

SZÉLIRÁNYOK ENERGETIKAI PARAMÉTEREINEK TERÜLETI ELTÉRÉSE KÁRPÁTALJÁN

TERRITORIAL DIFFERENCES OF ENERGETIC PARAMETERS OF THE WIND DIRECTIONS IN TRANSCARPATHIA

Hadnagy István^{1,2}, Tar Károly¹

¹Meteorológiai Tanszék, Debreceni Egyetem, 4010 Debrecen, Egyetem tér 1., tarko47@gmail.com

²II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola, Biológia és Kémia Tanszék,
90202 Beregszász, Kossuth tér 6, hadistvan@gmail.com

Összefoglalás. A munkánkban bemutatjuk a Kárpátalja területére jellemző szélirány-mező statisztikai szerkezetében – a viszonylag összetett orográfiai környezet függvényében – meglévő jellegzetes vonásokat és évszakos változásokat. Az adatbázisunkat kilenc meteorológiai megfigyelő állomás 3 óránként regisztrált szélesség és szélirány adatai alkották. Külön vizsgáltuk a síkvidéki és a nem síkvidéki állomások szélirányainak karakterisztikáit. Minden állomás esetében lehatároltuk azokat az időszakokat és kiválasztottuk azokat a szélirányokat, amelyek szélenergiában gazdagabbak a többinél.

Abstract. In our work we present the characteristic features and seasonal changes in the statistical structure of the wind direction field in the Transcarpathian region, depending on the relatively complex orographic environment. Our database was composed of data sets of wind speed and wind direction recorded every 3 hours by nine meteorological observation stations. The characteristics of the wind directions of the lowland and non-lowland stations were examined separately. For each station, we defined the periods and selected the wind directions that are richer in wind power than the others.

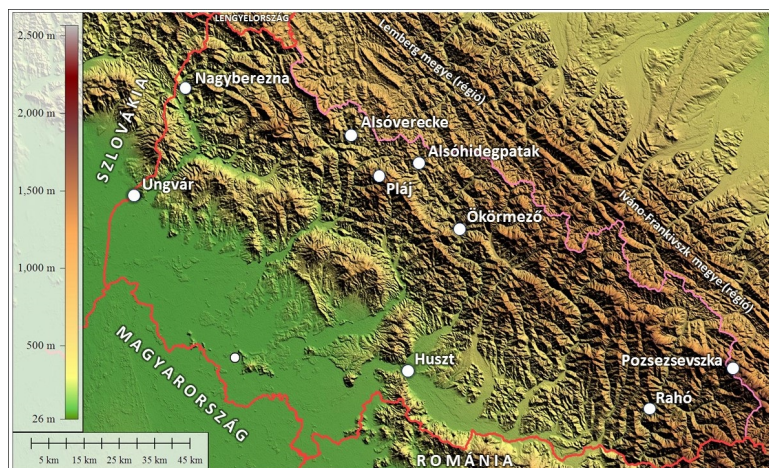
Bevezetés. Az európai és ázsiai mérsékelt övi akciócentrumokban keletkező alacsony vagy magas nyomású légköri képződmények jellemző tulajdonságaik révén lényegesen meghatározzák a Kárpát-medence és ezzel együtt Kárpátalja felett jellemző szélmező tulajdonságait. Az év nagy részében Kárpátalja felett anticiklonális időjárási helyzet uralkodik. A hideg évszakban, akár októbertől májusig, a területre jelentős hatást gyakorol a keleten elhelyezkedő nagykiterjedésű szibériai anticiklon (Andrianov, 1951; Bodnar, 1987; Voropay and Kunitsa, 1966). Északról, a Barents-tenger térségéből, sarkvidéki légtömegek is betörnek ide (Herenchuk, 1981). A hideg levegő a Kárpátokon hirtelen átkelve és az alföld felé zúdulva a hegyvidéken nem ritkán 40 ms⁻¹-os (Salyuk et al., 2013) sebességű szelet okoz. Télen, az anticiklonális időszak mellett, jellemző a nyugatról és délnyugatról beáramló óceáni légtömegek megjelenése is (Bodnar, 1987). A tavasz beálltával a térségben az azori anticiklon légtömegei válnak uralkodóvá. A tavasz végére és a nyár első felére a területen a légáramlást tekintve meghatározóvá válik a nyugati és északnyugati irány (Voropay and Kunitsa, 1996; Herenchuk, 1981). A nyugatról érkező óceáni légtömegek a nyári évszakban viszonylag rövid ideig tartó lehűlést, jelentős mennyiségű csapadékot, esetenként intenzív, pontszerű zivatarok kialakulását eredményezik. A rövid ideig tartó zivatarokat a síkvidéken 20–25 ms⁻¹-os, a középhegységi csúcson akár 40 ms⁻¹-os sebességű szellőkések

és jégeső kísérik (Lavnyy and Lässig, 2009). Az őszi időszakban fokozatosan felújul a télre jellemző áramlási rendszer, a szibériai anticiklon egyre érzékelhetőbb hatásával, gyenge légmozgással járó, hűvös, ködös időjárással.

A helyi légkörtérre lényeges hatást fejtenek ki az itt húzódó Kárpátok, azon belül a Kárpátalját érintő Északkeleti-Kárpátok északnyugat-délkeleti csapásirányú vonulatai. Az 1200–1500 m tengerszint feletti magasságot meghaladó területeken a makroszintoptikus helyzetek a nyugati áramlásnak kedveznek (Buchynszky, 1971): télen – délnyugati, nyáron – nyugati és északnyugati (Tykhanovych and Bilanyuk, 2004). Az alacsonyabban fekvő térségeken, folyó völgyekben a szélmező tulajdonságai ettől jelentősen eltérhetnek, és a lokális domborzati tényezőktől függenek. A nyugati, északnyugati atlantikus légtömegek a hegyvidék csapásirányával közel párhuzamosan haladnak végig, alig változtatva meg irányukat. A délnyugati földközi-tengeri, keleti kontinentális és északkeleti arktikus légtömegek haladási iránya viszont a hegységrendszerre közel merőlegesen történik. Az utóbbi

esetében a hegyvidék visszatartó hatása már fokozottabban érvényesül (Andrianov, 1961).

Az itt működő meteorológiai állomások többsége mély, szélvédett hegyvidéki folyó völgyekben helyezkedik el. A völgyekben a különböző irányból érkező légáramlatok felveszik és követik a völgy hosszanti irányát. A meteorológiai állomások



1. ábra: Az adatbázist alkotó meteorológiai megfigyelő állomások földrajzi elhelyezkedése

kon regisztrált szélirányok ily módon nem a nagytérsegi irányszektorokat, hanem a folyóvölgy földrajzi orientációját tükrözik. A mélyebben fekvő folyóvölgyi állomásokon gyakori a szélsend (Szalyuk et al., 2013).

A munkánk célja, hogy bemutassuk a Kárpátalja területére jellemző szélirány-mező statisztikai szerkezetében a viszonylag összetett orográfiai környezet függvényében meglévő jellegzetes vonásokat és évszakos változásokat.

A felhasznált adatok. Adatbázisunkat kilenc meteorológiai megfigyelő állomás 3 óránként regisztrált szélesebség és szélirány adatsorai alkották. Az adatsorokat a Kárpátaljai Megyei Hidrometeorológiai Központtól vásároltuk meg. Az adatok 2011. január 1-től 2015. december 31-ig terjedő időszakra vonatkoznak. Az állomások földrajzi elhelyezkedését az 1. ábrán mutatjuk be. Az 1. táblázatban pedig megadjuk ezen állomások pontos földrajzi koordinátáit, tengerszint feletti magasságát, valamint a szélesebség-mérő talajfelszín feletti magasságát.

1. táblázat: A meteorológiai állomások pontos földrajzi koordinátái és az anemométer talajfelszíntől mért magasságai (φ : földrajzi szélesség, λ : földrajzi hosszúság, h : tengerszint feletti magasság, h_a : az anemométer felszín feletti magassága)

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

A jellemző szélirányok meghatározása. Az energiatartalom a szélmező egyik fontos strukturális eleme, ami szorosan összefügg a szélirányok és szélesebségek gyakorisági eloszlásával külön-külön, de együttesen is. A szélmező bármely karakterisztikájának megváltozása tehát a potenciális szélenergia megváltozását vonja maga után. Ezért olyan indikátor szélirányokat keresünk, amelyek az adott területen és időszakban energetikailag és klimatológiailag meghatározók, a klimatológiai feltételek megmaradása esetén változatlanok, stacionáriusak, az éghajlatban bekövetkező bármiféle változás esetén azonban kicserélődhetnek. A szélirányok gyakorisági eloszlása évszaktól is függően szoros sztochasztikus kapcsolatban van a szélirányok relatív energiatartalmával, átlagsebésségével, illetve átlagos időtartamával, és vannak olyan szélirányok, amelyeknél ezek a karakterisztikák szignifikánsan különböznek a többi szélirány esetében megfigyelttől (Tar, 2013). Annak vizsgálatára, hogy a szélirányok közül melyek azok, amelyek gyakorisága szignifikánsan meghatározott, tehát nem véletlenszerűen vannak jelen az adott helyen az adott időszakban, egy, a

valószínűségek egyenlőségének eldöntésére vonatkozó átalakított statisztikai próbát (Vince, 1975) alkalmaztunk. A 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, ha $g_D < h_2$, akkor pedig nem jellemző irányoknak nevezzük (Tar and Verdes, 2003; Tar, 2004).

A h_1 és h_2 értékei (Vince, 1975):

$$h_1 = p_0 n - u_\varepsilon \sqrt{np_0(1-p_0)} \quad \text{és} \\ h_2 = p_0 n + u_\varepsilon \sqrt{np_0(1-p_0)} \quad (1)$$

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

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

összefüggésből határozható meg, ahol $\Phi(x)$ a standard normál eloszlású valószínűségi változó eloszlásfüggvénye. Így, ha $\varepsilon = 0,0027$ (Péczeley, 1957), akkor $u_\varepsilon = 2,28$.

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.

Egy adott D szélirány adott időszakra (pl. év, évszak, hónap) vonatkozó átlagos energiatartalmát a D napi átlagos fajlagos szélteljesítményével lehet meghatározni, amely az alábbi összefüggéssel írható le:

$$P_{f1}(D) = \frac{\rho}{2} \sum_{j=1}^k \frac{f_{Dj}}{N} v_j^3 \quad (3)$$

ahol, f_{Dj} annak gyakorisága, hogy D irányú szél sebessége v_j legyen, k a szélesebség-intervallumok, N pedig az adott időszakban figyelembe vett esetek száma. Ha P_{f1} az időszak (irányoktól független) napi átlagos fajlagos szélteljesítménye, akkor a

$$p_D = \frac{P_{f1}(D)}{P_{f1}} \quad (4)$$

arány az adott szélirány relatív energiatartalmát adja meg. A legnagyobb energiatartalommal bíró jellemző szélirányt energetikai uralkodó széliránynak tekintjük (Tar and Verdes, 2003; Tar, 2004).

Az irányoktól független fajlagos szélteljesítmény megadható az adott mérési magasságban előállított relatív gyakorisági eloszlások segítségével (Osadchyi et al., 2015; Moskalchuk, 2017):

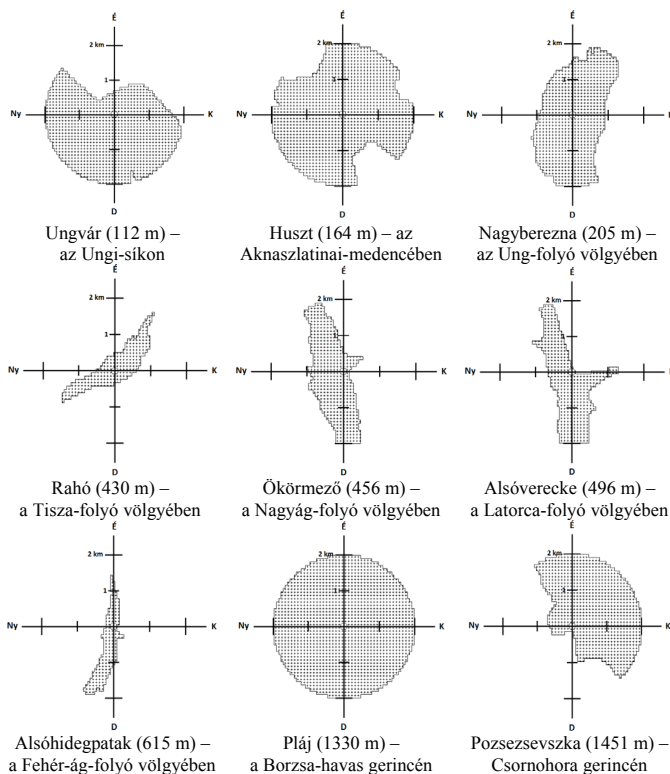
$$P_{f1} = \frac{\rho}{2} \sum_{i=1}^n p_i v_i^3 \quad (5)$$

ahol v_i^3 a sebesség-intervallumok ($\Delta x = 1 \text{ ms}^{-1}$) középpontjainak (v_i) köbös értékei, a p_i a hozzájuk tartozó relatív

gyakoriságok, az n pedig a sebesség-intervallumok száma. Az adott szélirány átlagsebessége erősen függ az anemométer talajfelszín feletti magasságától. Az 1. táblázatban látható, hogy a vizsgálatba vont meteorológiai mérőállomások némelyikén (Ungvár, Huszt, Pláj és Pozsezevszka) a szélesség mérő az előírt 10 m-nél magasabbra vagy alacsonyabbra van elhelyezve. Ezért, az eredmények összehasonlíthatósága érdekében, a mért szélesség adatokon magassági korrekciót végeztünk a WMO által elfogadott félempirikus magassági korrekció felhasználásával (Mezősi és Simon, 1981):

$$v_h = v_{10} [0,233 + 0,656 \lg(h + 4,75)] \quad (6)$$

ahol a v_h – a $h \neq 10$ m-en mért, a v_{10} – a 10 m magasságban mért/számolt szélesség. Így minden állomáson a 10 m-es szintre vonatkozó szélességekkel dolgoztunk.

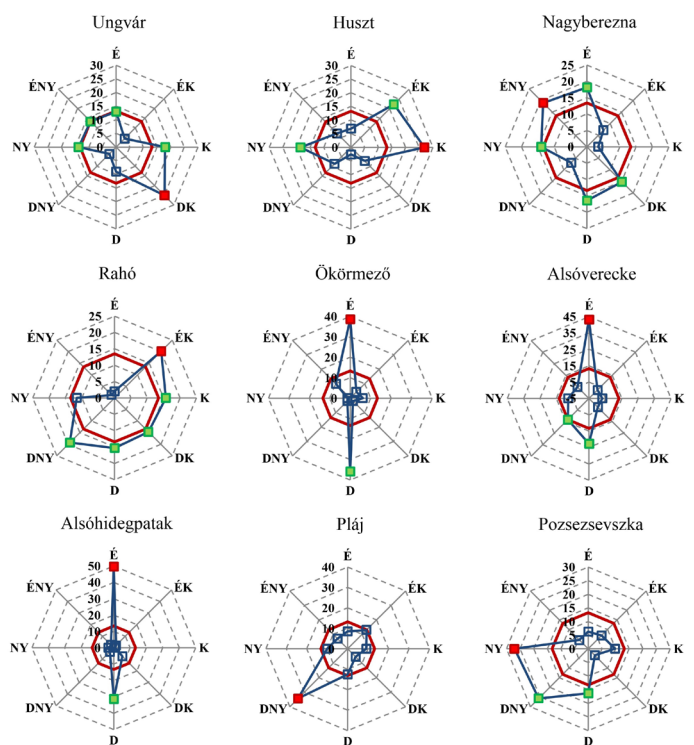


2. ábra: A domborzat horizontkorlátozó hatása az állomások körül (360°-ban) egy 2 km-es sugarú körben, 10 m-es magasságban

Eredmények. A mintaterületen az állomások különböző orográfiai környezetben helyezkednek el. A legalacsonyabban (Ungvár, 112 m) és a legmagasabban (Pozsezevszka, 1451 m) fekvő állomás relatív szintkülönbsége 1339 m. Az 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 a SRTM által tartalmazott egyéb felszíni érdekességet befolyásoló elemek (pl. magas épülete, erdő) horizontkorlátozását bemutató kördiagramokat. A 2. ábra jól szemlélteti az egyes égtájak felől a domborzat hatását a felszín közeli szélmező tulajdonságaira. A nyitott hegygerincen található Pláj esetében egész 360°-os kört kapunk, míg a szűk hegyvi-

déki medencében, folyóvölgyben fekvő Nagyberezna, Rahó, Ökörmező, Alsóverecke és Alsóhidegpatak esetében csupán keskeny sávot, amely az adott völgy hosszanti irányát és minden bizonnyal egyben az ott uralkodó szél iránszektorát is ábrázolja.

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, a bárium mezők szezonális eloszlása és azok kölcsönhatása által megszabott alapáramlason kívül, a Szász és Tőkei (1997) által leírt hegy-völgyi szél mechanizmusára is visszavezethető. Kárpátalja hegyvidéki részén a 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



3. ábra. A szélirányok relatív gyakoriságai és a jellemző szélirányok a vizsgált állomásokon a 2011-2015. közötti időszakban (pirossal kitöltött jelölő a leggyakoribb jellemző szélirány, zölddel kitöltött jelölők a többi jellemző szélirány)

folyamán periodikus járást mutatnak. 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 adtak az Ung, Latorca, Borzsa, Nagyág, Tarac és Talabor folyók völgyében.

A szélirányok empirikus relatív gyakorisága és a jellemző szélirányok. Első lépésben elkészítettük a mérőponton a szélirányok empirikus relatív gyakoriságát az egész időszakra és évszakosan is. Az energetikai vizsgálatoknál ugyan a 16 iránszektoros 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 bemutatott statisztikai próba segítségével az állomások szélirány eloszlásaira meghatároztuk 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, ezekből egy-egy állomáson akár több is lehet. A mérőpontok szélrózsáit az egész időszakra a 3. ábrán mutatjuk be.

Általánosan elmondható, hogy az eloszlások erősen tükrözik az orográfiai viszonyokat, különösen a szűk folyóvölgyekben elhelyezkedő állomásokon. A szélrózsák piros jelölői a leggyakoribb jellemző irányokat, a zöld az egyéb jellemző irányokat, a kitöltetlen kék 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% (Alóhidegpatak) 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, az alföld és a vulkanikus-vonulat határán), Huszt (a Huszti-kapuban, a Tisza völgyében, a Kárpátaljai-alföld és az Aknaszlatinai-medence határán), Nagy-berezna (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 Nagygagy folyó völgyében), Alsó-verecke (a Latorca folyó völgyében), Alsóhidegpatak (a Fehérgagy 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 folyóvölgyeken keresztül, illetve a hegy-völgyi cirkuláció is okozója lehet a meridionális áramlásnak. A hegygerincen elhelyezkedő Pláj és Pozsezszevszka egy más légréteg áramlási viszonyait mutatja, a nyitott környezet ellenére 1–3 jellemző irány adódik D, DNY és NY felől. A jellemző irányok egyes éves és évszakos statisztikai értékeit a 2. táblázatban mutatjuk be. Megállapítható, hogy évsza-

2. 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
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	<u>16,6</u>	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
Alsóverecke (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	<u>34,4</u>	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

3. táblázat: Az állomások szélirányainak átlag szélessége (ms⁻¹); (kiemelve: félkövér – az adott állomáson belüli legnagyobb szélesség, piros – a leggyakoribb jellemző szélirány, zöld – egyéb jellemző szélirányok)

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)	Pozsezszevszka (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

kos eloszlásban három állomáscsoportot lehet megkülönböztetni:

- ahol az éves és egyes évszakos leggyakoribb szélirány megegyezik (Alsóverecke, Alsóhidegpatak és a Pláj);
- ahol az éves és a tavaszi, nyári leggyakoribb szélirány megegyezik (Nagyberezna, Ökörmező és a Pozsezszevszka);
- 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 Alsóhideg-

patakon 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%-al.

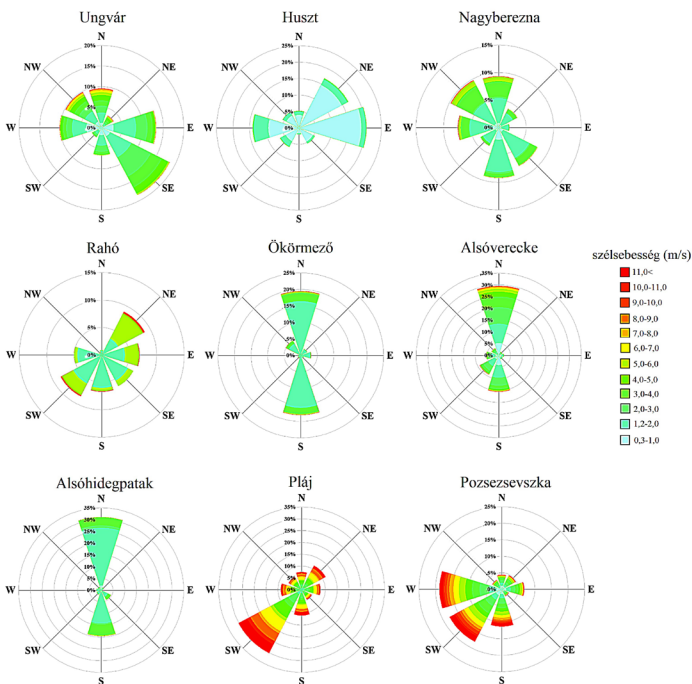
A szélirányok átlagsebességeinek jellemzői. A 3. táblázatban látható az állomások szélirányainak átlagszélessége. A 1000 m feletti légrétegben elhelyezkedő két állomás legszelesebb DNY-i irányát (átlagosan 6,0 ms⁻¹) nem számítva Kárpátalján az északias (ÉNY, É, ÉK) szelek rendelkeznek a legnagyobb átlagsebességgel (2,5 ms⁻¹).

A táblázatból kiderül az is, hogy a maximum átlagsebesség

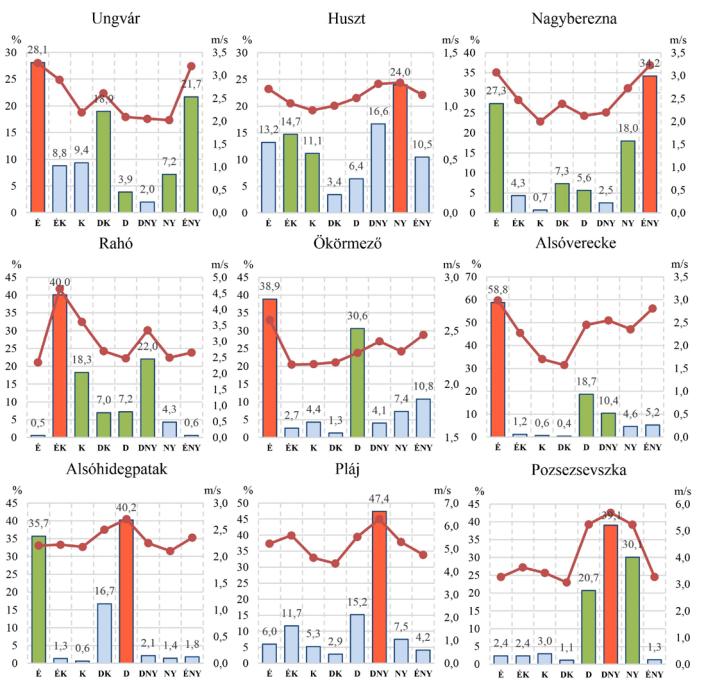
- a leggyakoribb szélirányhoz (Nagyberezna, Rahó, Ökörmező, Alsóverecke és a Pláj) vagy
- egy jellemző szélirányhoz (Ungvár, Huszt, Alsóhidegpatak és Pozsezszevszka) tartozik.

A szélirányok szélesség értékeinek szemléletesebb megjelenítése érdekében elkészítettük az állomások szélirányonkénti szélesség eloszlásait (4. ábra). Megfigyelhető, hogy minden állomás sajátos, egyedi mintázattal rendelkezik. Az alföldi és folyóvölgyi mérőpontok irányonkénti sebességeloszlásaiban is érvényesül az orográfiai hatás, mivel a legnagyobb átlagsebességek a nyitott égtájak felől jelentkeznek. A jellemző szélirányok átlagsebessége 1,2 ms⁻¹-mal nagyobb, mint a nem jellemzőké, 1,0 ms⁻¹-mal pedig az állomások éves átlagsebességénél. A jellemző irányok átlagsebességei legnagyobbak a Plájon (6,3 ms⁻¹), a Pozsezszevszkan (5,4 ms⁻¹) és Rahón (3,3 ms⁻¹), legkisebbek Huszton (1,1 ms⁻¹). A nem jellemző irányok átlagsebessége szintén Huszton (1,0 ms⁻¹) a legkisebb és a Pozsezszevszkan (1,3 ms⁻¹) a legnagyobb.

A hegységi állomások jellemző szélirányainak átlagsebessége átlagosan 2,5-szer nagyobb, mint az alföldi és folyóvölgyi állomásoké, a nem jellemző irányok eset-



4. ábra.: A szélirányszektorokhoz tartozó szélesség eloszlás az egyes állomásokon a 2011–2015. közötti időszakban



5. ábra. A különböző szélirányok relatív energiatartalma (%), azok átlagsebessége (piros vonal), az energetikai uralkodó szélirányok (piros oszlop) és a többi jellemző szélirányok (zöld oszlop) az egyes állomásokon a 2011–2015. közötti időszakban

ben pedig ez az arány 2,0. Mérőpontonként megvizsgálva a jellemző és a nem jellemző szélirányok sebességeloszlásaiban a $v_i \geq 3 \text{ ms}^{-1}$ szélességek (a szélérművek leggyakoribb indító sebessége) kumulált gyakoriságait megállapítható, hogy átlagosan a $v_i \geq 3 \text{ ms}^{-1}$ szélességek 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%), Nagyberezna (90,0%), Rahó (94,2%). A $v_i \geq 3 \text{ ms}^{-1}$ szélességek megjelenésének gyakorisága alapján az állomások szélirány szélesség-eloszlásában az látható, hogy a orográfiai hatás a szélirányok-sebesség-eloszlásaira legerősebben Alsóvereckén, Alsóhideg-patakon és Ökörmezőn jut érvényre. Ezek az állomásokon tapasztalható az egyes jellemző szélirányokhoz tartozó $v_i \geq 3 \text{ ms}^{-1}$ szélességek kumulált gyakoriságainak maximuma, mégpedig Alsóvereckén az É irányra 59,2%-a, Alsóhideg-patakon a déli irányra 45,5%-a, Ökörmezőn szintén egy meridiális É irányra 43,8%-a esik.

A szélirányok relatív energiatartalma. A (4) képlet szerint meghatároztuk az egyes szélirányok relatív energiatartalmát. A legnagyobb energiatartalommal bíró jellemző szélirányt az uralkodó széliránynak tekintjük. A definíciót követve az 5. ábrán minden állomáson kijelöltük az energetikai uralkodó szélirányt. Mivel a szélteljesítmény a szélesség harmadik hatványával egyenlő (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 16,0% (Ungvár) és 47,4% (Pláj) között van. 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) közötti értékeket vesz fel. Egy jellemző szélirány éves átlagban 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 (4. táblázat). Az uralkodó szélirányok nagyobb relatív energiatartalma szintén az összetett orográfiajú állomásokon tapasztalható, 24,0% (Huszt) és 58,8% (Alsóverecke) között alakul. Évszakos bontásban vizsgálva a szélességek relatív energiatartalmát (4. táblázat) elmondható, hogy a jellemző szélirányok összes relatív energiatartalma az alföldi és folyóvölgyi állomásokon télen és ősszel kisebb, míg tavasszal és nyáron nagyobb, mint a hegységi állomásokon. Az alföldi és folyóvölgyi 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%).

4. táblázat: A jellemző szélirányok együttes és átlagos relatív energiatartalma (CWD_E és CWD_{E1}), egy nem jellemző (NWD_{E1}) szélirány átlagos relatív energiatartalma, az energetikai uralkodó szélirányok (EPWD), azok energiatartalma ($EPWD_{E1}$), egy jellemző és nem jellemző szélirány energiatartalmának aránya (CWD_{E1}/NWD_{E1}) a 2011–2015-ös időszakban (kiemelve: **félkövér** – a legnagyobb, **dölt** – a legkisebb érték)

Időszak	CWD_E (%)	CWD_{E1} (%)	NWD_{E1} (%)	EPWD	$EPWD_{E1}$ (%)	CWD_{E1}/NWD_{E1}
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	36,6	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	13,8	11,7	NY	19,2	1,2
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
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
tavasz	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
tavasz	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
tavasz	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
tavasz	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
Pozsezsevszka (1451 m)						
év	89,9	30,0	2,0	DNY	39,1	15,0
tél	94,6	31,5	1,1	DNY	45,3	28,6
tavasz	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

A hegységi állomásokon a sorrend: nyár (27,6%), tavasz (31,6%), ősz (32,1%) és tél (47,4%). Az uralkodó szélirány Huszton, Rahón, Alsóverecskén és a 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 szélirányra télen átlagosan 10,9-szer, tavasszal 6,9-szer, nyáron 5,6-szor és ősszel 7,1-szer több energia esik, mint egy nem jellemző irányra. Az abszolút maximum a Pozsezevszka télen jelentkezik, amikor egy jellemző szélirány átlagosan 28,6-szor több energiát szállít. A szélirányok gyakorisága és sebessége, illetve relatív energiataralma közötti kapcsolatot lineáris korrelációval és regresszióval vizsgáltuk. Az 5. táblázatban megadjuk a lineáris korrelációs együttható és a regressziós együttható értékeit. A korrelációs együttható 0,05 szignifikancia szinthez tartozó kritikus értéke esetünkben ($n = 8$) $r_{0,05} = 0,6319$, vagyis a kapcsolat Ungvár és Huszt esetében sehol sem szignifikáns, míg Nagybereznán, Rahón, Alsóverecskén, a Plájon és a Pozsezevszka mind a szélesség és a relatív energiataralom összefügg a szélirányok gyakorisági eloszlásával. Alsóverecskén csak az energia esetében mutatható ki szignifikáns összefüggés, emellett minden állomáson a relatív energia korrelációs együtthatói nagyobbak, tehát a kapcsolat a relatív energiataralom esetében tekinthető statisztikai értelemben meghatározottnak. Ez azt is jelenti, hogy a szélirányok energiataralmát nem a sebesség, hanem az előfordulás gyakorisága határozza meg elsősorban. 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 a Plájon okozza az energiataralom legnagyobb (0,99%), Huszton pedig a legkisebb (0,19%) változását. Az egyes állomások esetében az 1 körüli értékek arra utalnak, hogy a szélirányok gyakorisága és relatív energiataralma lényegében együtt változik.

Irodalom

- Andrianov, M., 1951: Az USzSzk nyugati megyéinek éghajlati-cirkulációs tényezőiről (О циркуляционных факторах климата западных областей УССР). *Lembergi Egyetem kiadványa*, „Geograf” 1, 24–29. (in Russian)
- Bodnar, V. (szerk.), 1987: Kárpátalja természeti kincsei (Природні багатства Закарпаття). *Kárpáti Kiadó, Ungvár*, 50–66. (in Ukrainian)
- Buchynszkyu, I., 1971: Az Ukrán-Kárpátok éghajlata (Климат Українських Карпат). *Naukova dumka Kiadó, Kijev*, 12–25. (in Russian)
- Herencsuk, K. (szerk.), 1981: Ukrán-Kárpátok természete (Природа Українських Карпат), *Viscsa skola, Lembergi Egyetem, Lemberg*, pp. 156 (in Ukrainian)
- Lavnyu, V. and Lässig, R., 2009: Erős szelek az Ukrán-Kárpátokban (Сильні вітри в Українських Карпатах). *Naukovij visznik NLTU Ukrajini* 19(14), 239–246. (in Ukrainian)

5. táblázat: Lineáris korreláció (r) és regresszió (b) a szélirányok relatív gyakorisága, valamint az átlagos szélesség és relatív energiataralom között (kiemelve: félkövér – szignifikáns esetek)

Korreláció és regresszió		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	0,084	-0,346	0,702	0,652	0,545	0,651	0,280
	b	0,01	0,12	0,49	0,43	0,30	0,42	0,08	0,73	0,88
relatív energia	r	0,489	0,439	0,774	0,779	0,979	0,980	0,917	0,994	0,967
	b	0,24	0,19	0,60	0,61	0,96	0,96	0,84	0,99	0,93

- Lysen, E.H., 1982: Introduction to Wind Energy. *Publication CWD 82-1, Amesfoort*
- Mezősi, M. és Simon, A., 1981: A meteorológiai szélérés elmélete és gyakorlata. *Meteorológiai Tanulmányok 36, OMSZ, Budapest*
- Moskalchuk, N.M. and Pryhodko M.M., 2017: The assessment of wind energy potential with in the Carpathian region of Ukraine. *Naukovij visznik NLTU Ukrajini*, 27(1), 125–128. (in Ukrainian)
- Obádovics, J. Gy., 2003: Valószínűségszámítás és matematikai statisztika. *Scolar Kiadó, Budapest*
- Osadchyi, V. I., Skrynnyk, O. A., Skrynnyk, O. A. and Skrynnyk, O. Ya., 2015: Estimation of a modern stage of wind resources in the Ukrainian Carpathians and their changes regarding the base climatological period. *Dopovigvi NAN Ukrajini* 8, 95–99. (in Ukrainian)
- Patay, I., 2003: A szélenergia hasznosítása. *Szaktudás Kiadó Ház, Budapest*, pp. 119
- Péczezy, Gy., 1957: Áramlási viszonyok Magyarországon különböző makroszinoptikus helyzetekben. *Időjárás* 61, 408–419.
- Pivniak, H., Skrabets, F., Neuberger, N. and Cyplenkov, D., 2015: A szélenergetika alapjai (Основи вітроенергетики). *NHI, Dnipropetrovszk*, pp. 335 (in Ukrainian)
- Szalyuk, M., Melnychuk, V. and Mykyta, M., 2013: Kedvezőtlen meteorológiai jelenségek vizsgálata Kárpátalján (Аналіз несприятливих метеорологічних явищ на Закарпатті), *Naukovij visznik Uzshorodszkoho Univerzitetu: Geografia. Zemleusztrij. Prirodokorisztuvannya* 2, 32–42. (in Ukrainian)
- Szász, G. és Tőkei, L., (szerk.) 1997: Meteorológia mezőgazdáknek, kertészeknek, erdészeknek. *Mezőgazda Kiadó, Budapest*. pp. 722
- Tar, K., 2004: A szélirányonkénti energetikai paraméterek időbeli és területi eltérése Magyarországon. *Földrajzi Értesítő* 53(3–4), 219–233.
- Tar, K., 2013: Designer Parameters of the Wind Directions. *Geographical Locality Studies* 1(1), 132–149.
- Tar, K. and Verdes, E., 2003: Temporal change of some statistical characteristics of wind direction field over Hungary. *Időjárás* 107(2), 153–170.
- Tykhanovych, E. and Bilanyuk, V., 2014: A szél harása a lavina helyzet kialakulására (Вплив вітру на формування лавинної ситуації). *Geopolitika i ekogeodinamika rehionov* 10(1), 227–230. (in Ukrainian)
- Vince, I., 1975: Matematikai statisztika ipari alkalmazásokkal. *Műszaki könyvkiadó, Budapest*
- Voropay, L. and Kunica M., 1996: Ukrán-Kárpátok. Természetföldrajzi jellemzők (Українські Карпати. Фізико-географічний нарис). „Ragyanszka skola” Kiadó, Kijev, pp. 168 (in Ukrainian)