

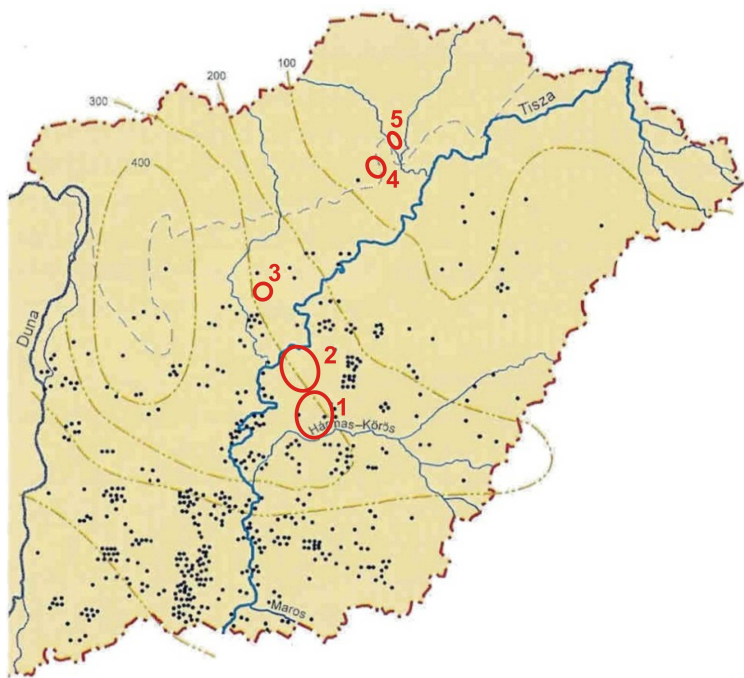
A KÁRPÁTOK ÉS A MAGYAR ALFÖLD LÉGCSERÉJÉNEK SZÉLENERGETIKAI VONATKOZÁSAI

Tar Károly*

1. Bevezetés

A szélenergia hasznosításának története azt mutatja, hogy elődeink sokáig nem is ismer-tek más olyan energiát, amit szolgálatukba állíthattak volna. A szélnek köszönhetjük, hogy a bátor felfedezők eljutottak a világ ismeretlen helyeire, és azt is, hogy az emberiség egy részé-nek egyik alapvető élelmiszere a liszt lett. Ezen kívül persze sok más megvalósult és meg nem valósult találmány épült erre a kiszámíthatatlan, de mindig jelenlévő energiára.

Hazánk nem tartozik a szélben gazdag országok közé, de a szélenergia kihasználásának szinte az egész országban vannak ma is látható, vagy a történeti forrásokból részletesen feltár-ható jelei: a szélmalmok. Magyarországon a török hódoltság után jelentek meg nagyobb szám-ban a szélmalmok, bár helyenként már a 15. században is előfordultak. Elterjedésük azonban csak a 17. században vált általánossá, a legtöbb szélmalmot viszont hazánkban 1866 és 1885 között építették. Számuk így alakult: 1863-ban 475, 1873-ban 854, 1885-ben 650, 1894-ben 712 és 1906-ban 691 (Bárány–Vörös–Wagner 1970). A 19. sz. végén, a 20. sz. elején az ország szélmalmainak több mint 95%-a az Alföldön helyezkedett el (Keveiné Bárány 1991), ami ön-magában is elegendő bizonyíték arra, hogy hazánkban ezen a táján is van hasznosítható szél-energia. A régi szélmalmok többsége a Dél-Alföldön található (1. ábra), ami arra utal, hogy a szélviszonyok leginkább itt feleltek meg a nem túl magasan elhelyezett, kb. 20 kW teljesítmé-nyű szélmalmok működési feltételeinek.



1. ábra: A szélmalmok elhelyezkedése a 20. század elején, valamint a jelenleg működő szélerőművek az Alföldön és környezetében 2010 szeptemberében (Keveiné Bárány 1991 és www.mszt.hu alapján).

A „szélerőműparkok” megnevezései:

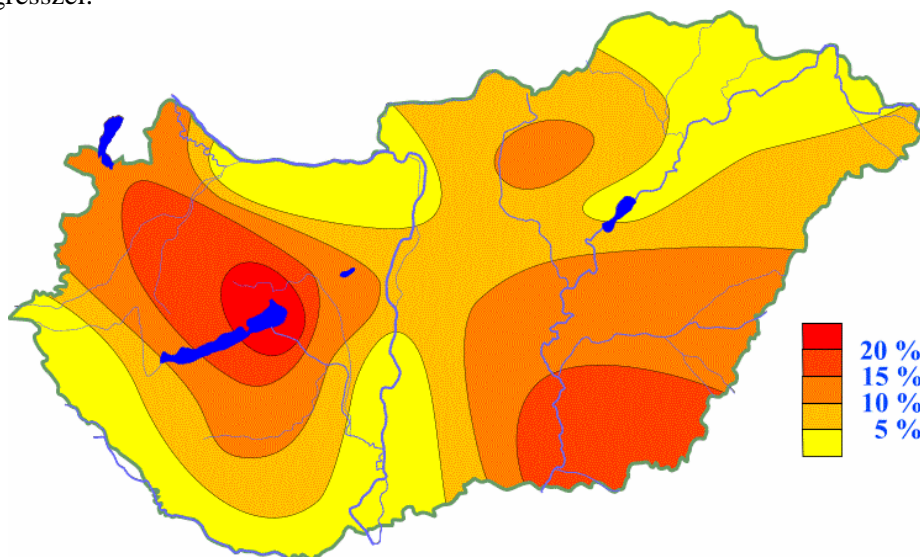
1. Mezőtúr (1x1500kw),
2. Törökszentmiklós (1x1500kw),
3. Erk (1x800kw),
4. Bükkaranyos (1x225kw),
5. Felsőzsolca (1x1800kw)

* Dr. Tar Károly, ny. tszvv. egyetemi docens, kandidátus, Nyíregyházi Főiskola, Turizmus és Föld-rajztudományi Intézet

Az egykori szélmalmok helyei tehát a vizsgálatok szerint (Keveiné Bárány 2000, 2001) pontosan kijelölik azokat a térségeket, ahol minden valószínűség szerint gazdaságos szélenergia kitermelés lehetséges.

Ma persze már más az igényünk: liszt helyett áram folyjon. A néhányszor 100 kW-os szélturbinák telepítésével 2000-ben nálunk is elkezdődött a szélenergia nagyüzemi hasznosítása. Jelenleg (2010. szeptember) hazánkban 37 helyen 155 darab szélerőmű üzemel 295 325 MW összteljesítménnyel (www.mszt.hu).

A Magyar Szélenergia Társaság honlapján lévő térkép szerint az alföldi szél villanyárammá alakítása még várat magára (ld. 1. ábra). E tanulmánnyal ehhez próbálunk segítséget adni. A 2. ábra szerint ugyanis a Dél-Alföld az 5 m/s-ot meghaladó szelek gyakoriságát tekintve összemérhető a szélenergia hasznosítás szempontjából kitüntetett észak-nyugati országrésszel.



2. ábra. A 10 m-en mért 5 m/s-nál nagyobb szélsébségek térbeli eloszlása (Radics et al 2010)

2. Előzmények

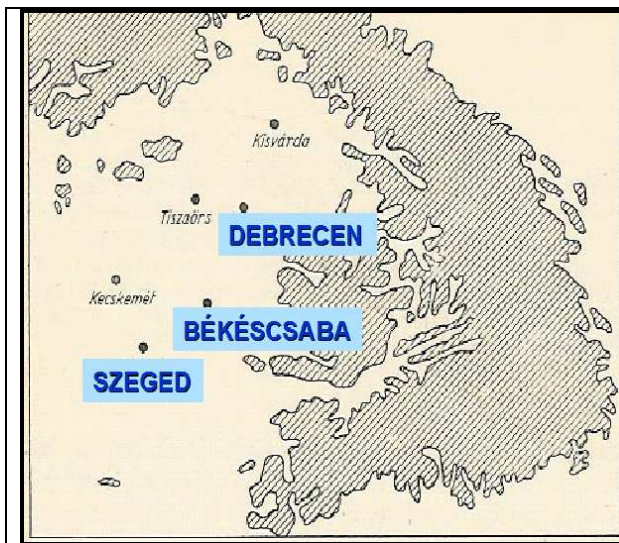
Magyarország legjelentősebb szelei makroklimatikus eredetűek. A helyi okokból létrejövő, a felszín vízszintes és függőleges tagoltsága, halmazállapotbeli különbsége által okozott légáramlások azonban a gradiens szélre rátevődve részt vesznek az eredő szélvektor kialakításában.

Az orográfianak hazánk szélklímájára gyakorolt hatását több kutató vizsgálta. A domborzatból eredő hőmérsékleti különbségek hatására kialakuló „hegy-völgyi szél” (inkább hegység-síkvidéki) gondolatát Hegyfoky (1904) vetette fel. Defant (1924) pedig teljes egészében ezzel magyarázta a Kárpát-medence cirkulációját. Berényi (1932) szerint azonban a széleloszlás nem termikus okokra, hanem a környező hegláncok orografikus módosító hatására vezethető vissza. Péczely (1963) szerint ezek a vizsgálatok nem szolgáltatottak kellő bizonyítékot a hegység-síkvidék cirkuláció elfogadásához vagy elutasításához. Az általa kidolgozott statisztikai próba alapján ő arra a következtetésre jutott, hogy az Alföld tiszántúli tájain megvan a hajlam az ilyen, termikus eredetű cirkuláció kialakulására.

Jelen munkánk Berényi (1932) és Péczely (1963) kutatásaihoz kapcsolódik. Részletes statisztikai analízis alapján megpróbáljuk eldönteni, hogy az Alföld észak-keleti, keleti részén a szélcsatorna-hatás, vagy a hegyek közelsége miatt kialakuló termikus hatás a domináns, és ez hogyan jelentkezik a szélenergia mennyiségében.

3. A vizsgálat módszere

A módszer lényege, hogy a hegyek felől és a síkság felől fújó szeleket különböztetjük meg, azaz a cirkulációnak csak az odaérkező ágával foglalkozunk. A 3. ábra Péczely (1963) állomáshálózatát mutatja, a vonalkázott terület tengerszint feletti magassága meghaladja a 400 métert. Mostani vizsgálataink adatbázisát Debrecen, Békéscsaba és Szeged *óránkénti, a klimatológiai vizsgálatoknál szokásos 16 szélirány és óránkénti szélsősebesség regisztrátumai* alkotják az 1991–2000 évekre. Lényegesen hosszabb időszak részletesebb felbontású adatait elemezzük tehát, mint az említett tanulmány, az egész évre vonatkoztatva. A fenti három állomásra a hegyek felől és a síkság felől fújó szelek irányainak a Péczely által meghatározottakat tekintjük, de foglalkozunk az ebből a szempontból közömbösnek mondható szélirányokkal is. A három széliránycsoportot az 1. táblázatban közöljük.



3. ábra.

Az állomáshálózat elhelyezkedése

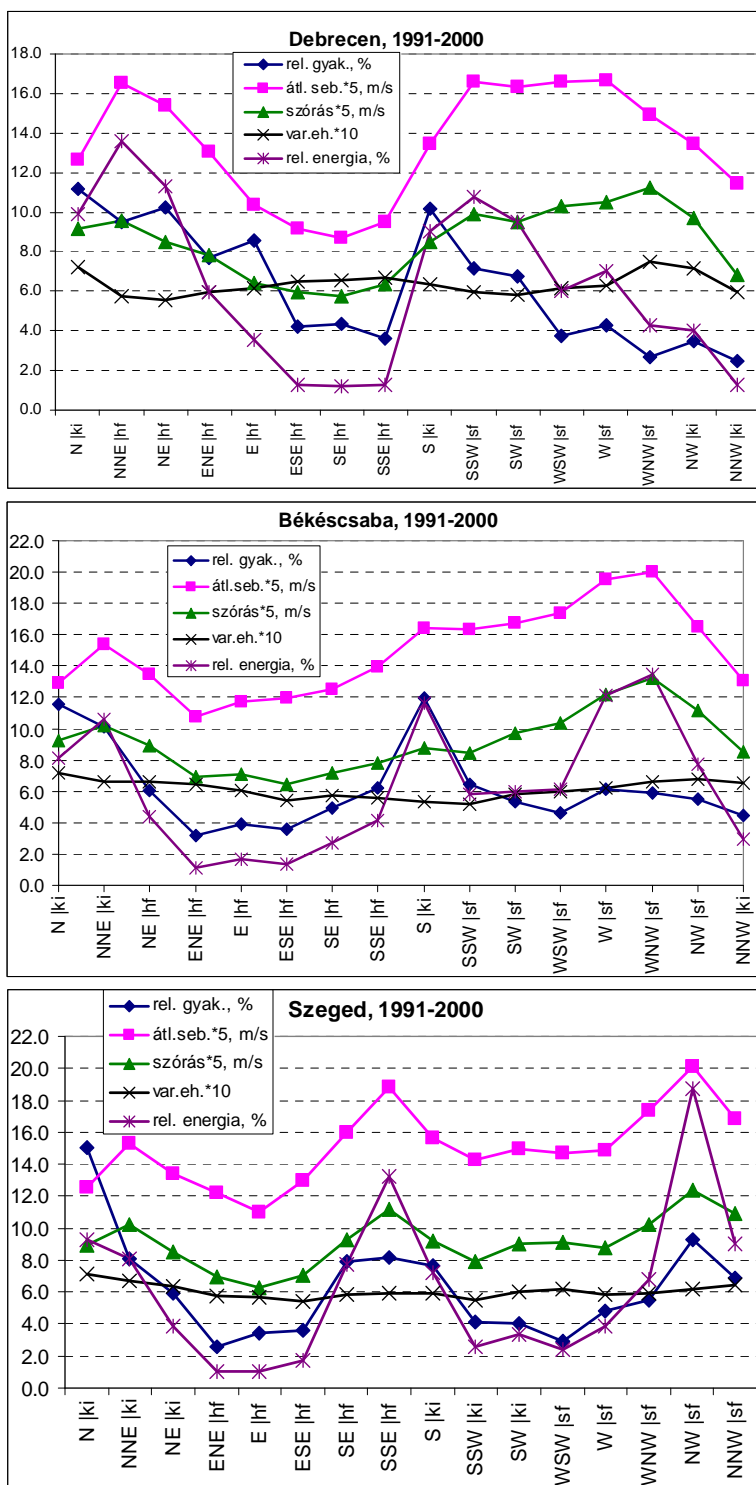
(A sátozott területek tengerszint feletti magassága nagyobb, mint 400 m.)

1. táblázat: A hegyek felől (hf) és a síkság felől (sf) fújó szelek irányai, valamint az ebből a szempontból közömbös (ki) szélirányok.

Megfigyelő állomás	hf	sf	ki
Debrecen	NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE	SSW, SW, WSW, W, WNW	S, NW, NNW, N
Békéscsaba	NE, ENE, E, ESE, SE, SSE	SSW, SW, WSW, W, WNW, NW	S, NNW, N, NNE
Szeged	ENE, E, ESE, SE, SSE	WSW, W, WNW, NW, NNW	S, SSW, SW, N, NNE, NE

4. A szélirányok statisztikai jellemzői

A 4. ábrán a 16 szélirány legfontosabb statisztikai jellemzőit ábrázoltuk: a relatív gyakoriságukat (%), az átlagos sebességüket (m/s), a sebességük szórását (m/s), a variációs együtthatókat (relatív szórás: szórás/átlag), valamint relatív energiatartalmukat, azaz az összes szélenergiaának az adott szélirányra eső hányadát (%). A könnyebb együtt ábrázolhatóság miatt az átlagok és a szórások 5-szöröseit, a variációs együtthatók 10-szereseit használtuk. A vízszintes tengelyen pedig jeleztük, hogy az adott szélirány hegyfelőli (hf), síkság felőli (sf), vagy közömbös (ki).



4. ábra. A szélirányok relatív gyakorisága (%), átlagsebessége (m/s), a sebességük szórása (m/s), variációs együtthatója és relatív energiatartalma (%) az 1991–2000 időszakban.

hf: a hegyek felőli, sf: a síkság felőli, ki: a közömbös szélirányok.

Mindhárom állomáson a legnagyobb gyakoriság egy-egy közömbös iránynál figyelhető meg, de az ilyen irányokhoz minimális, vagy ehhez közeli gyakoriságok is tartoznak. Az átlag és a szórás menete közel párhuzamos mindhárom esetben, azaz a nagy átlagsebességű szelek sebességének változékonysága is nagy. Ezt a variációs együttható igen kis ingadozása is alátámasztja: ez Debrecenben 0,55 és 0,75, Békéscsabán 0,52 és 0,72, Szegeden pedig 0,54 és 0,71 közé esik. A relatív energiatartalom nagyjából a relatív gyakorisággal együtt változik.

A szélirányok gyakorisága és a többi paramétere közötti kapcsolatot lineáris korrelációval és regresszióval vizsgáltuk. A 2. táblázatban megadjuk a lineáris korrelációs együttható és a regressziós együttható értékeit. A korrelációs együttható 0,05 szignifikancia szinthez tartozó kritikus értéke esetünkben ($n=16$) $r_{0,05}=0,4973$, vagyis a kapcsolat Szegeden a szórások, valamint mindhárom állomáson a relatív energiatartalom esetében tekinthető statisztikai értelemben meghatározottnak. Utóbbi azt is jelenti, hogy a szélirányok energiatartalmát nem a sebesség, hanem az előfordulás gyakorisága határozza meg elsősorban.

2. táblázat: A szélirányok gyakorisága és a többi statisztikai jellemzője közötti lineáris korrelációs együttható (r) és a regressziós együttható (b) értékei (dőlt: szignifikáns esetek).

Megfigyelő állomás	átlagsebesség		szórás		energia	
	r	b	r	b	r	b
Debrecen	0,2045	0,039	0,0470	0,006	<i>0,7428</i>	<i>1,011</i>
Békéscsaba	0,2328	0,049	0,2499	0,036	<i>0,6502</i>	<i>0,978</i>
Szeged	0,2947	0,045	<i>0,5209</i>	<i>0,054</i>	<i>0,7106</i>	<i>1,089</i>

Az $y=a+bx$ egyenletben a b regressziós együttható a függő változónak a független változó értékének egységnyi megváltozására való érzékenységet is mutatja. A szignifikáns esetekben ez a következőképpen alakul: a relatív gyakoriság 1%-nyi megváltozása Szegeden okozza az energiatartalom legnagyobb (1,089 %), Békéscsabán pedig a legkisebb (0,978 %) megváltozását. Az 1 körüli értékek mindhárom állomáson arra utalnak, hogy a szélirányok gyakorisága és relatív energiatartalma lényegében együtt változik. Szegeden pedig a szórás esetében ez a változás 0,054 (m/s)/%.

5. A széliránycsoportok statisztikai jellemzői

A 3. táblázatban a három széliránycsoport relatív gyakoriságát, átlagos szélesebségét, összes és átlagos (a széliránycsoport egy tagjára eső) energiatartalmát adjuk meg. Debrecenben a hegyek felől fújó, a másik két állomáson pedig a közömbös szélirányok gyakorisága a legnagyobb, Debrecenben a síkság felől fújó, a másik két állomáson pedig a hegyek felől fújó szélirányok gyakorisága a legkisebb. Legnagyobb átlagsebessége azonban mindhárom állomáson a síkság felől fújó szeleknek van, a legkisebb pedig a hegyek felőlieknek. A relatív gyakoriság és az összes energiatartalom közötti linearitás most csak Debrecenben mutatkozik meg, itt a leggyakrabban előforduló szelek, a hegyek felőliek rendelkeznek a legtöbb energiával – a másik két állomáson pedig a síkság felőliek. A csoportok átlagos, azaz egy szélirányra eső energiája azonban mindhárom állomáson a síkság felőliek esetében a legnagyobb, a hegyek felőliek esetében a legkisebb.

A táblázat szerint az átlagsebesség és az energiatartalmak Békéscsabán a síkság felőli szelek esetében a legnagyobbak: 3,6 m/s, 51,2, ill. 8,5%. A legkisebb átlagsebességű csoport a hegyek felőli szelek csoportja Debrecenben (2,4 m/s), a legkisebb összes és átlagos energiájú csoport pedig szintén a hegyek felőli szelek csoportja Békéscsabán.

3. táblázat. A széliránycsoportok statisztikai jellemzői.

Megfigyelő állomás	Széliránycsoport	Relatív gyakoriság	Átlagsebesség (m/s)	Összenergia %	Átl. energia %
Debrecen	hegyek felől (hf)	0,4818	2,4	38,2	5,5
	síkság felől (sf)	0,2457	3,2	37,6	7,5
	közömbös (ki)	0,2725	2,5	24,2	6,0
Békéscsaba	hegyek felől (hf)	0,2795	2,5	15,4	2,6
	síkság felől (sf)	0,3397	3,6	51,2	8,5
	közömbös (ki)	0,3808	2,9	33,4	8,3
Szeged	hegyek felől (hf)	0,2571	2,8	24,8	5,0
	síkság felől (sf)	0,2934	3,4	40,8	8,2
	közömbös (ki)	0,4495	2,9	34,4	5,7

Az 5. ábrán az egyes széliránycsoportok és az összes irány sebességeloszlását adjuk meg. Az ábrák szerint a legnagyobb különbség hegyek felőli és a síkság felőli szelek eloszlásában van, míg az összes irány és a közömbös irányok sebességeloszlása alig különbözik egymástól. A χ^2 -próbával elvégzett homogenitás vizsgálat (Dévényi–Gulyás 1998) eredménye is ezt igazolja: mindhárom helyen szignifikáns különbség van a különböző széliránycsoportok sebességeloszlása között a semleges csoport (ki) és az összes szélirány (sf+hf+ki) kivételével.

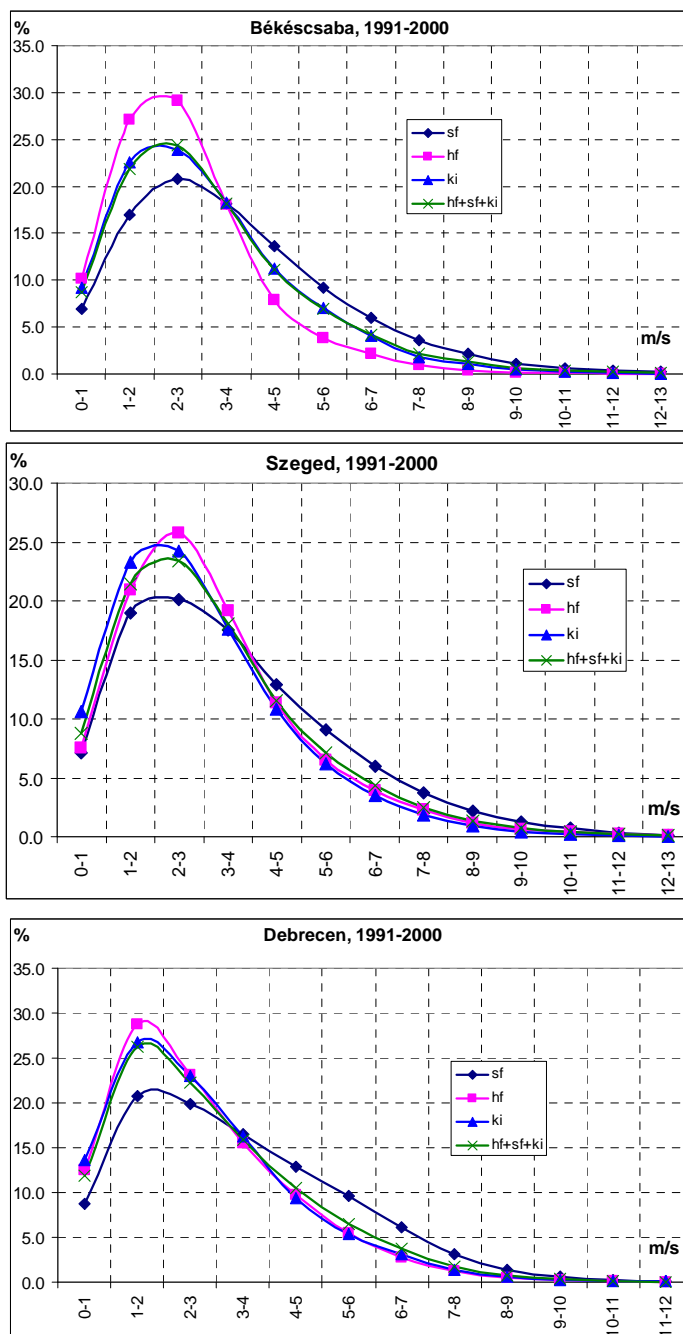
6. A széliránycsoportok relatív gyakoriságának napi menete

Az 6. ábrán együtt ábráztuk az egyes széliránycsoportok relatív gyakoriságának napi menetét az óránkénti átlagos szélesebesség és relatív szélenergia napi menetével, Utóbbi a napi összes szélenergiának az adott órára eső hányada.

Debrecenben és Békéscsabán a hegyek felől és a síkság felől fújó szelek relatív gyakoriságának a felszínnek felmelegedésének megfelelő markáns, ellentétes napi menete van. Vagyis: éjjel a lejtőkön erősen lehűlő levegő a síkság felé „lefolyik”, nappal a lejtőkön erősen felmelegedő és függőlegesen feláramló levegő a síkság felől pótlódik. A közömbös irányok előfordulásában egyik állomáson sem látszik határozott napi menet, ami azt is jelentheti, hogy a szélirányok csoportosítása majdnem tökéletes. Ennek ellentmond azonban az enyhe emelkedő trend, Szegeden pedig a síkság felőli irányok gyakoriságánál hiányzik a határozott napi menet, a közömbös irányoké pedig valószínűleg nem véletlenszerű. Figyelemre méltó még az is, hogy a hegyek felőli és a síkság felőli szelek éjszakai gyakoriságai Debrecenben lényegesen eltérnek egymástól, míg a másik két állomáson nem.

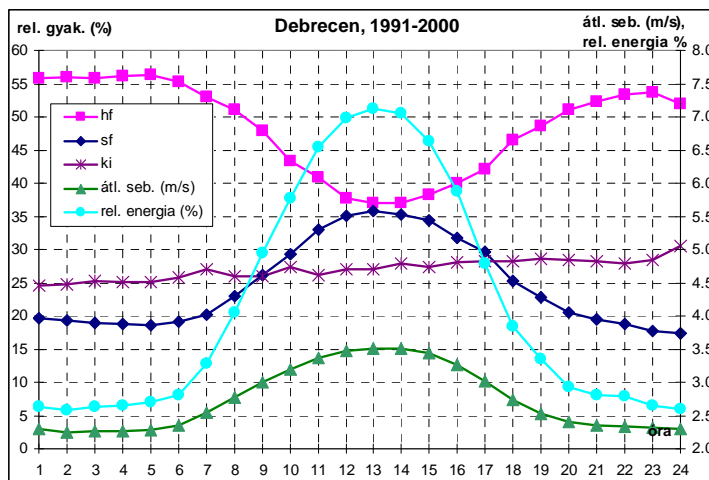
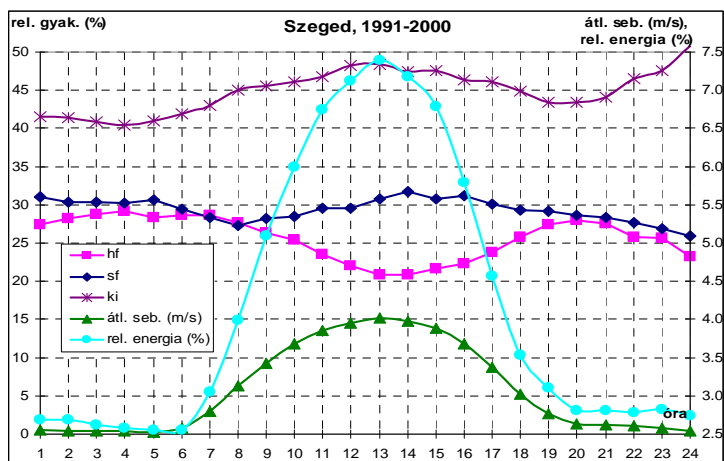
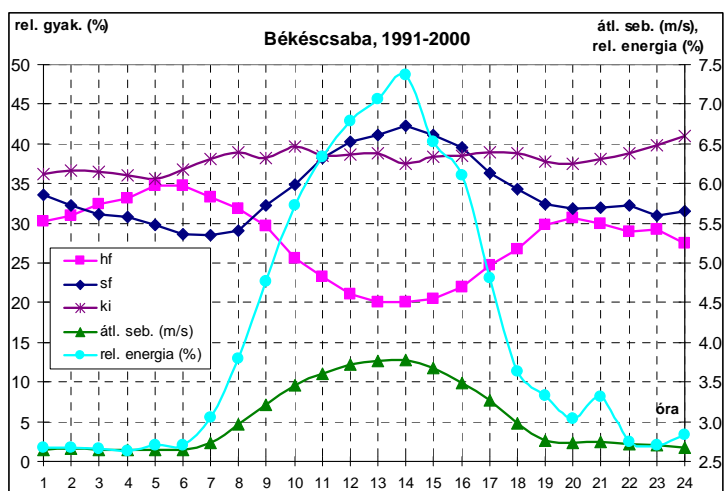
Az ábrából sejthető, hogy az óránkénti értékek között szoros sztochasztikus kapcsolat Debrecenben és Békéscsabán a hegyek felőli és a síkság felőli szélirányok relatív gyakorisága, valamint az átlagsebesség és az energiatartalom között van. Szegeden viszont a síkság felől fújó szeleket valószínűleg a közömbösek váltják fel ebben a vonatkozásban. A részletes elemzésre most is a lineáris korrelációt és regressziót használtuk. A 4. táblázatban megadjuk a lineáris korrelációs együttható és a regressziós együttható értékeit az egyes széliránycsoportok esetében. A korrelációs együttható 0,05 szignifikancia szinthez tartozó kritikus értéke most (n=24) $r_{0,05}=0,3893$. A szignifikáns korrelációs együtthatók szerint Debrecenben és Békéscsabán az óránként átlagsebességeket és relatív energiatartalmakat a hegyek felől és a síkság felől fújó szelek alakítják. A hf szelek gyakoriságának egységnyi (1%) megváltozása Debrecenben az óránként átlagsebességekben 0,07 m/s, a óránkénti

relatív energiatartalomban pedig 0,24% *ellentétes előjelű* változást okoz. Békéscsabán ezek az értékek 0,08 m/s, ill. 0,32%. Az sf szelek gyakoriságának egységnyi megváltozása pedig Debrecenben az óránként átlagsebességekben szintén 0,07 m/s, a óránkénti relatív energiatartalomban pedig 0,26% *ugyanolyan előjelű* változást okoz, Békéscsabán ezek az értékek 0,09 m/s, ill. 0,36%.



5. ábra: Az egyes széliránycsoportok sebességeloszlása

(hf: a hegyek felőli, sf: a síkság felőli, ki: a közömbös szélirányok, hf+sf+ki: az összes szélirány).



6. ábra. Az egyes széliránycsoportok (hf: a hegyek felőli, sf: a síkság felőli, ki: a közömbös szélirányok) relatív gyakoriságának, illetve az irányoktól független átlagos szélesség (m/s) és relatív energiatartalom (%) napi menete.

Szegeden a szignifikáns korrelációs együtthatók a hegyek felőli és a közömbös szélirányokhoz tartoznak. Itt hf szelek gyakoriságának egységnyi megváltozása az óránkénti átlagsebességekben 0,17 m/s, az óránkénti relatív energiatartalomban pedig 0,56 % *ellentétes előjelű* változást okoz. A ki szelek gyakoriságának egységnyi megváltozása pedig az óránkénti átlagsebességekben 0,13 m/s, az óránkénti relatív energiatartalomban pedig 0,41 % *ugyanolyan előjelű* változást okoz.

Annak eldöntéséhez, hogy a relatív gyakoriságok változása az átlagsebességeket vagy az energiatartalmat befolyásolja jobban egy olyan mutatót, paramétert kell konstruálni, amely független a mintaelemek (x) nagyságrendjétől és mértékegységétől. Erre legalkalmasabbnak tűnik a normált értékből ($[x\text{-átlag}]/\text{szórás}$) meghatározott regressziós együttható. Belátható azonban, hogy az így transzformált adatok esetében a regressziós együttható és a korrelációs együttható értéke megegyezik. Így viszont a 4. táblázatból megadható a válasz a kérdésre: a széliránycsoportok relatív gyakoriságának változása az irányoktól független átlagsebességet és energiatartalmat ugyanolyan mértékben befolyásolja az egyes állomásokon. A hatás Debrecenben és Békéscsabán egyformán erősebb, mint Szegeden.

4. táblázat. Lineáris korreláció (r) és regresszió (b) a széliránycsoportok óránkénti relatív gyakorisága, valamint az óránkénti átlagos szélsébség és relatív energiatartalom között (dőlő: szignifikáns esetek).

Megfigyelő állomás	Széliránycsoport	r		b	
		átl. seb.	energia	átl. seb.	energia
Debrecen	hegyek felől (hf)	-0,970	-0,962	-0,07	-0,24
	síkság felől (sf)	0,987	0,988	0,07	0,26
	közömbös (ki)	0,164	0,125	0,05	0,14
Békéscsaba	hegyek felől (hf)	-0,911	-0,907	-0,08	-0,32
	síkság felől (sf)	0,907	0,911	0,09	0,36
	közömbös (ki)	0,341	0,313	0,11	0,41
Szeged	hegyek felől (hf)	-0,828	-0,847	-0,17	-0,56
	síkság felől (sf)	0,362	0,371	0,14	0,45
	közömbös (ki)	0,618	0,631	0,13	0,41

6. Következtetések

Általánosságban azt lehet mondani, hogy az Alföld észak-keleti, keleti részén a síkság felől fújó szelek – elsősorban definíciójukból következően - ritkábbak, de fajlagosan nagyobb átlagsebességűek és energiájúak, aminek oka egyértelműen a szélcsonna hatás, Ugyanakkor a két iránycsoport gyakoriságának, valószínűségének napi ritmusát feltételezhetően termikus eredetű folyamatok szabályozzák. A dél-keleti részen, Szegeden az utóbbi esetben is a csatorna-hatás látszik dominánsnak.

Irodalom

- 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, Tom. IX. fasc. 1–4. pp. 73–81.
- Berényi D. 1932: Hegy-völgyi szelek a Tiszántúlon, Időjárás, 36. pp. 81–89,
- Defant, A. 1924: Die Windverhältnisse im Gebiete der Ehemaligen Öster.–Ungar. Monarchie, Wien
- Dévényi D.–Gulyás O. 1998: Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. Tankönyvkiadó, Budapest

- Hegyfoky K. 1904: A hegyi és völgyi szél, *Atmosfera*, 8. pp. 81–93.
- Keveiné Bárány I. 1991: A szélerő hasznosítás éghajlati adottságai az Alföldön. *Földrajzi Értesítő*, XL., 3–4. pp. 55–69.
- Keveiné Bárány I. 2000: Adatok a szélerő-hasznosítás alföldi lehetőségeihez. Megújuló energiaforrások-bioüzemanyagok. Energiahatékonysági konferencia. Kecskemét, pp. 44–50.
- Keveiné Bárány I. 2001: A szélenergia potenciál és a farmergazdaságok vízszükséglete közötti kapcsolat a Dél-Alföldön. A szélenergia hasznosítása a vízgazdálkodásban. A Magyar Szélenergia Társaság Kiadványai, No. 1. pp. 45–52.
- Péczely Gy. 1963: A Magyar Alföld és a környező hegyvidék légcseréje, *Időjárás*, 67. pp. 233–238.
- Radics, K.–Bartholy, J.–Péliné, Cs. N. 2010: Regional tendencies of extreme wind characteristics in Hungary. *Adv. Sci. Res.*, 4. pp. 43–46.
- Tar K. 2004: Az orográfia szélklímára gyakorolt hatásának statisztikai szerkezete. In: Szerencs, Tokaj-Hegyalja kapuja c. tudományos konferencia előadásai, pp. 155–162, www.mszt.hu: a Magyar Szélenergia Társaság honlapja.