернативних джерел енергії [Concept of alternative energy sources]. „Молодий вчений”, 4 (7), 42-44 с.

- Shuber P.M. [Шубер П.М.] 2014: Особливості клімату високогір'я ландшафту Чорногора [The climate high landscapes Chornohora]. Проблеми гірського ландшафтознавства, 1, 120-125 с.
- Shven N.I. [Швень Н.І.] 2004: Про вплив зміни методик спостережень на визначення напрямку та швидкості вітру на метеорологічній мережі України [Influence of change of observation techniques on determination of wind direction and velocity on meteorological network of Ukraine]. Наукові праці УкрНДГМІ, 253, 164-172 с.
- Shven N.I. [Швень Н.И.] 2010: Зависимость скорости ветра в приземном слое от защищенности ветроизмерительных приборов [Dependence of wind speed in the ground layer on the protection of wind meters]. Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист, 1, 116-120 с.
- Smerdov A.A. – Bulba Ye.M. [Смердов А.А., Бульба Є.М.] 2011: Статистичні характеристики швидкості вітру в регіоні м. Полтави [Statistical characteristics of wind speed in the Poltava region]. Вісник Полтавської державної аграрної академії, 1, 153-157 с.
- Sobchenko A. – Khomenko I. 2015: Assessment of regional wind energy resources over the Ukraine. Energy Procedia, 76, pp. 156-163.
- Sokolovsky Yu. – Rotkin V. 2017: Theoretical and technical basis for the optimization of wind energy plants. Lulu Press, USA
- SolarGIS (2014): SolarGIS © 2011-2012 GeoModel Solar s.r.o. Global Horizontal Irradiation. URL: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/europe>
- Sopian K. – Khtib T. 2013: Wind Energy Potential in Nine Coastal Sites in Malaysia. Palestine Technical University Research Journal, 1 (1), pp. 10-15.
- Spellman F.R. 2014: Environmental impacts of renewable energy. CRC Press, 490 p.
- SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) topográfiai adatbázis. URL: [http://www.gidrometpribors.ru/M63M-1-\(bez-vyhoda-na-PK\).html](http://www.gidrometpribors.ru/M63M-1-(bez-vyhoda-na-PK).html)
- Stoiko S. – Koinova I. [Стойко С., Койнова І.] 2013: Екологічна безпека життєвого середовища в Україні та програма сталого розвитку [Ecological security of vital environment in ukraine and sustainable development program]. Вісник Львівського університету, серія географічна, 41, 303-317 с.
- Strack M. – Albers A. 1996: Analyse und Extrapolation des Windprofils am 130 Meter-Meßmast des DEWI (Analysis and Extrapolation of the Wind Profile Measured at the DEWI 130-m Meteorological Mast). DEWI-Magazin, 8, pp. 65-75.
- Szász G. – Tőkei L. 1997: Meteorológia mezőgazdászoknak, kertészeknek, erdészeknek. Mezőgazda Kiadó, Budapest, 172 p.

- Szalai S. – Auer I. – Hiebl J. – Milkovich J. – Radim T. – Stepanek P. – Zahradnicek P. – Bihari Z. – Lakatos M. – Szentimrey T. – Limanowka D. – Kilar P. – Cheval S. – Deak Gy. – Mihic D. – Antolovic I. –, Mihajlovic V. – Nejedlik P. – Stastny P. – Mikulova K. – Nabyvanets I. – Skyryk O. – Krakovskaya S. – Vogt J. – Antofie T. – Spinoni J. 2012: Climate of the Greater Carpathian Region. Final Technical Report. URL: www.carpatclim-eu.org
- Szentimrey T. 2008: Development of MASH homogenization procedure for daily data. Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases. Budapest, Hungary: WCDMP-No. 71, WMO/TD-No. 1493, pp. 123-130.
- Szentimrey T. – Bihari Z. 2007: MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis). In: Tveito, E., Wegehenkel, M., Wel, F., Dobesch, H. (eds.) COST Action 719 Final Report, The use of GIS in climatology and meteorology, pp. 54-56.
- Szépszó G. – Horányi A. – Kertész S. – Lábó E. 2006: Magyarországi szélklimatológia előállítása globális mezők dinamikai leskáázásával. Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, pp. 82-93.
- Tar K. 1983: A szélenergia statisztikai vizsgálata. Időjárás, 87. pp. 29-37.
- Tar K. 1984: Az Alföld szélenergia készletének statisztikai vizsgálata. OMSZ Hivatalos Kiadványa, 58, pp. 93-107.
- Tar K. 1991a: Magyarország szélklímájának komplex statisztikai elemzése. Az Országos Meteorológiai Szolgálat kisebb kiadványai, 67, 124 p.
- Tar K. 1991b: The Concept and the Velocity- and Energy Distribution of Characteristic and Non-Characteristic Wind Direction. The International Journal of Ambient Energy, 12 (2), pp. 95-100.
- Tar K. 1999: Az alföldi szélmező statisztikai jellemzőinek időbeli változása. A táj változása a Kárpát-medencében c. tudományos konferencia kiadványa (szerk.: Fülek György), Gödöllő, pp. 225-230.
- Tar K. 2003a: Összefüggés a szél energiája és irányváltozása között. Környezetvédelmi mozaikok – Tiszteletkötet Kerényi Attila 60. születésnapjára. Debrecen, pp. 391-406.
- Tar K. 2003b: A szélenergia néhány statisztikai paraméterének időbeli változása Magyarországon. Klímaváltozás – energiatudatosság – energiahatékonyság, III. Nemzetközi Konferencia és Kiállítás, Győr, június 4-6, pp. 143-149.
- Tar K. 2004a: Becslési módszerek a magyarországi szélenergia-potenciál meghatározására. Magyar Energetika, 12 (4), pp. 37-48.
- Tar K. 2004b: A szélirányonkénti energetikai paraméterek időbeli és területi eltérése Magyarországon. Földrajzi Értesítő, 53 (3-4), pp. 219-233.

- Tar K. 2006: Módszer a szélenergia napi menetének jellemzésére. Magyarországi szélklimatológia előállítása globális mezők dinamikai leskalázásával. Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, pp. 54-70.
- Tar K. 2007: Módszerek a magyarországi szélenergia-potenciál becslésére. Savaria University Press, Szombathely, 44 p.
- Tar K. 2008a: Energetic characterization of near surface windfield in Hungary. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, pp. 250-264.
- Tar K. 2008b: Some statistical characteristics of monthly average wind speed at various heights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, pp. 1712-1724.
- Tar K. 2012: Szélklimatológiai vizsgálatok a Hernád-völgyben. In: Lázár I. (szerk.): A megújuló energiaforrások hasznosításának természeti, társadalmi és gazdasági lehetőségei a Hernád-völgyben. DE Meteorológiai Tanszék, Debrecen, pp. 21-31.
- Tar K. 2016: A legmegbízhatóbb Hellmann-kitevő meghatározásának statisztikai módszere. *Acta Climatologica et Chorologica, Universitatis Szegediensis*, 50/B, pp. 129-138.
- Tar K. – Bíróné Kircsi A. – Bartók B. – Szegedi S. – Lázár I. – Vass R. – Bai A. – Tóth T. 2015: Estimation of solar and wind energy potential in the Hernád Valley. *Időjárás*, 11 (4), pp. 537-555.
- Tar K. – Kircsi A. 2001: Módszer a napi átlagos fajlagos szélteljesítmény meghatározására. A légköri erőforrások hasznosításának meteorológiai alapjai. Meteorológiai Tudományos Napok – 2001, pp. 121-137.
- Tar K. – Kircsi A. – Vágvölgyi S. 2002: Temporal changes of wind energy in connection with the climatic change. *Proceedings of the Global Wind-power Conference and Exhibition*, Paris, France, 2-5 April, CD-ROM.
- Tar K. – Radics K. – Bartholy J. – Wantuchné Dobi I. 2005: A szél energiája Magyarországon. *Magyar Tudomány*, 6, p. 805.
- Tar K. – Szegedi S. 2007: A Magyar Alföld és a Kárpátok légcseréjének szélenergetikai vonatkozásai. In: Maghiar T., Bondor K., Vladu E. (editors): *Colaborari didactice si stiintifice in domeniul surcelor de energie regenerabili intre Universitatea din Oradea si Universitatea din Debrecen*, pp. 30-37.
- Tar K. – Szegedi S. 2011: A statistical model for estimating electricity produced by wind energy. *Renewable Energy*, 36, pp. 823-828.
- Tar K. – Verdes E. 2003: Temporal change of some statistical characteristics of wind direction field over Hungary. *Időjárás*, 107, 2, pp. 153-170.
- Torres J.L. – Garcia A. – Prieto E. – de Francisco A. – 1999: Characterization of wind speed data according to wind direction. *Solar Energy*, 66 (1), pp. 57-64.

- Tóth L. – Horváth G. 2003: Alternatív energia, Szélmotorok, szélgenerátorok. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 383 p.
- Troen I. – Petersen L. 1989: European Wind Atlas. Risø Nat. Labs, Roskilde, Denmark, 656 p.
- Truhetz H. – Krenn A. – Winkelmeier H. – Müller S. – Cattin R. – Eder T. – Biberacher M. 2012: Austrian Wind Atlas and Wind Potential Analysis. 12. Symposium Energieinnovation, 15.-17.2.2012, Graz/Austria, 10 p.
- Tse K.T. – Li S.W. – Chan P.W. – Mok H.Y. – Weerasuriya A.U. 2013: Wind profile observation in tropical cyclone events using wind-profiles and doppler SODARs. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 115, pp. 93-103.
- Tykhonovych E. – Bilanyuk V. [Тиханович Е., Біланюк В.] 2014: Вплив вітру на формування лавинної ситуації [Wind affect on the formation of avalanche situation]. Науковий вісник: Геополітика и екогеодинаміка регіонів, 10 (1), 227-230 с.
- UAMAP 2017: Інтерактивна карта проєктів з енергоефективності та відновлюваної енергетики України [An interactive map of Ukraine's energy efficiency and renewable energy projects]. URL: <http://www.uamap.org.ua/map>
- Ukrajna Energetikai Stratégiája [Енергетична стратегія України] 2013: Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013, № 1071, 166 с. <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>
- Ukrajna Nemzeti Atlasza [Національний атлас України] 2007. Руденко Л.Г. (гол. редактор), ДНБП «Картографія», 440 с.
- UNFCCC (United Nation Framework Convention on Climate Change) 2015: FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1 (November 2015), 32 p. URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
- UWEA (Ukrainian Wind Energy Association, Українська вітроенергетична асоціація, УВЕА) 2021: Вітроенергетичний сектор України – 2020 [Ukrainian wind power sector – 2020]. (February 2021), 86 p. URL: <https://spain.mfa.gov.ua/storage/app/sites/72/uwea-2020.pdf>
- Vajda Gy. 1999: Energiaforrások. Magyar Tudomány, 6, pp. 645-675.
- Van Ackere S. – Van Eetvelde G. – Schillebeeck D. – Papa E. – Van Wyngene K. – Vandeveld L. 2015: Wind Resource Mapping Using Landscape Roughness and Spatial Interpolation Methods. Energies, 8, pp. 8682-8703.
- Varga B. – Németh P. 2005: Hazai szélprofil vizsgálatok SODAR mérések eredményiből. Szélenergia Magyarországon, MSZET, Gödöllő, pp. 22-27.

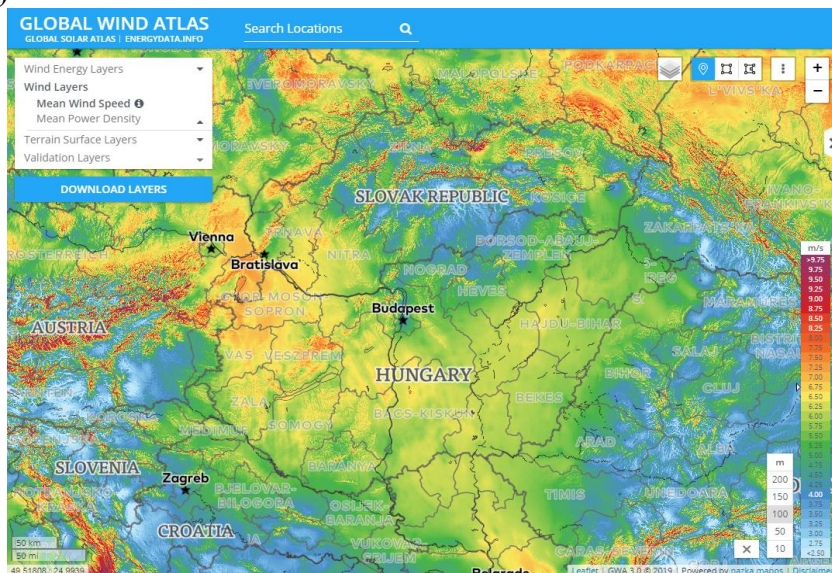
- Varga B. – Németh P. – Dobi I. 2006: Szélprofil vizsgálatok eredményeinek összefoglalása. In: Dobi Ildikó (szerk.): Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, pp. 7-20.
- Velychko S.A. [Величко С.А.] 2003: Енергетика навколишнього середовища України (з електронними картами) [Energy of the environment of Ukraine (with electronic maps)]. Науковий редактор проф. І.Г. Черваньов, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 52 с.
- Viana S. – Yagüe C. – Maqueda G. 2012: Vertical Structure of the Stable Boundary Layer Detected by RASS-SODAR and In-Situ Measurements in SABLES 2006 Field Campaign. *Acta Geophysica*, 60, pp. 1261-1286.
- Vince I. 1975: Matematikai statisztika ipari alkalmazásokkal. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 351 p.
- Vogt S. – Thomas P. 1995: SODAR – A useful remote sounder to measure wind and turbulence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54-55, pp. 163-172.
- Volevakha M.M. – Hojsa M.I. [Волеваха М.М., Гойса М.І.] 1967: Енергетичні ресурси клімату України [Ukraine's climate energy resources]. Наукова думка, Київ, 132 с.
- Voropai L. – Kunytsa M. [Воропай Л., Куниця М.] 1996: Українські Карпати. Фізико-географічний нарис [Ukrainian Carpathian Mountains. Physico-geographical description]. Видавництво Радянська школа, Київ, 168 с.
- Wágner M. – Papp É. 1984: A szél néhány statisztikai jellemzője. *OMSZ Hivatalos kiadványa*, 57, pp. 108-117.
- Wagner R. 1931: A magyar Alföld szélviszonyai. A szegedi Alföldkutató Bizottság Könyvtára, III. Szakosztály Közleményei, 9, pp. 1-42.
- WEC (World Energy Council) 2004: Renewable Energy Resources: Hydro-energy Potential in Europe. URL: <https://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/world/europe/hydro-europe/indexbig.shtml>
- WEC (World Energy Council) 2018: World Energy Issues Monitor 2021 Humanising Energy (March 2021, United Kingdom), 51 p. URL: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Issues_Monitor_2021-final.pdf?v=1621009879
- Wei Y. 2013: Spatial Variation and Interpolation of Wind Speed Statistics and Its Implication in Design Wind Load. Electronic Thesis and Dissertation Repository, p. 149.
- Welch J.B. – Venkateswaran A. 2009: The dual sustainability of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (5), pp. 1121-1126.

- Wieringa J. 1976: An objective exposure correction method for average wind speeds measured at sheltered location. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102, pp. 241-253.
- Wieringa J. 1983: Description requirements for assessment of non-ideal wind station – for example Aachen. *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 11, pp. 121-131.
- WWEA (World Wind Energy Association) 2021: WWEA Annual Report 2020 (Bonn: February 2021). URL: <https://library.wwindea.org/global-statistics/>
- WWF (World Wildlife Fund) 2020: Карта пралісів та старовікових лісів в Україні [Virgin, Quazi-virgin and Natural Forests of Ukraine]. URL: <http://gis-wwf.com.ua/>
- Xydis G. 2012: Wind-direction analysis in coastal mountainous sites: An experimental study within the Gulf of Corinth, Greece. *Energy Conversion and Management*, 64, pp. 157-169.
- Yee Von Y. 2015: Estimation and validation of wind speed by using spatial interpolation. Faculty of Civil Engineering & Earth Resources, Universiti Malaysia Pahang, 47 p.
- Yong K.H. – Ibrahima M.Z. – Ismaila M. – Albania A. – Muzathikb A.M. 2011: Wind Mapping in Malaysia Using Inverse Distance Weighted Method. *UMTAS, Empowering Science, Technology and Innovation Towards a Better Tomorrow*, pp. 60-67.
- Youm I. – Sarr J. – Sall M. – Ndiaye A. – Kane M.M. 2005: Analysis of wind data and wind energy potential along the northern coast of Senegal. *Renewable Energy Reviews*, 8, pp. 95-108.
- 3Tier 2009: Ukraine Wind Resource Map at 80 m. URL: www.3tier.com

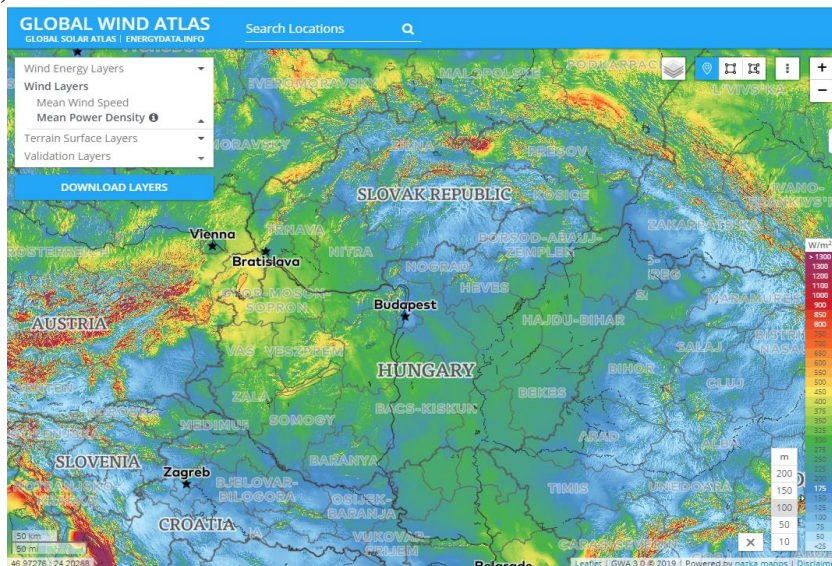
FÜGGELÉK

1. függelék: A Kárpát-medence felett 100 m-es magasságban rendelkezésre álló szélsősebesség (m/s) **(1a)** és szélteljesítmény (W/m^2) **(1b)** mező

(1a)

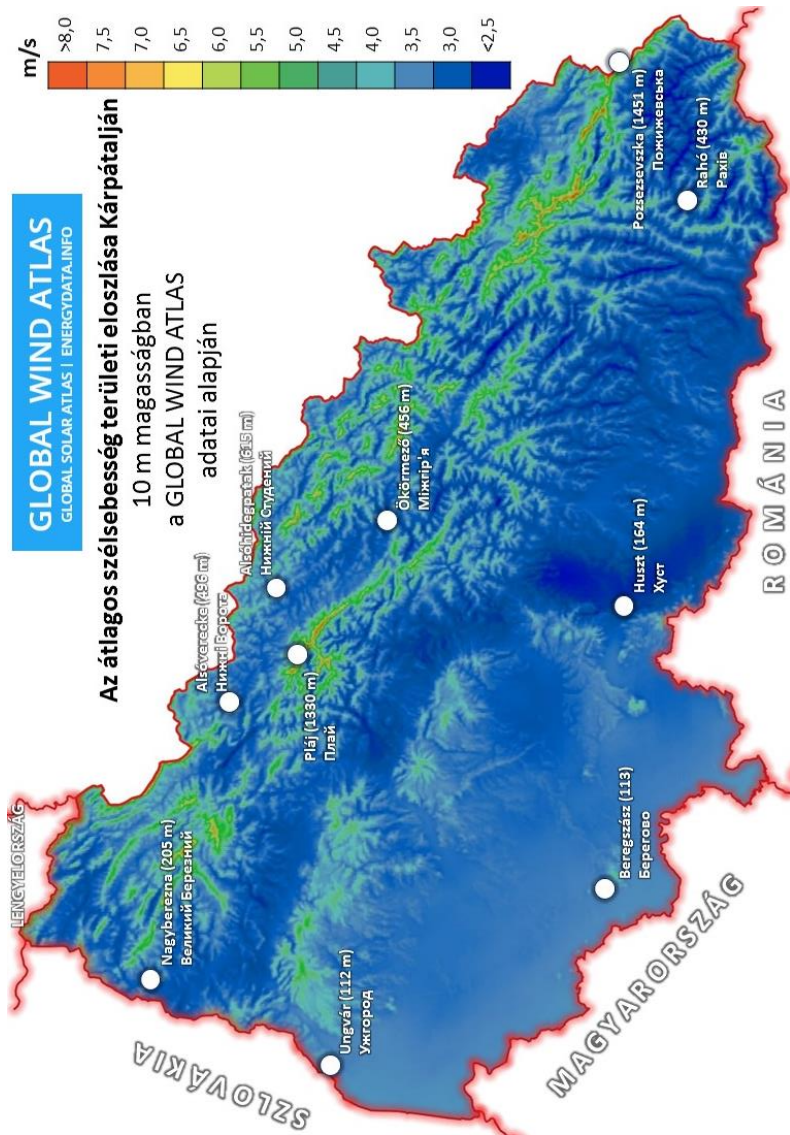


(1b)



Forrás: Global Wind Atlas (<https://globalwindatlas.info/>)

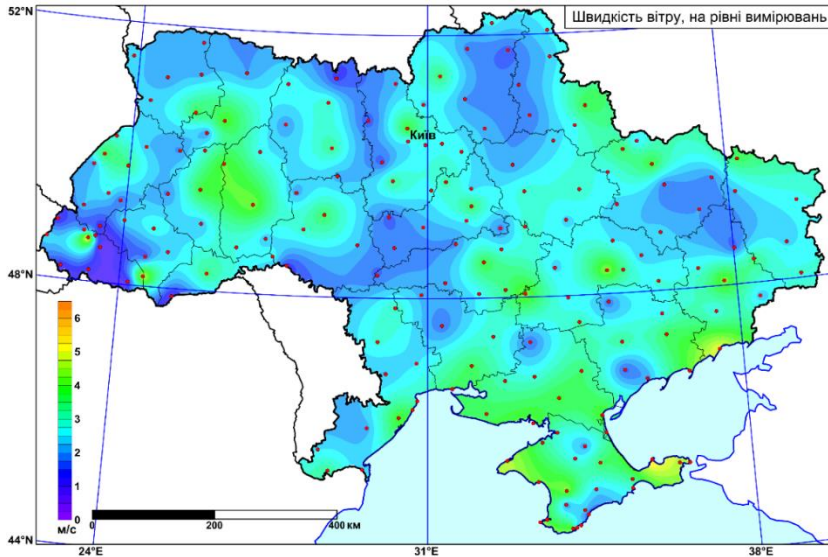
(1c) Az átlagos szélesebesség (m/s) területi eloszlása Kárpátalján a Global Wind Atlas (ECMWF) ERA-5 reanalízis adatbázisa alapján



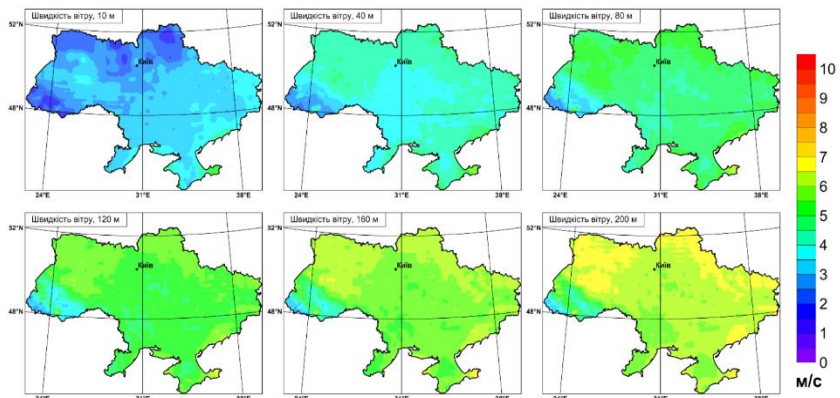
Forrás: saját szerkesztés a Global Wind Atlas adatai alapján (<https://globalwindatlas.info/>)

2. függelék: Az átlagos szélesség (m/s) területi eloszlása Ukrajnában 1981–2020 között a meteorológiai megfigyelő állomások alapján **(2a)** és a CALMET (California Meteorological Model) mezoskálájú diagnosztikai szélmodell alapján 2,5 km-es vízszintes térbeli felbontással a földfelszín felett 10, 40, 80, 120, 160 és 200 m magasságban **(2b)**

(2a)

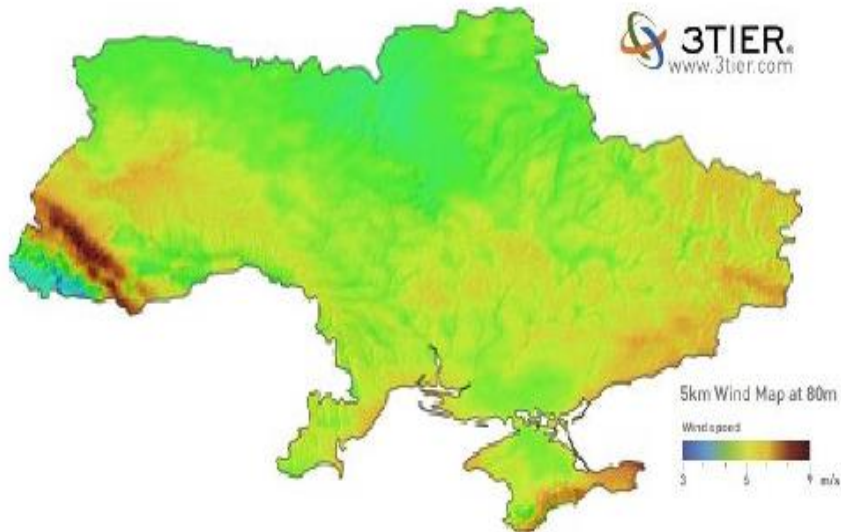


(2b)



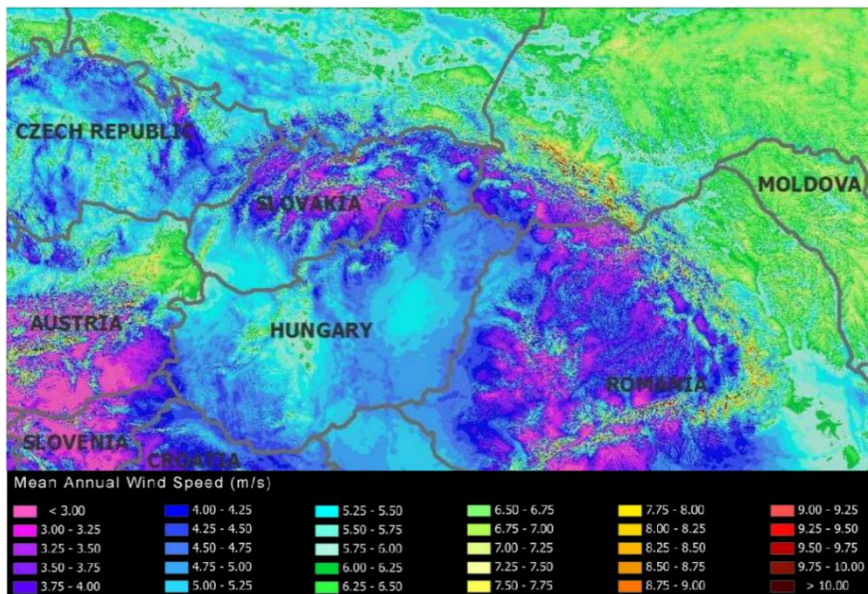
Forrás: Oshurok (2020)

3. függelék: Az évi átlagos szélesebesség (m/s) alakulása 80 m magasságban Ukrajna területén a 3Tier (2009) térképén



Forrás: 3Tier (2009) (www.3tier.com)

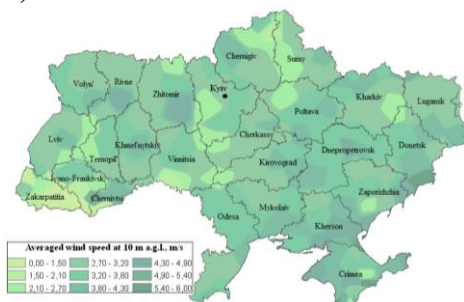
4. függelék: Az évi átlagos szélesebesség (m/s) 80 m magasságban Kárpát-medencében és környezetében az AWS Truepower (2012) térkép kivágatán



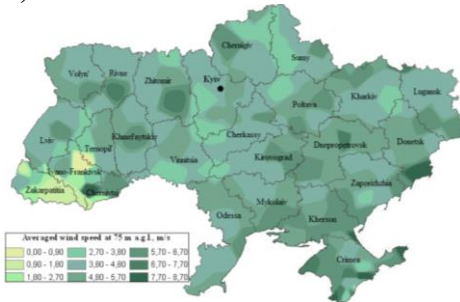
Forrás: AWS Truepower (2012) (https://www.awstruepower.com)

5. függelék: Az évi átlagos szélsébség (m/s) Ukrajna területén, a felszín felett 10 m (a) és 75 m (b) magasságban (30 éves átlag)

a)



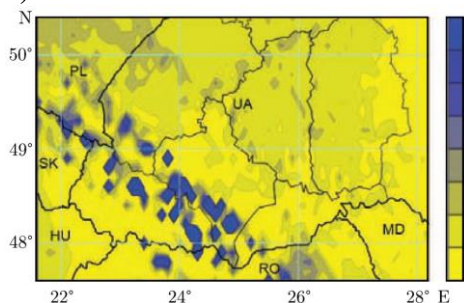
b)



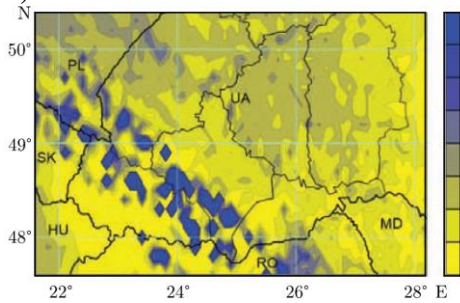
Forrás: Makarovskiy – Zinych (2014)

6. függelék: A fajlagos szélteljesítmény (W/m^2) az Ukrán-Kárpátok térségében 30 m (a) és 50 m-es (b) magasságban 1981–2020 között

a)

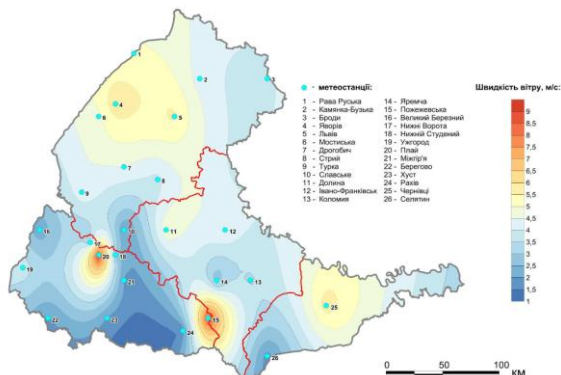


b)



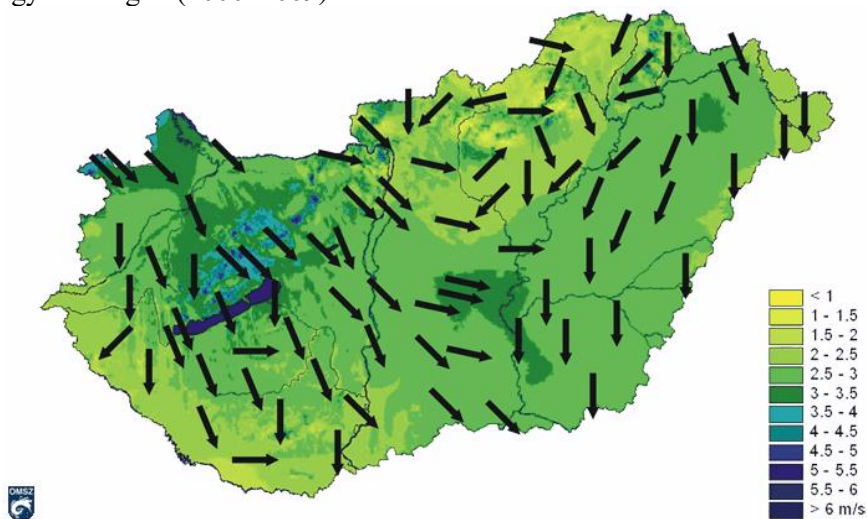
Forrás: Osadchyi et al. (2015)

7. függelék: Az évi átlagos szélsébség (m/s) a Kárpátok régiójában 100 m-es magasságban 2005–2015 között



Forrás: Moskalchuk – Pryhodko (2017)

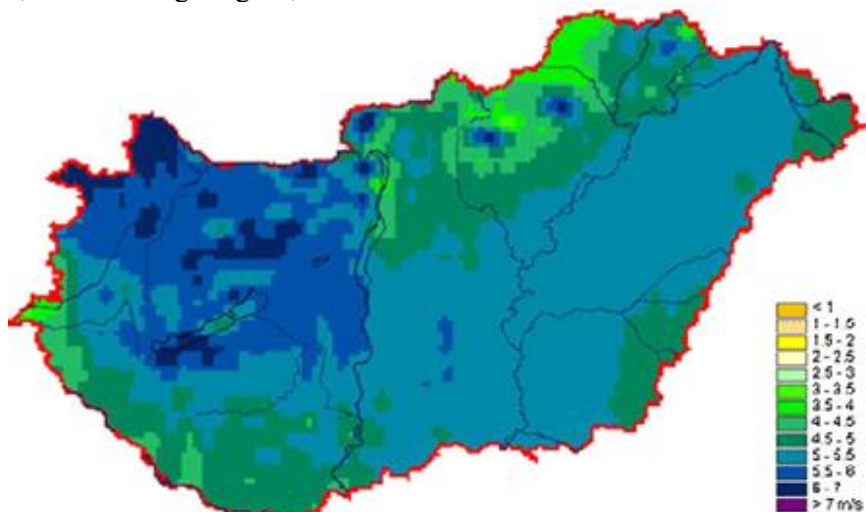
8. függelék: Az évi átlagos szélsébségek (m/s) és az uralkodó szélirányok Magyarországon (2000–2009)



Forrás: OMSZ (2017a)

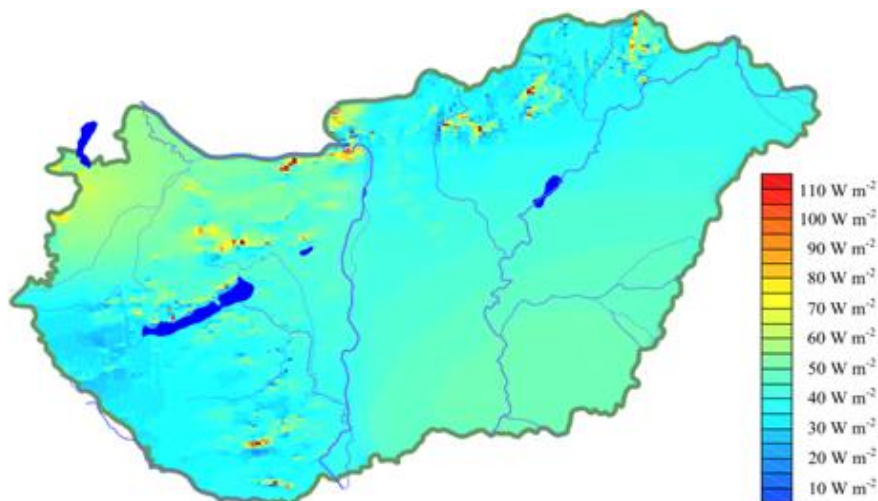
(http://met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/szel/)

9. függelék: Dinamikai leskárázással számított átlagos szélsébség Magyarországon, 75 méter magasságban, 5×5 km-es felbontásban, az 1992–2001-es időszakra



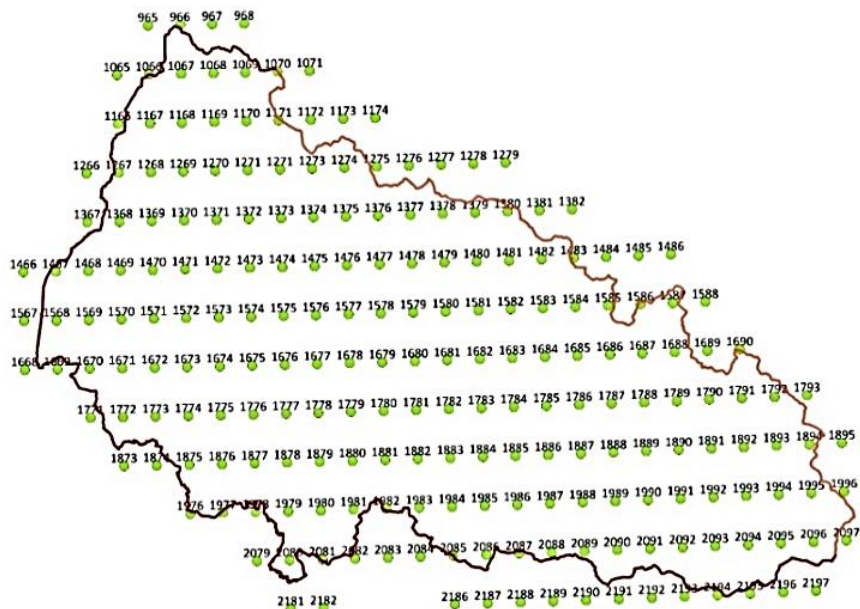
Forrás: Kertész et al. (2005)

10. függelék: A domborzat áramlásmódosító hatásának figyelembevételével 10 m felszín feletti magasságra modellezett szélteljesítmény-mező Magyarországon



Forrás: Radics 2004

11. függelék: A CarpatClim éghajlati adatbázis Kárpátalját érintő 0,1°×0,1° rácsponjtjai



Forrás: saját szerkesztés a CarpatClim alapján (www.carpatclim-eu.org)

12. függelék: A napi átlagos szélsébség (m/s) egyes statisztikai mutatói évszakonként a 2011–2015 közötti időszakban (a dőlt és aláhúzott mutatóknak nincs mértékegysége)

Statisztikai mutatók	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsevszka (1451 m)
tél									
átlag	1,8	0,7	1,2	1,4	1,3	2,2	1,7	5,5	4,4
szórás	1,1	0,4	1,0	1,7	1,0	1,4	0,9	3,5	3,7
<u>var. e.h.</u>	0,62	0,48	0,84	1,25	0,72	0,66	0,51	0,63	0,86
minimum	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
maximum	7,8	3,1	5,8	8,5	7,5	7,0	4,3	20,3	23,1
tavasz									
átlag	2,29	0,94	1,74	1,96	1,47	2,06	1,56	5,14	3,17
szórás	1,15	0,36	1,20	1,49	0,84	1,20	0,64	3,06	2,61
<u>var. e.h.</u>	0,50	0,39	0,69	0,76	0,57	0,58	0,41	0,59	0,82
minimum	0,11	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
maximum	7,00	2,55	7,75	8,00	5,75	7,25	4,25	17,99	14,01
nyár									
átlag	1,80	0,83	1,28	1,19	0,97	1,52	1,28	4,05	2,42
szórás	0,87	0,23	0,75	0,88	0,56	0,79	0,52	2,35	1,73
<u>var. e.h.</u>	0,48	0,28	0,59	0,74	0,58	0,52	0,41	0,58	0,72
minimum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,13	0,00	0,00
maximum	5,62	1,66	4,50	6,00	3,75	4,63	3,25	14,60	10,11
ősz									
átlag	1,58	0,75	0,98	1,20	0,95	1,53	1,33	4,83	3,37
szórás	1,02	0,30	0,87	1,37	0,74	1,08	0,69	3,17	2,92
<u>var. e.h.</u>	0,65	0,40	0,89	1,14	0,78	0,71	0,52	0,66	0,87
minimum	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
maximum	5,85	2,11	5,25	7,50	4,00	6,13	4,25	16,17	14,86

Forrás: saját szerkesztés

13. függelék: A szélsőségek (m/s) napi menetei évszanként a vizsgált meteorológiai mérőállomásokon a 2011–2015-ös időszakban

Évszak	Időpontok							
	2:00	5:00	8:00	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00
Ungvár (112 m)								
tél	1,67	1,55	1,57	2,01	2,44	1,99	1,74	1,74
tavaszi	1,68	1,58	1,90	2,94	3,20	3,16	2,03	1,86
nyár	1,09	0,97	1,35	2,36	2,78	2,73	1,69	1,45
ősz	1,21	1,19	1,09	2,11	2,38	1,77	1,41	1,46
Huszt (164 m)								
tél	0,72	0,67	0,70	0,80	0,86	0,77	0,72	0,69
tavaszi	0,77	0,69	0,76	0,96	1,28	1,30	0,89	0,82
nyár	0,61	0,57	0,79	0,93	1,15	1,21	0,76	0,62
ősz	0,68	0,64	0,74	0,85	0,92	0,81	0,69	0,69
Nagyberezna (205 m)								
tél	0,90	0,91	0,96	1,22	1,75	1,68	1,27	1,07
tavaszi	0,85	0,98	1,22	2,37	3,01	2,84	1,57	1,05
nyár	0,29	0,40	0,88	2,10	2,48	2,42	1,08	0,59
ősz	0,44	0,56	0,63	1,36	2,00	1,60	0,73	0,51
Rahó (430 m)								
tél	1,17	1,22	1,12	1,53	1,92	1,66	1,42	1,22
tavaszi	1,08	0,94	1,32	2,54	3,42	3,24	1,90	1,23
nyár	0,36	0,34	1,07	1,81	2,33	2,16	0,99	0,44
ősz	0,76	0,78	0,89	1,70	2,21	1,52	0,93	0,80
Ökörmező (456 m)								
tél	1,08	1,33	1,24	1,32	1,50	1,56	1,42	1,34
tavaszi	0,85	1,10	1,07	1,64	2,34	2,18	1,41	1,18
nyár	0,28	0,64	0,47	1,43	1,56	1,85	0,70	0,82
ősz	0,57	0,86	0,66	1,11	1,47	1,34	0,75	0,82
Alsóverceke (496 m)								
tél	2,10	2,04	1,88	2,06	2,46	2,49	2,11	2,12
tavaszi	1,50	1,40	1,48	2,53	3,08	2,93	2,01	1,56
nyár	0,89	0,76	1,06	2,06	2,39	2,39	1,52	1,10
ősz	1,13	1,13	1,06	1,77	2,35	2,04	1,45	1,30
Alsóhidegpatak (615 m)								
tél	1,47	1,52	1,42	1,83	2,11	1,93	1,71	1,68
tavaszi	0,97	0,91	1,16	2,23	2,52	2,34	1,31	1,04
nyár	0,58	0,49	1,00	2,03	2,30	2,06	1,14	0,66
ősz	0,85	0,85	0,85	1,81	2,23	1,76	1,20	1,04

A 13. függelék folytatása

Évszak	Időpontok							
	2:00	5:00	8:00	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00
Pláj (1330 m)								
tél	5,88	5,60	5,48	5,28	5,25	5,33	5,49	5,84
tavas	5,51	5,26	5,02	4,82	4,88	5,09	5,27	5,29
nyár	4,40	4,17	3,83	3,53	3,75	4,02	4,33	4,31
ősz	5,19	4,95	4,97	4,48	4,44	4,51	4,91	5,27
Pozsezevszka (1451 m)								
tél	4,41	4,53	4,34	4,16	4,40	4,29	4,30	4,39
tavas	3,13	3,12	3,06	3,41	3,43	3,25	2,89	3,05
nyár	2,16	2,32	2,49	2,49	2,79	2,62	2,09	2,30
ősz	3,57	3,49	3,34	3,21	3,56	3,28	3,11	3,46

Forrás: saját szerkesztés

14. függelék: A szeles napok (D10, $v \geq 10$ m/s) havi átlagai a mérőállomásokon, 2013–2015 között

Hónap	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhídegutak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
Jan	7	0	1	1	0	12	14	21	13
Feb	6	0	2	1	0	10	7	17	8
Márc	15	2	5	3	3	17	15	22	8
Ápr	17	3	6	2	3	15	12	18	9
Máj	14	3	4	1	2	16	12	19	8
Jún	13	1	2	1	1	7	11	14	5
Júl	14	4	3	1	2	8	9	15	3
Aug	11	1	1	1	1	7	13	14	3
Szep	11	2	2	1	1	9	11	18	7
Okt	4	0	1	1	1	3	9	15	8
Nov	3	0	2	2	2	10	8	18	14
Dec	5	0	1	0	2	11	14	21	17
Év	10	1	2	1	2	10	11	18	9

Forrás: saját szerkesztés

15. függelék: A Weibull-eloszlás (*k*) alakparaméterének (mértékegység nélküli szám) havi értékei

Hónap	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezszevszka (1451 m)
Jan	1,84	1,93	1,15	0,67	1,37	1,54	1,94	1,72	1,00
Feb	1,53	2,87	1,27	0,99	1,63	1,43	2,11	1,48	0,75
Márc	2,05	2,50	1,59	1,28	1,67	1,73	2,57	1,68	0,99
Ápr	2,20	2,03	1,59	1,59	2,13	1,95	2,50	1,87	1,33
Máj	2,10	1,23	1,59	1,46	1,99	1,89	2,65	1,80	1,42
Jún	2,16	4,21	1,91	1,69	1,84	2,24	2,75	1,92	1,30
Júl	2,49	3,39	1,89	3,04	1,97	2,07	2,72	1,66	1,51
Aug	2,16	4,09	1,71	2,18	1,94	1,95	2,63	1,88	1,44
Szep	2,07	2,83	1,53	1,12	1,62	1,74	2,01	1,74	1,45
Okt	1,56	2,55	1,15	1,01	1,40	1,59	2,18	1,58	0,89
Nov	1,29	2,64	0,99	0,82	1,27	1,26	2,01	1,45	0,92
Dec	1,57	2,11	1,17	0,74	1,45	1,58	2,09	1,70	1,31

Forrás: saját szerkesztés

16. függelék: A Weibull-eloszlás (*c*) skálaparaméterének (m/s) havi értékei

Hónap	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezszevszka (1451 m)
Jan	2,20	0,79	1,28	1,15	1,44	2,33	1,89	6,55	4,48
Feb	1,98	0,84	1,40	1,58	1,48	2,57	1,90	5,24	2,92
Márc	2,61	1,03	2,05	2,24	1,79	2,56	1,86	6,44	3,87
Ápr	2,74	1,04	1,93	2,45	1,75	2,30	1,76	5,66	3,56
Máj	2,44	0,94	1,89	1,84	1,44	2,13	1,64	5,24	2,57
Jún	2,27	0,98	1,67	1,54	1,29	1,89	1,62	4,95	2,85
Júl	2,02	0,89	1,36	1,74	1,07	1,62	1,36	4,51	2,81
Aug	1,84	0,88	1,30	1,49	0,94	1,66	1,35	4,19	2,30
Szep	2,08	0,93	1,33	1,14	1,03	1,61	1,38	5,25	3,40
Okt	1,71	0,80	0,98	1,22	0,95	1,57	1,48	5,02	3,13
Nov	1,47	0,80	0,84	1,21	1,19	1,88	1,64	5,89	3,64
Dec	1,97	0,86	1,24	0,99	1,55	2,26	2,01	6,60	5,55

Forrás: saját szerkesztés

17. függelék: Az energetikai hasznosítható szélesebségek időtartamának egyes paraméterei évszakos bontásban, 10 m-es magasságban a 2011–2015-ös időszakban

Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsepszvzka (1451 m)
tél									
OH _{lehetséges} (óra/év)	2160	2160	2160	2160	2160	2160	2160	2160	2160
OH _{megfigyelt} (óra/év)	400	5	280	297	171	799	372	1412	1033
OH _{relatív} (%)	18,5	0,3	12,9	13,8	7,9	37,0	17,2	65,4	47,8
$v < 3$ m/s időtartama (óra/év)	400	5	280	297	171	799	372	1423	1037
$v < 3$ m/s relatív értéke (%)	81,7	100,0	87,3	86,5	92,3	63,3	83,0	34,4	52,2
$v \geq 25$ m/s időtartama (óra/év)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,8	3,6
$v \geq 25$ m/s relatív értéke (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,2
tavasz									
OH _{lehetséges} (óra/év)	2208	2208	2208	2208	2208	2208	2208	2208	2208
OH _{megfigyelt} (óra/év)	583	22	496	459	217	802	313	1450	857
OH _{relatív} (%)	26,4	1,0	22,5	20,8	9,8	36,3	14,2	65,7	38,8
$v < 3$ m/s időtartama (óra/év)	583	22	496	459	217	802	313	1452	857
$v < 3$ m/s relatív értéke (%)	73,6	99,0	77,5	79,2	90,2	63,7	85,8	34,2	61,2
$v \geq 25$ m/s időtartama (óra/év)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0
$v \geq 25$ m/s relatív értéke (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0

A 17. függelék folytatása

Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
nyár									
OH _{lehetséges} (óra/év)	2208	2208	2208	2208	2208	2208	2208	2208	2208
OH _{megfigyelt} (óra/év)	391	5	271	158	100	512	193	1284	658
OH _{relatív} (%)	17,7	0,2	12,3	7,2	4,5	23,2	8,7	58,2	29,8
$v < 3$ m/s időtartama (óra/év)	391	5	271	158	100	512	193	1285	658
$v < 3$ m/s relatív értéke (%)	82,3	99,8	87,7	92,8	95,5	76,8	91,3	41,8	70,2
$v \geq 25$ m/s időtartama (óra/év)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0
$v \geq 25$ m/s relatív értéke (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
ősz									
OH _{lehetséges} (óra/év)	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184
OH _{megfigyelt} (óra/év)	311	4	235	238	111	538	208	1350	866
OH _{relatív} (%)	14,3	0,2	10,8	10,9	5,1	24,6	9,5	61,8	39,6
$v < 3$ m/s időtartama (óra/év)	311	4	235	238	111	538	208	1354	866
$v < 3$ m/s relatív értéke (%)	85,7	99,8	89,2	89,1	94,9	75,4	90,5	38,0	60,4
$v \geq 25$ m/s időtartama (óra/év)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	0,0
$v \geq 25$ m/s relatív értéke (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0

Forrás: saját szerkesztés

18. függelék: Az energetikailag hasznosítható szélebségek időtartama (óra/hónap) havi bontásban 10 m-en (a) és 100 m-en (b)

a)

Hónap	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
Jan	160	2	89	116	61	248	115	480	345
Feb	123	1	100	105	48	278	118	416	260
Márc	197	5	187	177	94	306	130	520	346
Ápr	208	7	155	172	63	265	107	473	289
Máj	178	10	154	110	60	230	76	457	221
Jún	149	2	116	64	52	193	89	454	242
Júl	132	2	77	48	26	154	52	415	227
Aug	109	1	77	47	21	165	51	416	189
Szep	134	2	91	59	35	170	59	446	267
Okt	101	0	80	77	32	151	68	439	275
Nov	76	1	64	101	44	217	81	465	324
Dec	117	3	91	76	62	272	139	516	428

Forrás: saját szerkesztés

b)

Hónap	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
Jan	572	29	233	341	303	481	485	690	638
Feb	440	15	262	308	238	539	498	598	481
Márc	704	73	490	520	467	593	549	737	640
Ápr	709	103	406	505	313	514	452	680	534
Máj	636	147	404	323	298	446	321	657	409
Jún	533	29	304	188	258	374	376	652	447
Júl	472	29	202	141	129	298	219	596	420
Aug	390	15	202	138	104	320	215	598	349
Szep	479	29	239	173	174	329	249	641	494
Okt	361	0	210	226	159	293	287	631	508
Nov	272	15	168	297	219	421	342	668	599
Dec	418	44	239	223	308	527	587	741	744

Forrás: saját szerkesztés

19. függelék: A 10, 20, 40, 60, 80 és 100 m-es magasságokra érvényes fajlagos szélteljesítmény (W/m²) havi bontásban

Magasság	Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
10 m	Jan	10,4	0,4	4,8	42,6	4,4	14,9	5,7	263,8	229,8
	Feb	9,9	0,2	4,8	15,2	3,4	22,8	5,3	173,6	199,6
	Már	15,4	0,8	9,5	19,4	5,9	16,2	4,3	261,0	163,1
	Ápr	16,8	1,0	8,0	16,2	4,1	10,2	3,7	153,4	54,6
	Máj	12,2	1,8	7,5	8,1	2,5	8,4	2,9	126,4	17,9
	Jún	9,6	0,1	4,0	3,7	1,9	5,0	2,7	99,2	29,8
	Júl	6,1	0,2	2,2	3,2	1,0	3,3	1,6	91,0	20,6
	Aug	5,1	0,1	2,2	2,5	0,7	3,8	1,6	61,6	12,4
	Szep	7,8	0,4	2,8	3,7	1,2	4,1	2,1	133,8	39,8
	Okt	6,3	0,2	2,2	6,4	1,2	4,3	2,4	135,2	129,0
	Nov	5,9	0,2	2,3	15,5	3,0	11,9	3,6	253,9	173,1
	Dec	9,4	0,5	4,1	15,6	4,8	12,9	6,3	275,0	211,2
20 m	Jan	21,2	1,4	8,5	66,5	8,1	25,0	10,5	352,1	335,1
	Feb	20,2	0,7	8,6	23,7	6,3	38,3	9,8	231,7	291,1
	Már	31,2	2,8	16,9	30,3	10,8	27,3	8,0	348,4	237,8
	Ápr	34,1	3,4	14,3	25,3	7,5	17,2	6,8	204,8	79,7
	Máj	24,9	6,0	13,4	12,6	4,5	14,1	5,3	168,8	26,0
	Jún	19,5	0,4	7,1	5,7	3,5	8,3	5,1	132,5	43,4
	Júl	12,3	0,6	3,9	5,0	1,8	5,6	3,1	121,4	30,1
	Aug	10,4	0,2	3,8	3,9	1,3	6,4	3,1	82,2	18,2
	Szep	15,8	1,5	5,0	5,7	2,2	6,8	3,9	178,6	58,1
	Okt	12,7	0,8	3,9	10,0	2,2	7,2	4,5	180,4	188,2
	Nov	11,9	0,7	4,0	24,2	5,5	20,1	6,7	338,9	252,5
	Dec	19,2	1,7	7,3	24,3	8,9	21,6	11,7	367,1	308,0
40 m	Jan	39,6	2,8	15,2	103,7	14,9	42,0	19,5	490,0	633,3
	Feb	37,7	1,4	15,4	37,0	11,7	64,5	18,2	322,5	550,1
	Már	58,3	5,5	30,2	47,3	19,9	45,9	14,8	485,0	449,5
	Ápr	63,7	6,6	25,5	39,4	13,8	28,9	12,7	285,0	150,5
	Máj	46,5	11,5	23,9	19,7	8,4	23,7	9,8	234,9	49,2
	Jún	36,3	0,9	12,7	8,9	6,5	14,0	9,4	184,4	82,0
	Júl	23,0	1,1	7,0	7,8	3,4	9,4	5,7	169,0	56,8
	Aug	19,4	0,5	6,9	6,0	2,3	10,8	5,7	114,4	34,3
	Szep	29,4	2,8	8,9	8,9	4,0	11,5	7,3	248,5	109,8
	Okt	23,8	1,5	6,9	15,6	4,0	12,2	8,4	251,2	355,7
	Nov	22,3	1,4	7,2	37,7	10,1	33,8	12,4	471,6	477,2
	Dec	35,8	3,3	13,0	37,9	16,4	36,4	21,7	510,9	582,1

A 19. függelék folytatása

Magasság	Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverceke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
60 m	Jan	54,9	4,7	21,4	134,5	21,3	56,9	28,1	594,6	600,9
	Feb	52,3	2,3	21,6	48,0	16,7	87,4	26,2	391,3	522,0
	Már	80,8	9,2	42,4	61,4	28,5	62,3	21,2	588,4	426,5
	Ápr	88,4	11,0	35,8	51,1	19,8	39,2	18,2	345,8	142,8
	Máj	64,5	19,3	33,5	25,6	11,9	32,1	14,1	285,0	46,7
	Jún	50,4	1,4	17,8	11,6	9,3	19,0	13,5	223,7	77,8
	Júl	31,9	1,8	9,9	10,1	4,8	12,8	8,2	205,1	53,9
	Aug	26,9	0,8	9,6	7,8	3,3	14,6	8,2	138,8	32,6
	Szep	40,8	4,7	12,4	11,6	5,7	15,6	10,5	301,6	104,1
	Okt	33,0	2,5	9,7	20,2	5,8	16,5	12,0	304,7	337,5
	Nov	30,9	2,3	10,1	48,9	14,4	45,8	17,8	572,3	452,8
	Dec	49,6	5,5	18,3	49,2	23,5	49,3	31,2	619,9	552,3
80 m	Jan	67,7	6,0	27,2	161,8	27,4	70,6	36,3	711,2	702,1
	Feb	64,6	2,9	27,4	57,8	21,5	108,4	33,9	468,0	609,9
	Már	99,7	11,8	53,9	73,8	36,7	77,3	27,5	703,9	498,3
	Ápr	109,0	14,2	45,6	61,5	25,5	48,6	23,5	413,7	166,9
	Máj	79,6	24,9	42,7	30,8	15,4	39,8	18,3	340,9	54,6
	Jún	62,1	1,8	22,6	13,9	12,0	23,6	17,4	267,6	90,9
	Júl	39,4	2,3	12,6	12,2	6,2	15,8	10,5	245,3	63,0
	Aug	33,2	1,0	12,3	9,4	4,3	18,1	10,5	166,0	38,0
	Szep	50,4	6,1	15,8	13,9	7,3	19,3	13,6	360,7	121,7
	Okt	40,7	3,2	12,3	24,3	7,4	20,5	15,5	364,5	394,4
	Nov	38,1	3,0	12,8	58,8	18,6	56,8	23,0	684,5	529,1
	Dec	61,2	7,1	23,3	59,2	30,2	61,2	40,3	741,5	645,3
100 m	Jan	82,8	8,0	32,8	186,8	33,3	83,5	44,3	791,1	793,6
	Feb	78,9	3,9	33,0	66,7	26,2	128,2	41,4	520,6	689,4
	Már	121,9	15,7	65,0	85,2	44,7	91,3	33,5	782,9	563,3
	Ápr	133,3	18,9	54,9	71,0	31,0	57,5	28,7	460,1	188,6
	Máj	97,3	33,1	51,4	35,5	18,7	47,1	22,3	379,2	61,7
	Jún	76,0	2,4	65,7	31,3	37,2	63,3	61,5	297,6	155,6
	Júl	48,1	3,0	36,5	27,3	19,3	42,5	37,2	272,9	107,8
	Aug	40,5	1,3	35,6	21,1	13,1	48,5	37,2	184,7	65,1
	Szep	61,6	8,0	45,9	31,2	23,0	51,9	48,0	401,2	208,3
	Okt	49,7	4,3	35,8	54,4	23,0	55,0	54,8	405,5	675,0
	Nov	46,6	4,0	37,3	131,9	57,4	152,4	81,1	761,4	905,6
	Dec	74,8	9,4	67,6	132,6	93,5	164,3	142,2	824,8	1104,6

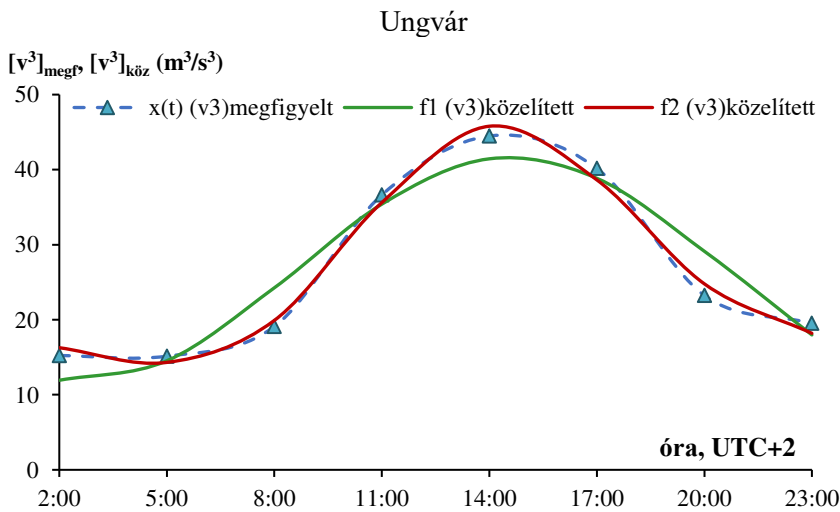
Forrás: saját szerkesztés

20. függelék: A legtöbb energiát hordozó szélsébség tartomány és azok egyes paraméterei Kárpátalján a 2011–2015-ös időszakban

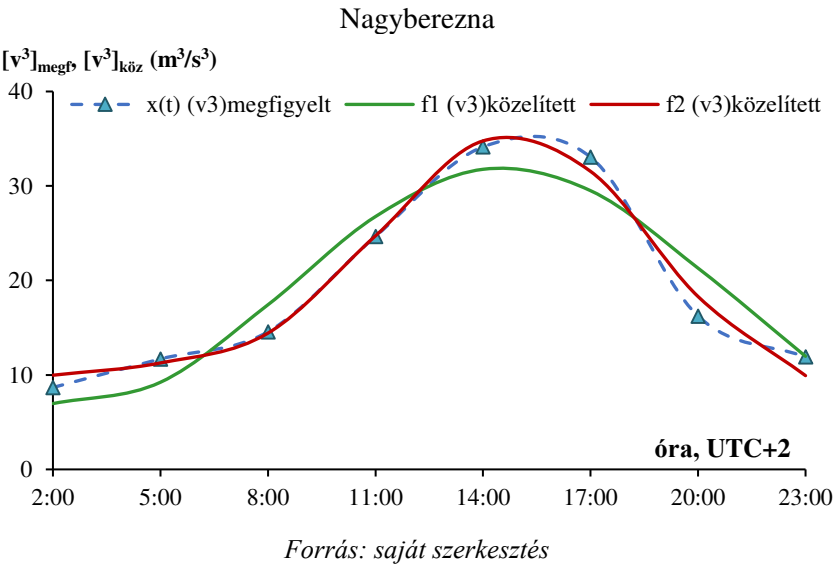
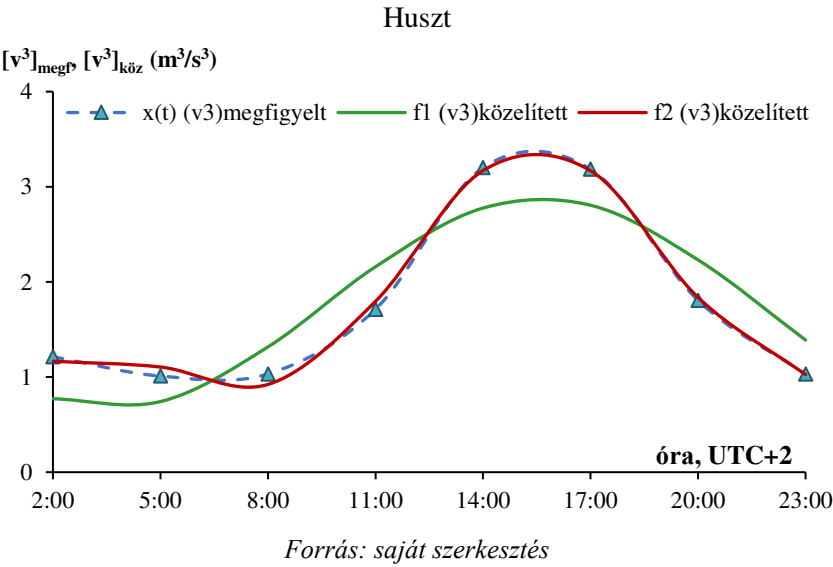
Magasság	Paraméter	Ungvár (112 m)	Huszt (164 m)	Nagyberezna (205 m)	Rahó (430 m)	Ökörmező (456 m)	Alsóverecke (496 m)	Alsóhidegpatak (615 m)	Pláj (1330 m)	Pozsezevszka (1451 m)
10 m	$E_{\max}\Delta x$ (m/s)	3,0-4,0	1,0-2,0	2,0-3,0	4,0-5,0	2,0-3,0	3,0-4,0	2,0-3,0	8,0-9,0	8,0-9,0
	E_i (%)	30,9	92,5	28,2	16,2	39,0	28,6	51,9	11,7	8,8
	$T_{E_{\max}\Delta x}$ (óra/év)	1146	2760	1178	259	988	772	1617	408	215
100 m	$E_{\max}\Delta x$ (m/s)	6,0-7,0	2,0-3,0	5,0-6,0	6,0-7,0	4,0-5,0	5,0-6,0	4,0-5,0	11,0-12,0	11,0-12,0
	E_i (%)	19,8	50,0	19,3	12,0	25,2	19,5	33,8	10,0	7,5
	$T_{E_{\max}\Delta x}$ (óra/év)	770	4200	512	347	850	952	1464	476	258

Forrás: saját szerkesztés

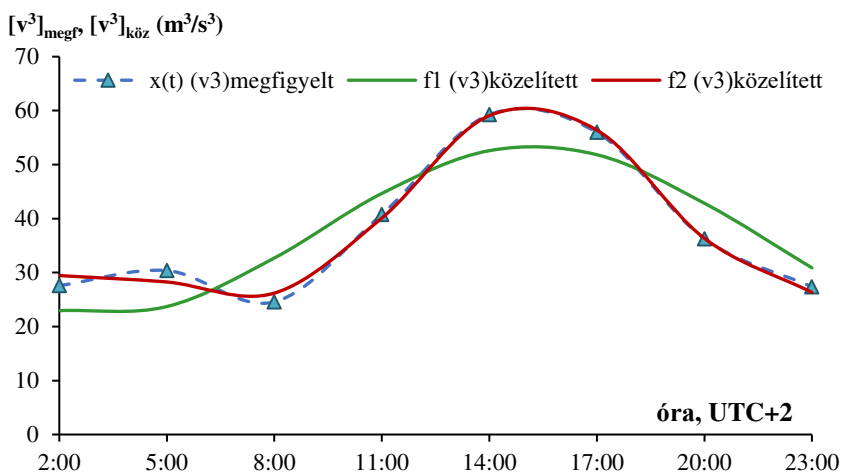
21. függelék: A szélsébség köb átlagok számolt és a közelítő függvénnyel előállított értékeinek napi menete a vizsgált meteorológiai állomásokon, 2011–2015 között



Forrás: saját szerkesztés

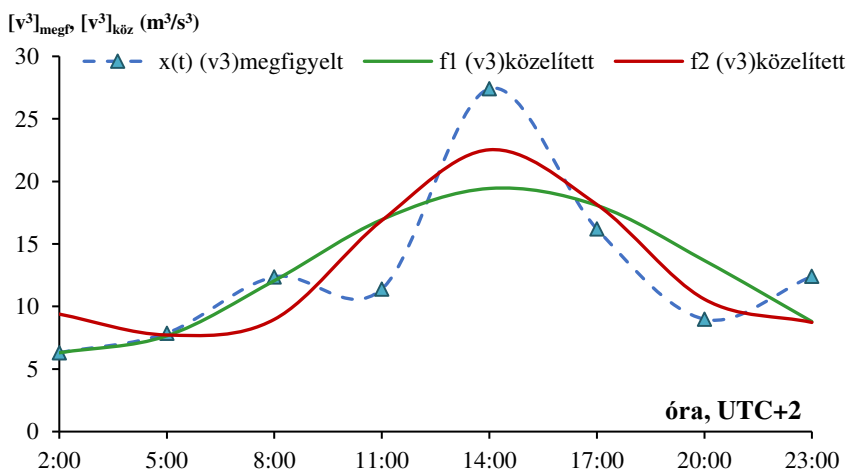


Rahó

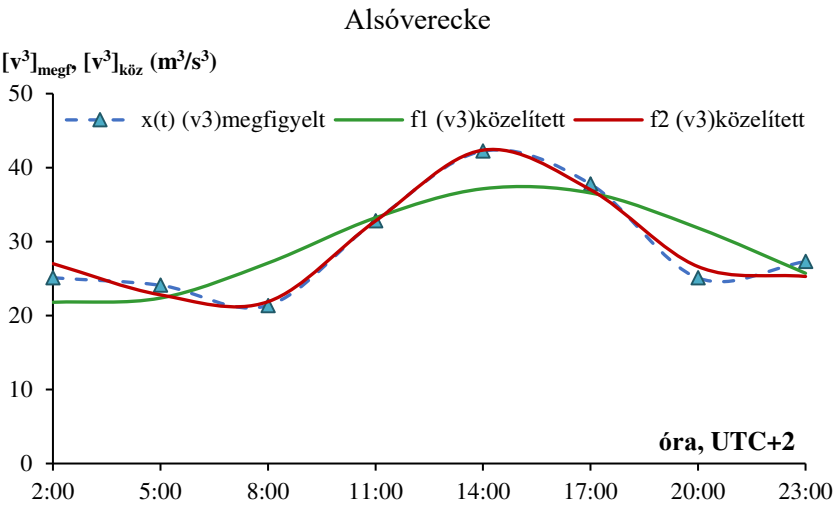


Forrás: saját szerkesztés

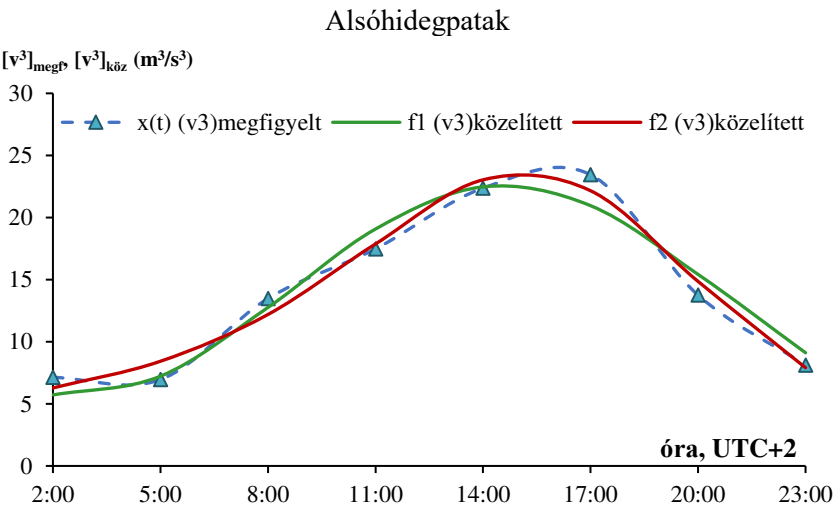
Ökörmező



Forrás: saját szerkesztés

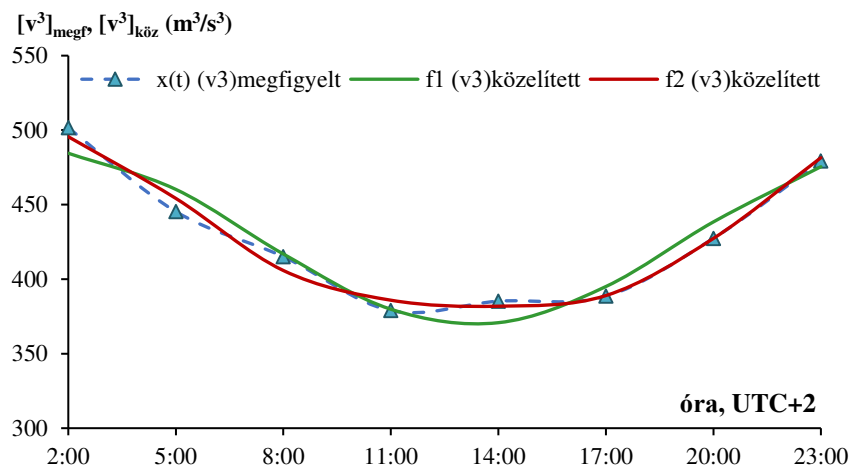


Forrás: saját szerkesztés



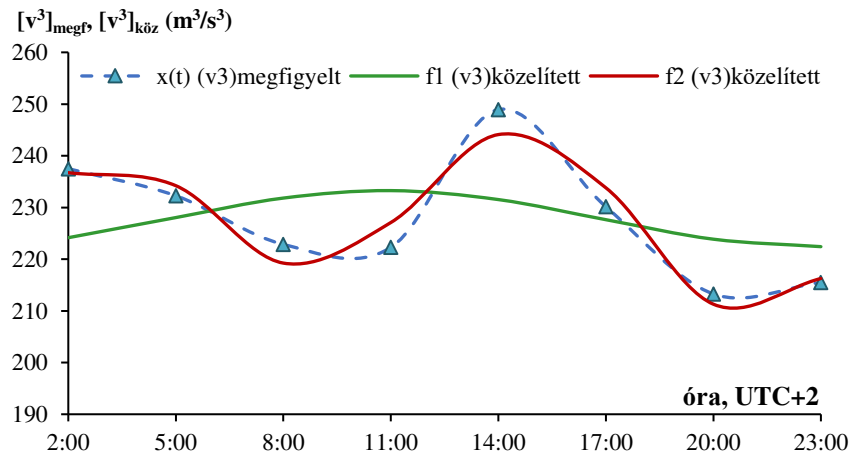
Forrás: saját szerkesztés

Pláj



Forrás: saját szerkesztés

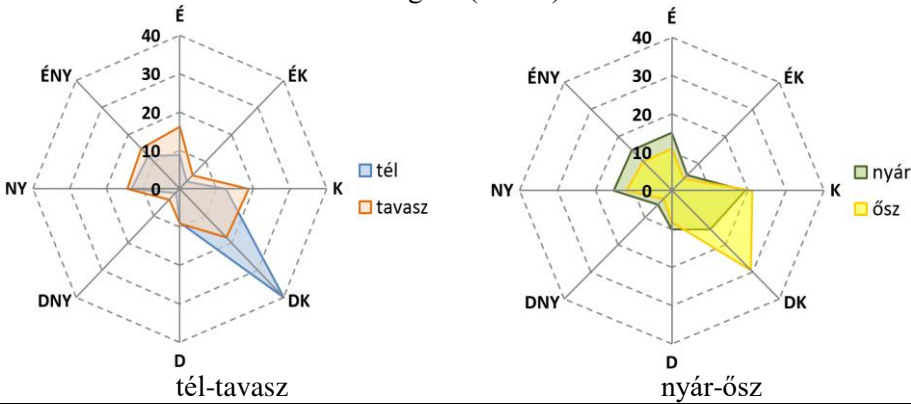
Pozsezsevszka



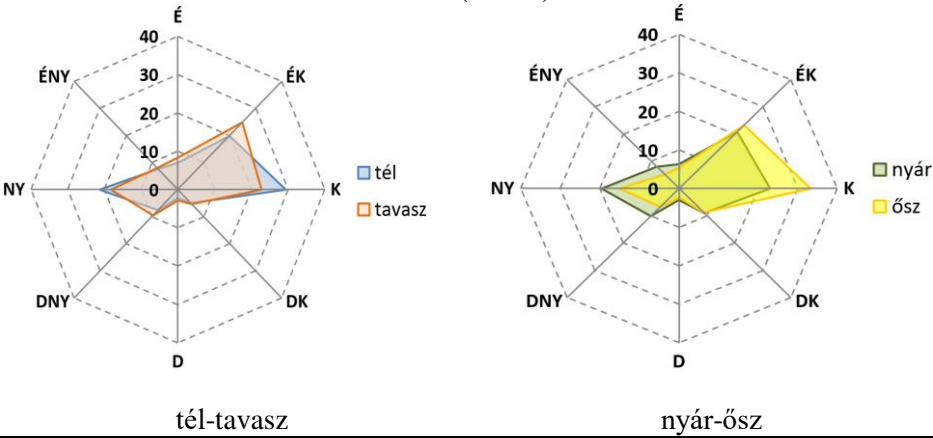
Forrás: saját szerkesztés

22. függelék: A mérőpontok szélrózsái évszakonként, 2011–2015 között

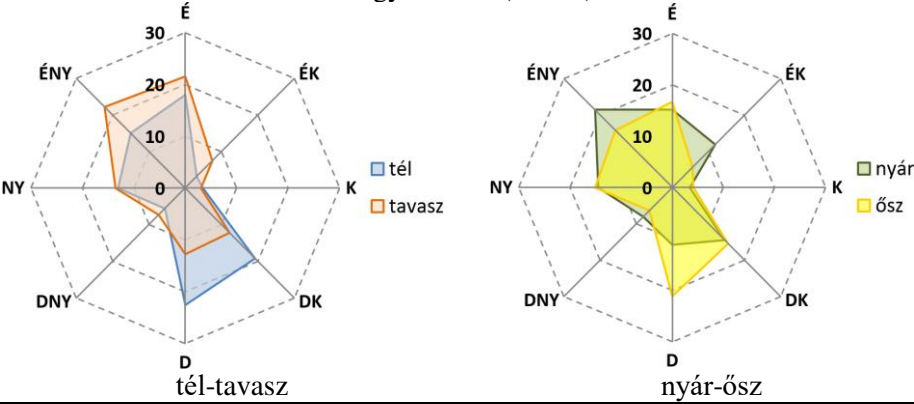
Ungvár (112 m)



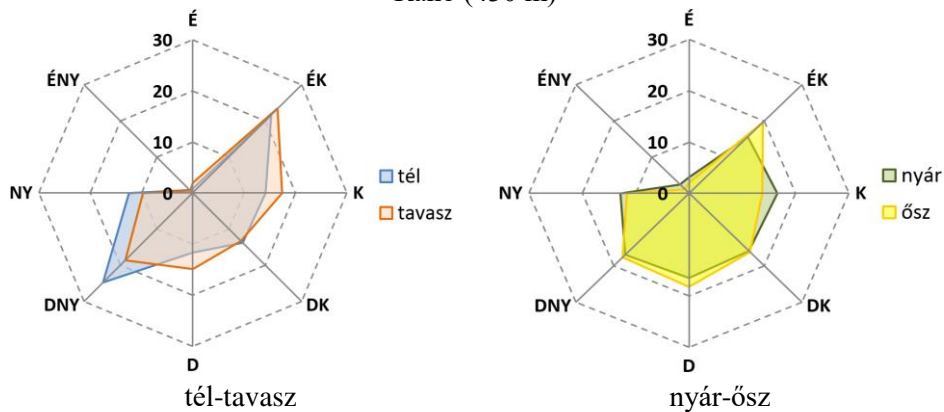
Huszt (164 m)



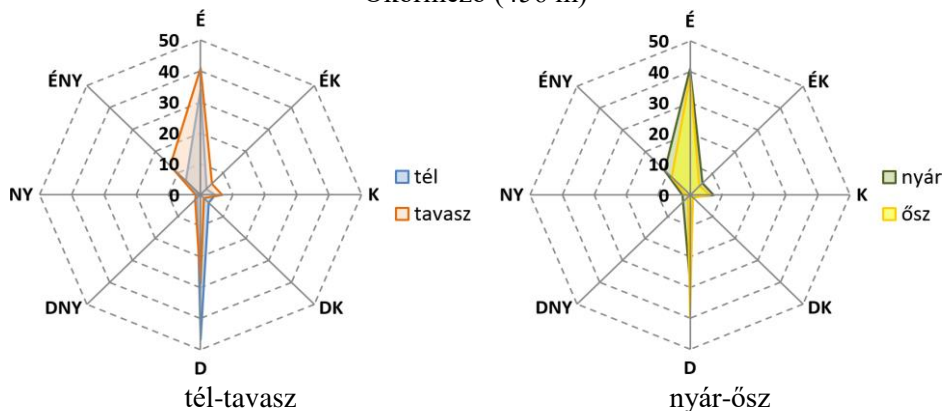
Nagyberezna (205 m)



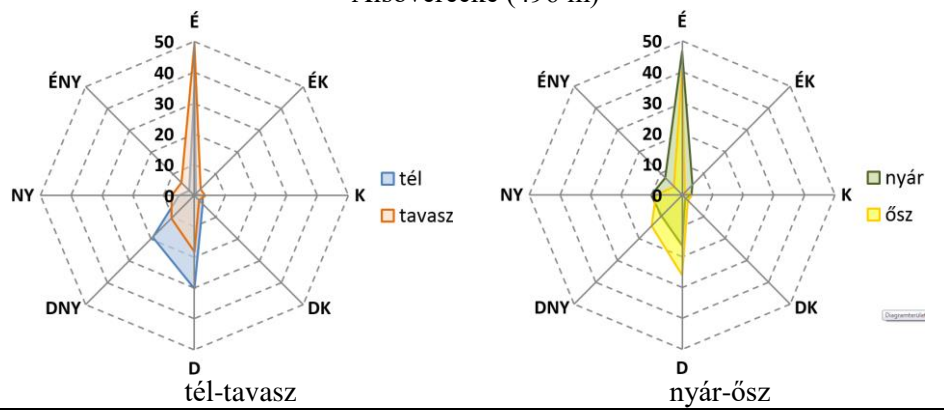
Rahó (430 m)



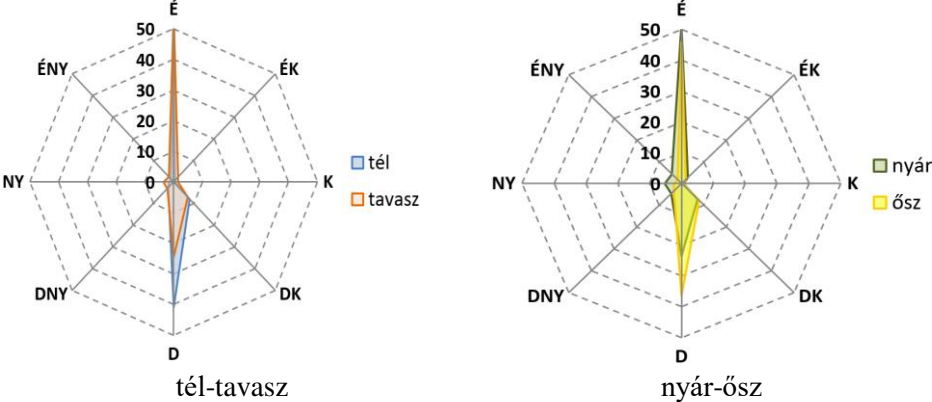
Ökörmező (456 m)



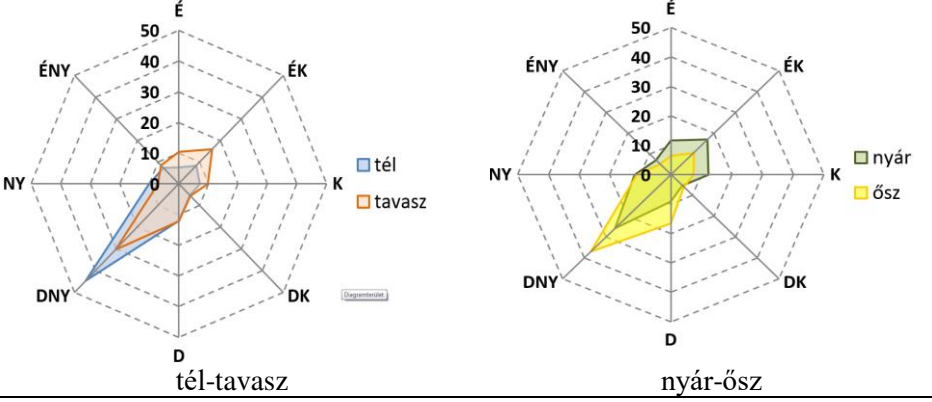
Alsóverecke (496 m)



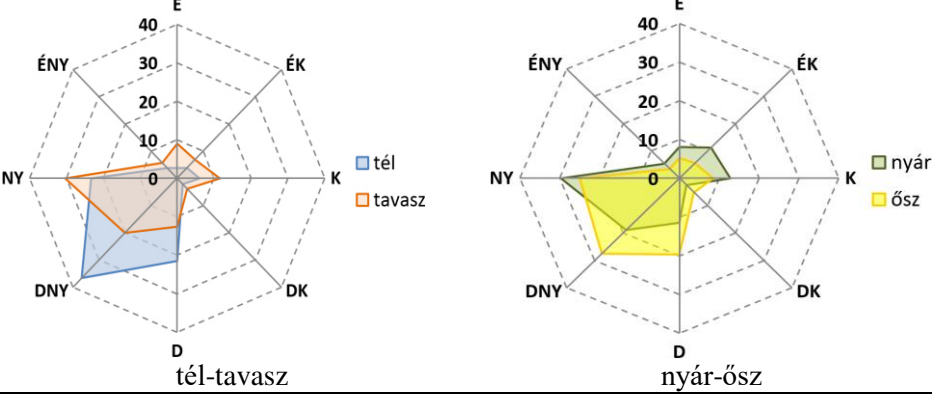
Alsóhidegpatak (615 m)



Pláj (1330 m)



Pozsezsevszka (1451 m)



Іштван Гаднадь

- Г 13** Енергетична характеристика приповерхневого вітрового поля на Закарпатті. Наукове видання (монографія) Закарпатського угорського інституту імені Ференца Ракоці II / Автор: Іштван Гаднадь. Берегове–Ужгород: ЗУІ ім. Ференца Ракоці II – ТОВ «РІК-У», 2023. – 224 с. (угорською мовою)

ISBN 978-617-8046-94-1

Паризька кліматична угода, яка набула чинності в 2016 році, встановила максимальне допустиме підвищення приповерхневої середньорічної температури до 1,5-2 °C відносно доіндустріального періоду. Згідно останнього звіту (AR6) Міжнародної групи експертів зі зміни клімату (IPCC), для досягнення в практиці граничного значення потепління до 1,5 °C викиди парникових газів у кожній країні повинні знизитися до нетто-нуля не пізніше до 2050 року. Україна однією з перших ратифікувала Паризьку угоду про захист клімату, що свідчить про готовність держави до розвитку галузі відновлюваної енергетики та низьковуглецевої моделі національної економіки. За останнє десятиліття використання енергії вітру набуло все більшого значення у декарбонізації української енергетики. З точки зору розширення потужностей вітроенергетики в енергетичній стратегії країни до 2030 року, окрім південного та південно-східного узбережжя, перевага надана західній височинській частині країни та Карпатському регіону. Мета наукового видання – отримати детальну картину статистичних та енергетичних характеристик та структури вітрового поля Закарпаття за даними метеорологічних станцій, визначити райони та періоди, які можуть бути найбільш придатними для використання вітрової енергії в області. Монографія рекомендована дослідникам, галузевим професіоналам, особам, які приймають рішення, викладачам, студентам університетів та інститутів і всім, хто цікавиться темою.

УДК 621.548(477.87)

Наукове видання

Іштван Гаднадь

**ЕНЕРГЕТИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА
ПРИПОВЕРХНЕВОГО ВІТРОВОГО ПОЛЯ
НА ЗАКАРПАТТІ**

Монографія

2023 р.

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Закарпатського угорського інституту
імені Ференца Ракоці II (протокол №4 від 24.05.2022)*

Підготовлено до друку Видавничим відділом спільно з Науково-дослідним центром
імені Іштвана Фодора і кафедрою біології та хімії ЗУІ ім. Ф.Ракоці II

Рецензенти:

*Йосип Молнар, кандидат географічних наук, доцент, завідувач кафедри
(Кафедра географії та туризму, Закарпатський угорський інститут
імені Ференца Ракоці II, м. Берегове)*

*Іштван Лазар, доктор філософії у галузі природничих наук за спеціальністю
(спеціалізацією) «Науки про Землю (Метеорологія і кліматологія)», старший викладач
(Кафедра метеорології, Інститут наук про Землю, Факультет природничих наук
та технологій, Дебреценський університет, м. Дебрецен)*

*Імре Чакі, доктор філософії у галузі природничих наук за спеціальністю (спеціалізацією)
«Науки про Землю (Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)», доцент
(Кафедра будівництва та цивільної інженерії, Інженерно-технічний факультет,
Дебреценський університет, м. Дебрецен)*

Технічне редагування та верстка: *Іштван Гаднадь та Олександр Добош*

Коректура: *авторська та Льдіко Гріца-Варцаба*

Дизайн обкладинки: *Іштван Гаднадь та Ласло Веждел*

УДК: *Бібліотечно-інформаційний центр “Опаці Чері Янош” при ЗУІ ім. Ф.Ракоці II*

Відповідальний за випуск:

Олександр Добош (начальник Видавничого відділу ЗУІ ім. Ф.Ракоці II)

За зміст монографії відповідальність несе автор

Зміст наукового видання було перевірено
на наявність збігів і запозичень сервісом «iThenticate»

Друк монографії здійснено за підтримки Академії наук Угорщини

Видавництво: Закарпатський угорський інститут імені Ференца Ракоці II (адреса: пл. Кошута 6, м. Берегове, 90202. Електронна пошта: foiskola@kmf.uz.ua) *Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції Серія ДК 7637 від 19 липня 2022 року та ТОВ «РІК-У» (адреса: вул. Гагаріна 36, м. Ужгород, 88000. Електронна пошта: print@rik.com.ua) Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготовників і розповсюджувачів видавничої продукції Серія ДК 5040 від 21 січня 2016 року*

Поліграфічні послуги: ТОВ «РІК-У»

Підписано до друку 13.12.2022. Шрифт «Times New Roman».

Папір офсетний, щільністю 80 г/м². Друк цифровий. Ум. друк. арк. 18,2.

Формат 70х100/16. Замовл. № 59К.