

A SZÉLENERGIA KUTATÁSA A DEBRECENI EGYETEM METEOROLÓGIAI TANSZÉKÉN (1980-2014)

RESEARCH OF THE WIND ENERGY IN DEPARTMENT OF METEOROLOGY OF UNIVERSITY OF DEBRECEN (1980-2014)

Tar Károly^{1,2}, Bíróné Kircsi Andrea³, Tóth Tamás²

¹Nyíregyházi Főiskola Turizmus és Földrajztudományi Intézet, *tarko47@gmail.com*

²Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszék, *tamas.toth1@gmail.com*

³Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest Kitaibel utca 1., *kircsi.a@met.hu*

Összefoglalás. A tanszék széklímával, szélenergiával kapcsolatos kutatásainak elsődleges célja olyan statisztikai módszerek és modellek kidolgozása, amelyek növelik a szélenergia felhasználásának hatékonyságát. A legtöbb tanulmányunk a hazai szélenergia hasznosítás klimatológiai aspektusait érinti, elemezve általában a szél irányának, sebességének és energiájának statisztikai tulajdonságait és a köztük lévő kapcsolatot. Vizsgáltuk a hasznosítás fontos társadalmi tényezőit is. A tanulmányban a csaknem 35 éves kutatás legfontosabb eredményeit foglaltuk össze.

Abstract. The aim of our research is to work out those statistical methods and models which enables the increase of efficiency of wind energy utilization. Most of our studies respect the climatological aspect of utilization, analyzing the statistical characteristics of direction, speed and energy of the wind and their relations in Hungary. The important social factors of utilization were also investigated. The most important results of almost 35-year research are summarized in the following paper.

Bevezetés. Magyarországon a megújuló energiák elméleti potenciálját összehasonlítva a szélenergia jelentős pozíciót foglal el: a szélenergia potenciál 75 m magasságban, 75 m rotor átmérővel 56,85 TWh (204,7 PJ/év) energia termelését tenné lehetővé, az évi szélteljesítmény így 6489 MW (Hunyár et al., 2006). Más becslések szerint hazánk teljes kihasználható szélpotenciálja 532,8 PJ/év (MTA Energetikai Bizottság, Megújuló Energia Albizottság, 2006). Jelenleg Magyarországon 329,325 MW a telepített szélenergia kapacitás, összesen 173 szélenergiaerőmű működik 39 helyszínen (*www.mszt.hu*). Ezeknek közel 90%-a az ország ÉNy-i területén található. A szélenergiából termelt villamos energia folyamatosan növekedett az épülő erőmű kapacitásoknak köszönhetően. 2011-2014 között nem épültek új szélenergiaerőművek, így az ezekben az években termelt villamos energia mennyisége a szélpotenciál évről évre történő változását tükrözi. 2012 igen jó széljárású év volt, megközelítette a 750 GWh-t a szélből termelt elektromos áram mennyisége. 2013-ban 173 hazai szélenergiaerőmű 693 GWh áramot adott hálózatra, mely a hazai villamos energiarendszer bruttó termelésének közel 3%-át jelenti. A magyarországi szélenergia felhasználásának jelenlegi helyzetéről és jövőbeli lehetőségeiről részletesebben olvashatunk ebben a számban Tóth Péter és Bíróné Kircsi Andrea cikkében, valamint Tar (2012), Tar és Tömöri (2013) tanulmányaiban.

A tanszék kutatási témái, eredményei. A 2016-ban 65 éves Debreceni Meteorológiai Tanszék széklímával, szélenergiával kapcsolatos kutatásainak az elsődleges célja olyan statisztikai módszerek, modellek kidolgozása, amelyek növelik a szélenergia felhasználásának hatékonyságát. Az első tanszéki széklimatológiai cikk 1980-ban jelent meg (Tar, 1980), egy nagyobb lélegzetű össze-

foglaló munka pedig 1991-ben (Tar, 1991a). Azóta megtörtént a 35 évet átfogó kutatásnak a hazai szélenergia hasznosítás klimatológiai aspektusaira vonatkozó rövid (Szegei és Bíróné Kircsi, 2012) és részletes (Tar, 2013b, 2014b) összefoglalása. Ebben a cikkben ezt bővítjük ki a nagytérségű vizsgálatok és a térbeli modellek bevonásával, valamint a szélenergia hasznosítás társadalmi vonatkozásainak vizsgálatával kapott általunk legfontosabbnak tartott eredmények, és a hozzájuk vezető módszerek összefoglalásával.

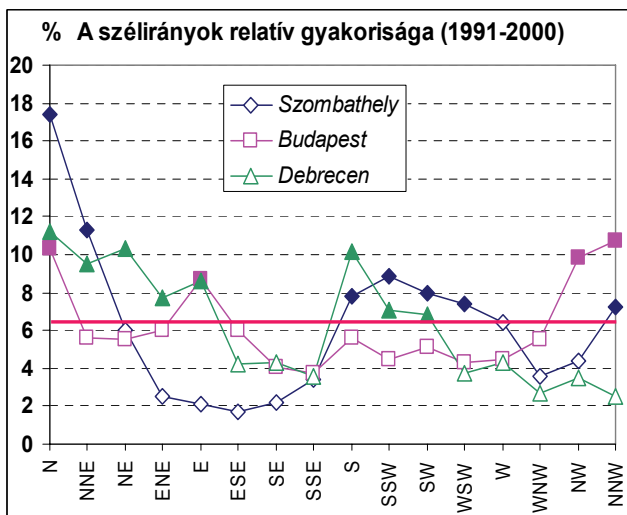
Magyarország széklímája: a hazai szélenergia hasznosítás klimatológiai aspektusai. A legtöbb tanulmányunk a szél mindhárom jellemzőjének – irányának, sebességének és energiájának – statisztikai tulajdonságait és a köztük lévő kapcsolatot taglalja. A vizsgálatokhoz szükséges adatbázist részben az OMSZ bocsátotta rendelkezésünkre, részben egy mindenki számára hozzáférhető honlapról töltöttük le, és vannak saját szélméréseink is. A különböző meteorológiai állomások adatait orográfiai (sík vidék, nem sík vidék) és időjárási helyzetek szerinti (makro-szinoptikus helyzetek vagy helyzetcsoportok, front típusok) részszármazonként is vizsgáltuk. Megkíséreltük a hazai szélmérőnek az éghajlatváltozással kapcsolatos módosulásának statisztikai detektálását is.

A szélirányok energetikai paraméterei. Esősorban a szélirányok gyakoriságának és váltakozásának energetikai vonatkozásait vizsgáltuk. Bevezettük a jellemző szélirányok fogalmát (Tar, 1991ab, Tar és Verdes, 2003). Azokat a szélirányokat tekintjük az adott helyen valamilyen időszakban (pl. hónap, évszak, év) vagy időjárási helyzetben (pl. a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek) jellemzőnek, amelyek gyakorisága a valószínűségek egyenlőségére vonatkozó statisztikai próba szerint szig-

nifikánsan különbözik a többitől. Az 1. ábrán a jellemző szélirányokhoz a kitöltött jelölők tartoznak, a kritikus relatív gyakoriság kb. 6,5%. Megállapítottuk, hogy a jellemző irányok egyben a legtöbb energiát szállító szélirányok is. A legnagyobb energiátartalmút energetikailag uralkodó széliránynak neveztük el. A szélirányok által szállított energia függ az évszaktól, az időjárás helyzetétől és az orografikus környezettől. Ezt igazolják a jellemző szélirányokra vonatkozó vizsgálataink is. Ezek energiátartalma nyáron kisebb a síkvidéki állomásokon, nagyobb a nem síkvidéki állomásokon, mint télen. Egy jellemző szélirány évi és téli átlagban kb. négyszer annyi energiát szállít, mint egy nem jellemző szélirány, nyáron pedig kb. ötször annyit. A szélirány megváltozását, mint valószínűségi változót vizsgáltuk az óránkénti széladatok alapján. A vizsgálat módszere az, hogy az óránkénti szélsébségekből elemi eseményeket konstruálunk. Egy adott időszak vagy makroszinoptikus részhalmoz egy napjának t. órájában megfigyelt szélirányt összehasonlítjuk az előző, (t-1). órai széliránnyal. Ha ezek egyformák

instabilitási index növekszik, akkor a napi átlagos potenciális szélerergia mennyisége – vagyis az óránkénti szélsébség köbök átlaga – csökken (Tar, 2004b, 2013a).

Öt meteorológiai állomás (Békéscsaba, Budapest, Debrecen, Szeged és Szombathely) 5 évi (1991–95) óránkénti szélirány- és szélsébség-regisztrátumai alapján elvégezve az elemzéseket megállapítottuk, hogy évszakos és éves felbontásban mindig szignifikánsak a lineáris korrelációk. Makroszinoptikus csoportosításban az anticiklon centrum helyzetben négy állomáson a két változó korrelálatlannak mutatkozott. A korrelációs és a regressziós együtthatók előjele mindenhol negatív, azaz nagyobb (több) napi irányváltozáshoz kevesebb napi potenciális szélerergia tartozik, ahogyan azt feltételeztük (1. táblázat). A regressziós együttható azt is mutatja, hogy a napi potenciális szélteljesítmény mennyire érzékeny a szélirány megváltozására. Azért, hogy ez az érzékenység összehasonlítható legyen, azaz az energia mennyiségétől ne függjön, a regressziós együttható értékeit az adott részhalmoz (évszak, év, helyzet, helyzetcsoport) egy órá-



1. ábra: A kitöltött jelölők a jellemző szélirányokat mutatják.

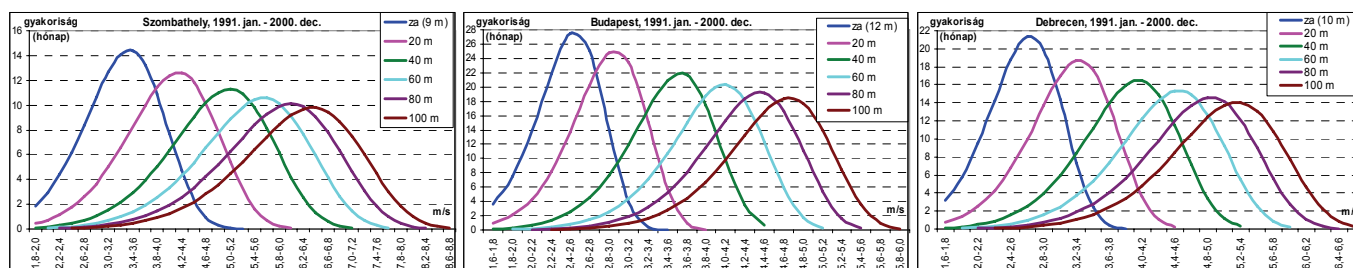
(azaz a fokokban kifejezett különbségük kisebb, mint $360/16=22,5$), akkor a t. órát az irányváltozás szempontjából *stabil időpontnak* nevezzük. Ellenkező esetben a t. óra *instabil időpont*. Egységnyi időszaknak egy napot tekintünk, így a szélirányváltozás szempontjából alapparaméter az *instabil időpontok napi száma*, ami a fentiek szerint 0 és 24 közé esik. Ezekből meghatározható az adott időszakban az *instabil időpontok átlagos napi száma* és az ún. *instabilitási index*. Ez utóbbi nem más, mint az időszak instabil időpontjainak és összes időpontjainak hányadosa. Az instabilitási indexek azt mutatják, hogy hazánkban általában nagyobb a szélirányok megmaradásra való hajlama, mint a változó hajlam (Tar, 1991ab, Tar és Szegedi, 2003, Tar et al., 2003, Tar et al., 2005). Energetikai paramétereinket pedig az alábbiak szerint származtatjuk. Mivel a potenciális fajlagos szélteljesítmény a szélsébség köbével arányos, a napi szélerergia jellemzésére az *óránkénti szélsébség köbök átlagát* használtuk. Ez tehát a nap egy órájára átlagosan eső fajlagos szélteljesítménnyel arányos mennyiség. Az volt a sejtésünk, hogy ha a napi szélirányváltozások száma, azaz az

1. táblázat: Az év egy órájára átlagosan jutó fajlagos szélteljesítménnyel arányos mennyiség ($\langle v^3 \rangle$), az instabilitási index (I_i), az átlagos napi szélirányváltozás ($\langle I_n \rangle$) értékei, valamint a napi fajlagos szélteljesítmény és az instabilitási index közötti lineáris korreláció és regresszió paraméterei (r_{iv} : korrelációs együttható, b_{iv} : regressziós együttható, s_{iv} : érzékenységi paraméter).

meteorológiai állomás	$\langle v^3 \rangle$	I_i	$\langle I_n \rangle$	lin. regr., korr.		
				r_{iv}	b_{iv}	s_{iv}
év						
Debrecen	53,7	0,44	10,5	-0,920	-6,1	11,3
Békéscsaba	57,1	0,46	11,0	-0,853	-8,6	15,0
Szeged	74,0	0,42	10,0	-0,796	-9,6	12,9
Budapest	37,8	0,45	10,8	-0,913	-3,5	9,3
Szombathely	141,1	0,47	11,2	-0,651	-43,5	30,8

jára átlagosan jutó energia mennyiségének arányában (%-ban) fejeztük ki, amit érzékenységi paraméternek neveztünk el. Az érzékenységi paraméter makroszinoptikus csoportosításban jóval tágabb határok között változik, mint az évszakos, éves felbontásban. A legérzékenyebb évszak az ősz, aztán a másik átmeneti évszak, a tavasz, majd a nyár és a tél következik. Az éves érzékenység a két középsőhöz, a tavaszihoz és a nyárihoz áll közel. Az állomások érzékenységi sorrendje pedig a következő: Szombathely, Békéscsaba, Debrecen, Budapest, Szeged.

A szélsébség energetikai célú vizsgálata. Részletesen vizsgáltuk a különböző (óránkénti, napi, havi, éves) szélsébség idősorok statisztikai paramétereinek évszaktól, időjárás és orográfiai helyzettől, valamint a felszín feletti magasságtól való függését. Ha az adatbázis mérete lehetővé tette, akkor a feltételezhető éghajlatváltozásnak a magyarországi szélmezőre gyakorolt hatását is megpróbáltuk kimutatni (Tar, 1998ab, Tar et al., 2001ab, 2002). Energetikai szempontból a szélsébség magassággal való változását leíró paraméterek kitüntetett jelentőséggel



2. ábra: A havi átlagos szélességek Weibull-eloszlással előállított eloszlása az 1991-2000. időszakban az egyes állomásokon az anemométer magasságában (z_a) és további 5 szintben három állomáson.

bírnak. 13 hazai meteorológiai állomás adatainak (1968–72) vizsgálata azt mutatta, hogy az anemométerek magasságából 10, 20 és 30 m-re a

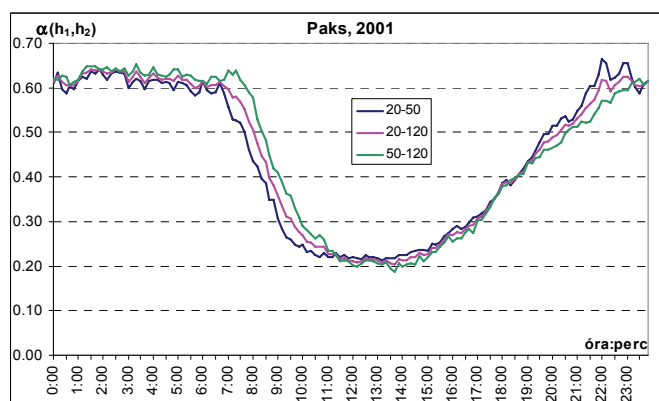
$$v_h = v_{10}[0,233 + 0,656 \cdot \lg(h + 4,75)] \quad (1)$$

ún. WMO-s összefüggéssel (amelyben a h az anemométer magasságát, a v_h az ottani, a v_{10} pedig a 10 m-es napi átlagos szélességet jelenti) transzformált napi átlagos szélességek eloszlása leggyakrabban a négyzetgyökös normál, a lognormál és a Weibull-eloszlással közelíthető. Arányuknak évszakos és időjárási helyzetektől függő változása van. A Weibull-eloszlás tehát – amire a legtöbb szélenergetikai modell épül – nem kizárólagos, sőt nem is olyan gyakori, mint ahogyan ez várható volt. Esetünkben viszonylag homogén áramlás, tehát nagyobb magasságokban és bizonyos makroszinoptikus helyzetekben válik gyakoribbá (Tar, 1991a). Elemeztük a havi átlagos szélesség idősorát is az 1991-2000 időszakban hét magyarországi meteorológiai megfigyelő állomáson (Tar, 2008b). Itt is különböző elméleti eloszlásokkal közelítettük a mért havi átlagos szélességek empirikus eloszlását, kimutattuk néhány eloszlás orográfától független voltát. A paraméterek becslése után a χ^2 -próbával elvégeztük az illeszkedésvizsgálatokat 0,05 szignifikancia szinten. Ennek eredménye, hogy a paraméterek meghatározásának nehézsége miatt célszerű a négyzetgyökös normál eloszlást választani a havi mért átlagos szélességek gyakorisági eloszlásának leírására az anemométer magasságában. Ha viszont ebből kiindulva ettől eltérő magasságokban akarjuk megadni az eloszlásokat, akkor a Weibull-eloszlás tulajdonságait kell kihasználni. Ezek ugyanis lehetővé te-

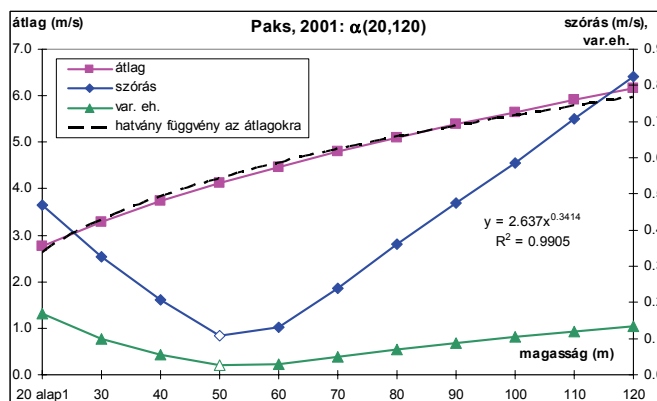
szik, hogy az eloszlás paramétereit (c : skála-faktor, k : alaktényező) a mérési szintre vonatkozó értékekből más magasságokra is kiszámoljuk. A Weibull-eloszlás Debrecen esetében 0,10, a többi állomáson 0,05 szignifikancia szinten bizonyult jó közelítésnek, így ezzel az eloszlással előállítottuk a havi átlagos szélességek eloszlását és alapstatisztikai paramétereit az anemométer magasságától különböző szintekben is. A 2. ábra illusztrálja az eredményeket három, közelítőleg ugyanazon a földrajzi szélességen lévő állomáson. Ha nem állnak rendelkezésünkre a Weibull-eloszlás paramétere, akkor a mérési magasságtól különböző szinteken a szélesség értékét a

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (2)$$

ún. Hellman-összefüggéssel becsüljük, ami az elméleti logaritmusos szélprofil törvény egyszerűsített, gyakorlatban alkalmazott változata. Az α kitevő értéke elsősorban a felszín érdességének függvénye. Egyszerűségének köszönhetően a (2) összefüggést használjuk az energetikai célú szélmerések során is a talaj közelében mért szélességnek a szélturbina tengely magasságára történő konvertálásakor. A kitevő értéke azonban – mint ahogyan az a magyarországi szélenergia potenciált felmérő kutatások alapján is bebizonyosodott – számos légköri tényező befolyásolásának eredője. Ezek egyike a levegő egyensúlyi helyzete. Emiatt a becslés hibája növekszik talaj közeli inverzió, vagy erősen stabil állapotok fennállása esetén, különösen éjszaka. Energetikai szempontból is fontos, hogy a szélesség, így a szélenergia is a légkör különböző rétegeiben különböző napi menet szerint



3. ábra: A 10 percnként számolt Hellman-kitevők évi átlagának napi menete Pakson.



4. ábra: Az évi átlagos szélesség, a szórás és a variációs együttható különböző magasságokban 20 m-ből számolva az $\alpha(20,120)$ átlagos kitevővel.

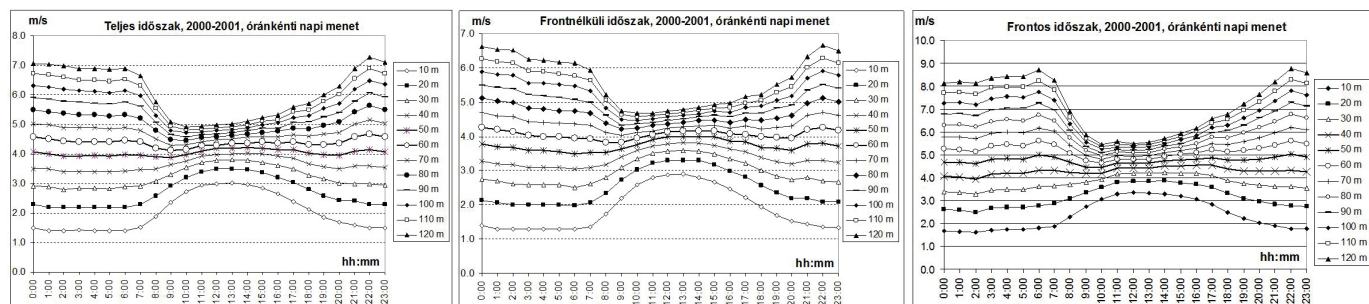
változik. A Hellmann-kitevő napi menetének vizsgálata tehát a szélesebb napi menetnek a mérési szinttől különböző magasságokban történő becslése szempontjából elengedhetetlen. A hőmérséklet nappali menetével való kapcsolata miatt feltételezhető, hogy a kitevő napi menetnek tulajdonságai az időjárási helyzeteknek is függvényei. Ez tehát évszakos, vagy a különböző áramlási helyzetekből adódó sajátosságokat jelent. Feltételezésünk szerint a két réteg határán létezik egy ún. *inflexiós magasság*, ahol a szélesebb és a szélenergia napi menete véletlenszerű (Tar, 2004d, Kircsi és Tar, 2008, Tar et al., 2008). Ebben a magasságban tehát a szélenergia egész

2. táblázat: A szeles napok havi számának alapstatisztikái az 1971. január – 2000. december időszakban.

	1971.01.-2000.12.						
	Debrecen	Szeged	Budapest	Pécs	Keszthely	Szombathely	Kékestető
hónap	360	360	360	360	336	360	360
szeles	4466	4647	4667	4673	2777	4824	7213
valószínűség	0,408	0,424	0,426	0,426	0,270	0,440	0,658
átlag	12,4	12,9	13,0	13,0	8,3	13,4	20,0
szórás	5,09	4,83	5,26	5,50	4,73	5,19	4,93
medián	12	13	13	13	8	13	21
max.	26	27	27	28	24	30	31
min.	0	2	1	0	0	2	6
ingás	26	25	26	28	24	28	26
≥20(%)	10,3	7,8	11,1	13,9	1,7	13,1	57,8
≤10(%)	35,8	34,7	34,7	33,9	64,4	30,0	4,4

nap nagyjából egyformának tekinthető, azaz az ide telepített szélérőmű működése kevesebb feladatot jelent a villamos energetikai rendszerirányítás számára. Az ebben a szintben kitermelhető szélenergia viszont lényegesen kevesebb, mint a tőle nagyobb magasságokban. Az inflexiós magasság létezését a paksi meteorológiai torony 2000–2001 évi szélesebb mérései alapján bizonyítjuk. Itt három szinten: 20, 50 és 120 m-en rögzítik a 10 perces átlagos szélesebbégeket. Vizsgálatainkat elvégeztük Puskás-féle front-tipizálás (Puskás és Tar, 2010) alapján frontos (218) és front nélküli (513) napokra is. A α kitevő meghatározásához (2) szerint két különböző, h_1 és h_2 magasság v_1 és v_2 szélesebbégeire van szükség. A paksi három szintből háromféleképpen kiválasztott szélesebbégekből 10 percenként meghatározott α érték 2001. évi átlagának napi menetét a 3. ábra mutatja. A legvastagabb légréteget (20–120 m) átfogó értékek a másik kettő átlagnak tekinthetők, a továbbiakban ezt használtuk, jele $\alpha(20,120)$. Elsőként meghatároztuk az $\alpha(20,120)$ óránkénti átlagait, majd az óránkénti szélesebbégeket különböző magasságokban a 20 m-es mérésekből, ezekből pedig az évi átlagokat, a szórásokat és a variációs együtthatókat. Ezeket mutatja az 4. ábra. Látható, hogy az átlag körüli ingadozás mérőszámai, a szórás és a variációs

együttható 50 méteren határozott minimumot mutatnak. Feltevésünk szerint itt van tehát az inflexiós magasság. Vizsgálatainkat elvégeztük a Puskás-féle front-tipizálás szerinti frontos és front nélküli napok megkülönböztetésével két éves adatbázison is, ugyancsak az $\alpha(20,120)$ kitevőt használva (Tar és Puskás, 2010a). Az óránkénti átlagos szélesebbégek napi menetét különböző magasságokban az 5. ábra mutatja. Az ábra alapján nagy valószínűséggel állíthatjuk, hogy 50–60 m-en létezik az időjárási helyzetektől független inflexiós magasság, amely fölött a szélesebb napi maximuma késő délutáni, esti órákban áll be. Magyarországon a szélenergia döntő hányadát a ritkán előforduló nagyobb szélesebbégek adják. Vizsgálatainkba ezért bevontuk a 10 ms^{-1} -nál nagyobb maximális szélesebbéggel bíró napok, az ún. *szeles napok* havi számát is. Feltártuk ennek részletes statisztikai szerkezetét és a szélenergetikai paraméterekkel való kapcsolatát abból a célból, hogy a szélenergia előzetes becslésére egy könnyen hozzáférhető paramétert kapjunk (Tar 2006ab, Tar et al., 2008ab). A szeles napok havi adatsorai és a szélesebbégek óránkénti értékei Debrecen, Szeged, Budapest-Pestszentlőrinc, Pécs, Keszthely, Szombathely és Kékestető állomásokon az 1971. január–2000. december időszakban homogénnek vehetők. Ezeket az adatokat dolgoztuk fel. A szeles napok alapstatisztikáit a 2. táblázat tartalmazza. A szeles napok bekövetkezésének valószínűsége Keszthely kivételével meglepően nagy, ami a szélenergia mennyisége szempontjából megnyugtató. Valódi orográfiai különbséget a 2/3 fölötti gyakoriságok esetében sikerült kimutatni szintén csak Keszthely kivételével, ugyanis a havi 20-nál több szeles nap előfordulásának gyakorisága nagyobb a hegyes és nem síkvidéki állomásokon, mint az alföldieken. A széljárás tehát Keszthelyen a legkiegyenlítettebb, aminek okaként az itt kialakuló termikus, azaz a vízparti szél valószínűsíthetjük. Az éves menetet áprilisi maximum, júliusi másod-maximum és nyár végi, ősz eleji minimum jellemzi Kékestető kivételével. Itt a maximum decemberre esik. Kékestető kivételével a szokásos 0,05 szignifikancia szinten a szeles napok havi számának empirikus eloszlása a gamma-eloszlással jól közelíthető. Kékestetőn a Poisson-eloszlás bizonyult ilyennek. A magyarországi szélmező és a nagytérségű légnyomási mező sztochasztikus kapcsolatának számszerű jellemzésére is a havonkénti szeles napok számát és a különböző cirkulációs (NAOI, zonális: ZI, meridionális: MI és ciklonossági: CI) indexek havi értékeit használtuk az 1970–2003. időszakban három, Péczely ill. Köppen szerint különböző éghajlati körzetben lévő meteorológiai állomás (Szombathely, Szeged és Debrecen) esetében (Molnár és Tar, 2003, Tar, 2004a; 2007). A lineáris korrelációs és regressziós analízis eredménye szerint nagy biztonsággal állíthatjuk, hogy a légnyomási mező vizsgált indexei közül a legnagyobb hatást elsősorban a ciklonossági, majd az Észak Atlanti Oszcillációs Index (NAOI) fejt ki a kárpát-medencei szélmező kialakításában. A CI prioritására utal az is, hogy mindhárom állomáson mindhárom esetben ennél az indexnél található a legnagyobb abszolút értékű korrelációs együtthatók. A 10 ms^{-1} -nál nagyobb maximális sebességű napok havi átlagos száma Debrecenben a legérzékenyebb, Szombathe-



5. ábra: Az óránkénti átlagos szélesebségek napi menetének modellezett értékei különböző magasságokban a vizsgált időszakokban, Pakson

lyen pedig a legkevésbé érzékeny a CI havi átlagának megváltozására. Ha nincs (ciklonális vagy anticiklonális) örvénylés ($CI=0$), akkor a 10 ms^{-1} -nál nagyobb maximális átlagsebességű napok átlagos száma független a földrajzi helyzettől, az orográfától és az éghajlati körzettől. A regressziós modellel a ciklonossági index havi értékeiből a 10 ms^{-1} -nál nagyobb maximális szélesebségű napok havi számának csak az évi átlagát sikerült jól becsülni. A Magyarországon működő szélerőműveknek az egyik közös tulajdonsága, hogy az indító sebességük (v_i) $3\text{--}4 \text{ ms}^{-1}$ körül van. A szélerőművek ún. teljesítménygörbéje szerint, ha a szélesebség (v) eléri, vagy meghaladja a v_i sebességet, akkor elkezdődik az elektromos áram termelése, aminek mennyisége a névleges teljesítményt leadó sebességig (v_n) arányos a szélesebség köbével. A v_n sebesség $12\text{--}14 \text{ ms}^{-1}$ a hazai szélerőműveknél. Innentől az ún. leállási sebességig ($v_{ki}=25 \text{ ms}^{-1}$) a névleges teljesítményen működik a szélerőmű, a v_{ki} sebességnél azonban biztonsági okokból leáll. A folyamatosan üzemelő szélerőművek szempontjából tehát a következő három sebesség-tartomány statisztikai értékelése elengedhetetlen:

szélesebség kategória	működési mód
$v \geq v_i$	a szélerőmű működik, áramot termel,
$v_i \leq v < v_n$	a szélerőmű működik, a sebességgel együtt növekvő áramot termel
$v_n \leq v < v_{ki}$	a szélerőmű szabályozottan a maximális (névleges) teljesítményen működik.

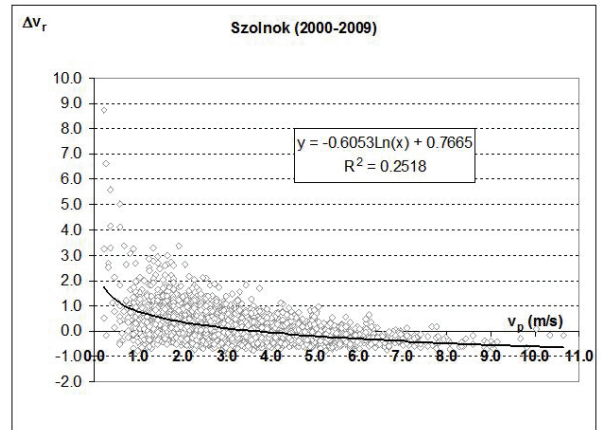
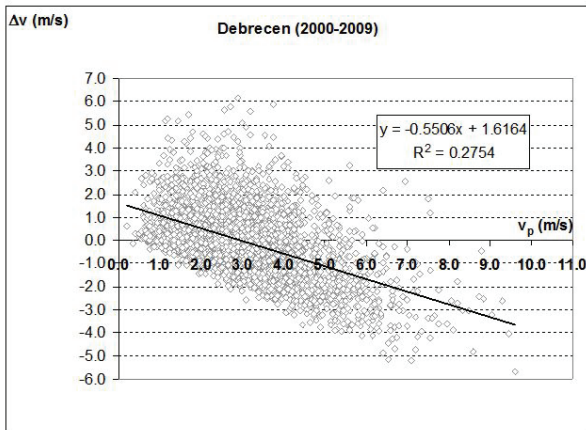
A $v \geq v_i$ egyenlőtlenséget tehát tekinthetjük a szélerőmű működésének *szélklimatológiai* feltételeként. Ha ugyanis ez teljesül, akkor Magyarországon a szélklimatológiai adottságok miatt a következő esetek lehetségesek: a szélerőmű működik, áramot termel; vagy kis valószínűséggel a szélerőmű szabályozott üzemmódban működik; vagy nagyon kis valószínűséggel áll. A folyamatos áramtermelés szempontjából fontos kérdés a következő: van-e a működéshez szükséges szélklimatológiai feltétel teljesülésében időbeli, orográfiai eltolódás Magyarország területén különböző magasságokban? Erre próbálunk választ adni hét magyarországi meteorológiai állomás (Kékestető, Szombathely, Keszthely, Pécs, Budapest, Szeged, Debrecen) 1991–2000 időszakban megfigyelt óránkénti szélesebségei alapján (Tar et al., 2011). Az előzőekben már utaltunk rá, hogy a kb. 60 m-t meghaladó magasságokban a szélesebség napi menete fordítottja az ez alatti magasságokban megfigyeltnek, 13–14 óra körüli minimummal. A magassági transzformációhoz most is a (2)

összefüggést használtuk. Mivel nem állt rendelkezésünkre az α napi menete, így a Weibull-eloszlás előbb részletezett alkalmazásánál kapott egyik paraméter értékét használtuk, mint átlagos kitevőt (Kékestető 0,26, Szombathely 0,26, Keszthely 0,32, Pécs 0,27, Budapest, 0,28, Szeged 0,26, Debrecen 0,27). Így viszont nem kapjuk vissza a 60 m fölötti szintek szélesebségének napi menetét, ezért vizsgálatainkat csak 10, 30 és 60 m-en végeztük el. A 3 ms^{-1} -nál nagyobb sebességű szelek átlagos valószínűségét és a szélerőművek ebből számolt átlagos üzemóráját a vizsgált időszakban a síkvidéki, a nem síkvidéki és a hegyvidéki állomásokon az 3. táblázat mutatja. Vizsgálataink további legfontosabb eredményei a következők: A 3 ms^{-1} -nál nagyobb óránkénti szélesebségek valószínűségének napi menetében nincs orográfiai elkülönülés, a maximum mindenhol 13–14 óra körül fordul elő. Az időben folytonosan változó valószínűségek napi menete szerint a nap folyamán a 17–18 óráig növekvő villamos áram termeléssel lehet számolni. Azon intervallumoknak átlagos hosszának sorrendjében, amelyek minden órájában nagyobb a szélesebség, mint 3 ms^{-1} , nincs orográfiai elkülönülés és magasságbeli különbség. Azoknak az intervallumoknak a havi átlagos hossza, amelyek minden órájában 3 ms^{-1} -nál nagyobb az óránkénti szélesebség, 38 és 69 közötti %-ban határozza meg a havi átlagos fajlagos szélteljesítményt. A nem síkvidéki állomásokon (hegység, dombtság) a havi átlagos szélteljesítmény érzékenyebben reagál ezen intervallumok átlagos hosszának megváltozására, mint a síkvidéki állomásokon.

A szélerőműveket működtetők egyik nehezen megoldható problémája az ún. „menetrend” elkészítése, ami a következő napon megtermelt áram rövid időszakokra eső mennyiségének becslését jelenti. Ez egy igen komoly feladat a szélesebség pl. óránkénti előrejelzésének nagy bizonytalansága miatt. A menetrend elkészítéséhez kívánunk segítséget adni a most bemutatandó statisztikai módszerrel (Tar és Puskás, 2010bc, Tar, 2014ab, Puskás et al., 2014). Modellünk alkalmas arra, hogy bizonyos időszakokban (pl. évszak, év) és a különböző időjárási helyzetek (makroszinoptikus helyzetek vagy fronttípusok) átmenetei esetében megmondjuk a napi átlagos szélesebség és vele együtt az átlagos szélenergia *következő napra történő* csökkenésének vagy növekedésének valószínűségét. Ennek alapján pedig a „mai nap” átlagos szélesebségéből megbecsülhető a „következő nap” átlagos szélesebsége, ami támpontot adhat a szélerőművek üzemeltetőinek a kötelező menetrend elkészítéséhez. Elemzéseink célja természetesen az is, hogy hozzájá-

ruhunk hazánk szélklimájának minél pontosabb feltárásához, elsősorban a szélergia további kihasználásának ösztönzése céljából. Módszerünket hat alföldi meteorológiai állomás esetében mutatjuk be (Tar, 2014a). Ezek növekvő földrajzi hosszúság szerint rendezve: Kecskemét, Szeged, Szolnok, Békéscsaba, Debrecen és Nyíregyháza-Napkor. Az adatbázist ezen állomások 2000–2009 időszakra vonatkozó napi átlagos szélességei képezik, amelyeket a már említett szabadon hozzáférhető honlapról (www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html) töltöttük le. A kiválasztott meteorológiai állomásokon az anemo-méterek nem egyforma magasságban működnek,

tudjuk felhasználni, így az idősorok tovább rövidülnek. Az egymás után következő napok átlagos szélességei közötti kapcsolat feltárásához a hiányzó adatok miatt nem használhatjuk az autokorrelációs-autoregressziós elemzést. Ehelyett a lineáris korrelációt és regressziót alkalmazzuk a napi átlagos szélességek adatsorainak szomszédos v_p (mai nap) és v_n (következő nap) elemeire. Ennek eredményét a 4. táblázat mutatja. A korrelációs és a regressziós együttható egyenlősége az adatsorok definíciójából adódik. A minták nagy elemszáma miatt az ide vonatkozó próbák elvégzése nélkül is feltételezhetjük, hogy a táblázatbeli lineáris korrelációs együtthatók szig-



6. ábra: A két legszorosabb sztochasztikus kapcsolat esete: a mai nap átlagos szélessége (v_p) és a következő napra történő abszolút változás (Δv) közötti lineáris regresszió Debrecenben, valamint a mai nap átlagos szélessége és a következő napra történő relatív változás (Δv_r) közötti logaritmikus regresszió Szolnokon.

sőt Szegeden, Békéscsabán és Nyíregyházán a vizsgált időszakban műszeráthelyezés történt, ennek során megváltozott a szélmérés magassága is. Ezért az idősorok homogenizálása és az eredmények összehasonlíthatósága miatt a napi átlagos szélességeket minden állomáson 10 m-re transzformáltuk. Ehhez a paraméter nélküli (1) összefüggést használtuk fel. Több számítás is bizonyítja ugyanis, hogy ezzel ugyanolyan eredményeket kapunk, mint a (2) összefüggéssel $\alpha=0,25$ esetében. Módszerünk legfontosabb eleme az egymás után következő napok átlagos szélességének összehasonlítása. Az idősorok azonban mind a hat állomáson hiányosak. Ez módszerünk alkalmazhatósága szempontjából azt jelenti, hogy a hiányzó nap előtti és utáni nap átlagos szélességét sem

nifikánsan különböznek nullától. Az átlagos szélesség napról napra történő abszolút megváltozását a következő nap és a mai nap átlagos szélességének különbségével (ms-1) jellemezzük, azaz

$$\Delta v = v_n - v_p \tag{3}$$

a relatív változást pedig a

$$\Delta v_r = \frac{v_n - v_p}{v_p} \tag{4}$$

mennyiséggel.

A változásokra vonatkozó legfontosabb eredményeink a következők: A pozitív (abszolút vagy relatív) változások gyakorisága 3,0–5,2%-kal meghaladja a negatív változásokét. Annak valószínűsége, hogy a napi átlagos szélesség növekedjen a következő napon ($\Delta v > 0$) lényegesen nagyobb abban az esetben, ha a mai nap átlagos szélessége kisebb, mint az időszak átlagos szélessége. A következő napi csökkenés valószínűsége között viszont mindössze 16–25% a különbség az átlagos érték két ol-

3. táblázat: A 3 ms^{-1} -nél nagyobb szelek átlagos valószínűsége ($p_3(h)$) az állomások orográfiai csoportosításában az évenkénti átlagos üzemórával (1991–2000)

	10 m		30 m		60 m	
	éves $p_3(h)$	üzemóra (%)	éves $p_3(h)$	üzemóra (%)	éves $p_3(h)$	üzemóra (%)
Debrecen	0,396	40	0,509	51	0,644	64
Szeged	0,463	46	0,609	61	0,719	72
Budapest	0,262	26	0,446	45	0,564	56
Szombathely	0,434	43	0,560	56	0,671	67
Keszthely	0,155	16	0,272	27	0,387	39
Pécs	0,425	43	0,566	57	0,688	69
Kékestető	0,534	53	0,696	70	0,748	75

4. táblázat: A mai nap (v_p) és a következő nap (v_n) átlagos szélessége közötti lineáris korrelációs együttható ($r(v_p, v_n)$) és regressziós egyenes paramétereinek ($b(v_p, v_n)$, $a(v_p, v_n)$) értékei.

	Kecskemét	Szeged	Szolnok	Békéscsaba	Debrecen	Nyíregyháza
$r(v_p, v_n)$	0,508	0,468	0,485	0,546	0,449	0,473
$b(v_p, v_n)$	0,508	0,468	0,485	0,546	0,449	0,472
$a(v_p, v_n)$	1,619	1,648	1,682	1,055	1,616	1,567

dalán, az ennél nagyobb mai napi átlagos szélesebségek javára. Megvizsgáltuk a változásoknak a mai nap átlagos szélesebségével való kapcsolatát is. Az abszolút változások esetében legszorosabb összefüggésnek a lineáris regresszió, a relatív változások esetében pedig a logaritmikus regresszió bizonyult. A 6. ábrán a legszorosabb kapcsolatokat ábrázoltuk. Bizonyítható, hogy a regressziós egyenes zérushelye minden esetben az időszak átlagsebességénél van. Az eloszlások vizsgálata azt mutatja, hogy a Δv módusza a 0 és -1 ms^{-1} , a Δv_r módusza ($\langle \Delta v_r \rangle$) pedig a (0, -0,2) intervallumba esik mindegyik állomáson. Előbbit $-0,5 \text{ ms}^{-1}$ -nak, utóbbit $-0,1$ -nek vettük. A Δv_r állomásonként változó átlagos értékei ($[\Delta v_r]$) és móduszai ($\langle \Delta v_r \rangle = -0,1$) alapján becsléseket végeztünk a következő nap átlagos szélesebségére, vagyis „visszaállítottuk” az eredeti adatsorokat. Meghatároztuk a becsült adatsorok átlagát és szórását és az eredeti idősorokkal való összehasonlítással a becslések hibáit is. A móduszról történő becslés lényegesen jobb eredményt ad, mint az átlagokból történő, ennek ugyanis átlagos relatív hibája $-2,5$ és $2,6\%$ közé esik. Hasonló következtetésekre jutottunk, amikor vizsgálatainkat az ország egészére vagy csak a Dunántúlra, valamint különböző időjárás helyzetekre (makroszinoptikus és front-típusok) végeztük el. A szélérőmű működésének helyéhez legközelebbi állomásra vonatkozó vizsgálatok eredményeiből meg tudjuk mondani, hogy mekkora valószínűséggel növekszik vagy csökken a következő napi átlagos szélesebség, vele együtt a potenciális szélenergia is. Ha pedig a mai nap átlagos szélesebségére már van valamilyen sejtése, becslése, akkor a szélérőművet üzemeltető is tud kalkulálni a következő nap várható átlagos szélesebségére. Az időjárás helyzetről pedig az OMSZ honlapján tájékozódhat.

Módszerek a potenciális szélteljesítmény becslésére. Az energiatartalom tehát a szélmező egyik fontos strukturális eleme, amellyel kapcsolatos alapvető kérdés a mennyisége. A potenciális szélenergia a szélmező egyéb karakterisztikáinak függvénye, így mennyisége az évszakoknak, időjárás helyzeteknek megfelelően is változik. Ebből következően az éghajlatváltozásra is reagál, ennek vizsgálata a jövőbeli felhasználás szempontjából bír fontossággal (Tar et al., 2000, 2002). A szélmező energiatartalmának becslésére több módszer létezik. A következőkben két, általunk kidolgozott statisztikai modellt mutatunk be, amelyek egy napokból álló időszak átlagos, ill. egy nap összes szélenergia potenciáljának meghatározására alkalmasak (Tar et al., 2000, 2001abc, Tar és Kircsi, 2001ab, Tar, 2004c, Tar, 2006c, Tar et al., 2007, Tar, 2008a, Tar és Szegedi, 2009, Tar, 2010, Tar és Szegedi, 2011). A potenciális szélenergiát általában a fajlagos szélteljesítménnyel jellemezzük, ami egységnyi függőleges felületen egységnyi idő alatt áthaladó levegő tömegének mozgási energiája. Kiszámítása egy adott időpontban a

$$P_f = \frac{\rho}{2} v^3 \quad (5)$$

összefüggés alapján történik, mértékegysége Wm^{-2} , v a szélesebség, ρ a levegő sűrűsége. Egy hosszabb időszak fajlagos szélteljesítményének meghatározására két lehetőség adódik: a fenti összefüggésben az időszak átlagse-

bességét írjuk a v helyébe, vagy az időszak egyes (diszkrét) időpontjaiban meghatározott értékeket összegezzük. Logikus, hogy a második lehetőség áll közelebb a valósághoz. Ekkor viszont az összeg értékének az időszak mérési időpontjainak számától való függése jelent problémát. Az összegnek a mérési időpontok számától való függése az átlagolással csökkenthető, de nem küszöbölhető ki teljesen. A napi átlagos fajlagos szélteljesítmény – ami tulajdonképpen egy mérési időpontra átlagosan jutót jelent – értéke sem független a figyelembe vett időpontok számától, sőt attól is függ, milyen időpontokat használunk. E függőség kiküszöbölésére létezik elvi megoldás: a szélesebség-köbök napi menetét megadó függvény görbe alatti területét kell meghatározni és ezt $q/2$ -vel megszorozva megkapjuk a napi összes fajlagos szélteljesítmény pontos értékét. Ezt természetesen numerikus integrálással tudjuk csak elvégezni, hiszen a függvény egy napon általában nem adható meg analitikusan. Egy (nem feltétlenül egymás után következő) naptári napokból álló időszak egy napjára átlagosan jutó fajlagos szélteljesítmény (P_{fmd}) meghatározását azonban már megkísérelhetjük egy alkalmasan választott közelítő függvény segítségével. A P_{fmd} definíciója a következő: a szélesebség köbök mérési időpontokénti (óránkénti vagy 10 perces) átlagának napi menetét közelítő függvény görbe alatti területe szorozva a levegő sűrűségének felével. A P_{fmd} tulajdonságai tehát a vele arányos, a szélesebség köbök pl. óránkénti átlagára illesztett folytonos függvény görbe alatti területén (T_{ga}) keresztül vizsgálhatók. A közelítő függvény legyen egy trigonometrikus polinomokból álló Fourier-sor első két eleme, azaz

$$f_2(x) = a_0 + \sum_{m=1}^2 \left(a_m \cos \frac{2\pi mx}{N} + b_m \sin \frac{2\pi mx}{N} \right) \quad (6)$$

ahol N a napi mérési időpontok száma, $x=0, 1, 2, \dots, N-1$. Az illesztés jószágának mérésére az ún. reziduális szórásnégyzet szolgál:

$$s_m^2 = s_{m-1}^2 - 0,5A_m^2 \quad (7)$$

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

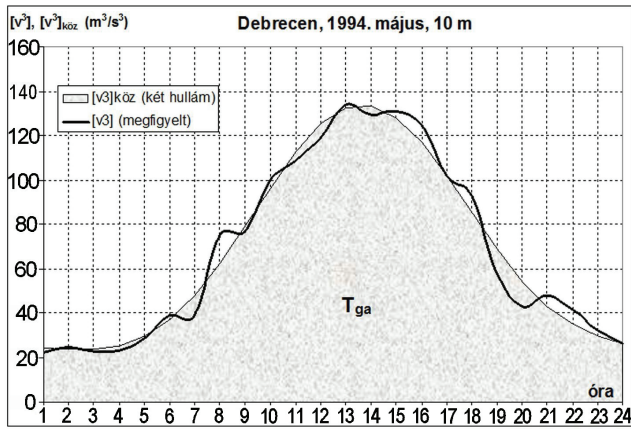
$$A_m = (a_m^2 + b_m^2)^{1/2} \quad (8)$$

vagyis az m . hullám amplitúdója. Látható azonban, hogy az s_m^2 függ az adatok nagyságától, azaz nem alkalmas esetünkben az összehasonlításra. Erre a közelítés relatív mértékét definiál

$$s_{0m} = \frac{s_0^2 - s_m^2}{s_0^2} \quad (9)$$

paramétert használtuk, amely már az értékektől függetlennek tekinthető, nem függ tehát a szélesebségek nagyságától, így az anemométer magassága szerint sem kell korrigálni. Az s_m^2 értékei a közelítő polinomok számának növekedtével nyilvánvalóan csökkennek. Tegyük fel, hogy ez nem így van, ekkor $s_m^2 \approx s_0^2$, azaz $s_{0m} \approx 0$. Ha viszont 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.

A (8) függvény primitív függvénye a következő:



7. ábra: A mért szélesség köbök átlagának ([v3]) napi menetére illesztett közelítő függvény ([v3]köz) és ennek görbe alatti területe (T_{ga}).

$$F_2(x) = a_0x + \sum_{m=1}^2 \left(\frac{a_m}{\alpha_m} \sin \alpha_m x - \frac{b_m}{\alpha_m} \cos \alpha_m x \right) \quad (10)$$

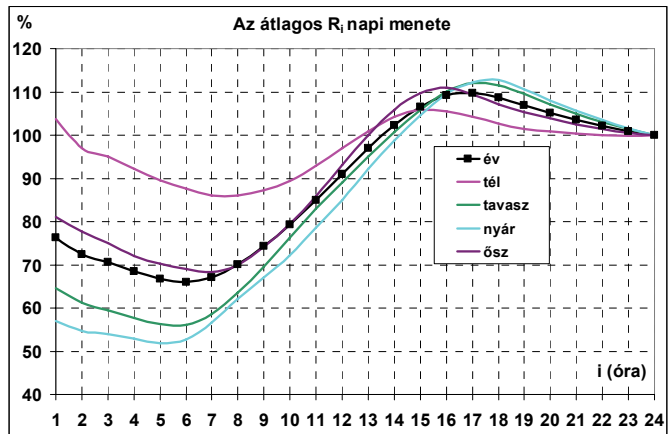
ahol $\alpha_m = \frac{2\pi m}{N}$. Ha az a_m és b_m együtthatók meghatározásához a szélesség köbök mérési időpontokénti átlagának idősorát használjuk, akkor az időszak egy napjára átlagosan jutó fajlagos szélteljesítmény:

$$P_{find} = \frac{e}{2} [F_2(N - 1) - F_2(0)],$$

ahol tehát

$$T_{ga} = F_2(N - 1) - F_2(0) \quad (11)$$

a görbe alatti terület (7. ábra). A leírt módszer tehát alkalmas a havi, az évszakos és az éves, valamint a különböző időjárási helyzetek napi átlagos szélteljesítményének meghatározására óránkénti szélesség adatok felhasználásával. Ha az α Hellmann-kitevő átlagos napi menete ismert, akkor előállítható az óránkénti szélességek napi menete magasabb szinteken is, így a módszer itt is alkalmazható. A paksi tízperces (N=144) 50 m-es toronymérések segítségével megmutattuk, hogy a módszerünkkel valóban kiküszöbölhető a mérési időpontok számától való függés. Először kiszámoltuk az óránkénti szélesség átlagokat (N=24), majd a görbe alatti területet mindkét esetben havonta a 2000 és 2001-es évekre. Egy eset kivételével (2000. július) a tíz perces adatok alapján számolt görbe alatti területek mindössze 1–7%-kal, átlagosan csak 3,2%-kal nagyobbak, mint az óránkénti adatokból számoltak. A görbe alatti területet előállíthatjuk bizonyos napszakokra is, a nappali (6–20) és az éjszakai (21–5) órákra. Így vizsgálhatjuk a szélpotenciál napszakos megoszlását, és ha az α Hellmann-kitevő átlagos napi menete ismert, akkor akár különböző magasságokban is. A paksi adatok erre lehetőséget adnak, az eredményeket az 5. táblázat mutatja a teljes időszakra és a Puskás-féle tipizálás szerinti frontos és frontnélküli napokra. A nappali potenciális szélteljesítmény a táblázat szerint csak kb. 30 m-ig – az inflexiós magasság alatt – nagyobb, vagy egyenlő, mint az éjszakai. Utóbbi 50 m-en több mint másfélszerese, 60–70 m-en már kb. kétszerese az előbbinek mindhárom időszakban. Az éjszaka/nappal arány egyébként minden magasságban a fron-



8. ábra: A relatív csúszó átlag középértékeinek napi menete (Debrecen, 1988–1997).

tos időszakban a legnagyobb, 120 m-en már több, mint négyszeres. Ugyanakkor a táblázat megfelelő oszlopait összehasonlítva megállapítható, hogy a frontnélküli napokon a teljes napi szélenergiának 3–5%-kal nagyobb része esik a nappali időszakra.

Hét hazai meteorológiai állomás (Kékestető, Szombathely, Pécs, Budapest, Győr, Szeged, Debrecen) 10 évi (1991–2000), az anemométer magasságában mért óránkénti szélességei alapján a fenti módszerrel megvizsgáltuk azt is, hogy melyek azok a Puskás-féle front-típusok, amelyek a potenciális szélteljesítménynek a 10 éves időszakra vonatkozó átlagát markánsan befolyásolják. A front-típusok átlagsebességének minimuma Szombathely kivételével a közelítő okklúziós front-típusban van. A szélesség a síkvidéki állomásokon és Kékestetőn legérzékenyebben a közelítő és a tartózkodó hidegfront típusok megjelenésére reagál, Szombathelyen és Pécsen viszont a tartózkodó okklúziós front-típusra. Ugyanakkor bármilyen front megjelenése kb. 33–90%-kal növeli a szélenergiát a frontnélküli időszakhoz képest. A legkevésbé energikus front-típusok a közelítő okklúziós front és a közelítő melegfront. A legenergiásabb front-típusok pedig a következők: közelítő hidegfront, tartózkodó

5. táblázat: A nappali és az éjszakai órákra számított átlagos fajlagos szélteljesítmény az egész napi átlagos fajlagos szélteljesítmény %-ban (Paks, 2000–2001).

méter	teljes		frontos		frontnélküli	
	nappal	éjszaka	nappal	éjszaka	nappal	éjszaka
10	74,7	25,3	72,3	27,7	76,5	23,5
20	60,1	39,9	57,1	42,9	62,4	37,6
30	50,3	49,7	47,3	52,7	52,7	47,3
40	43,3	56,7	40,4	59,6	45,7	54,3
50	38,1	61,9	35,4	64,6	40,3	59,7
60	34,0	66,0	31,5	68,5	36,1	63,9
70	30,8	69,2	28,4	71,6	32,7	67,3
80	28,1	71,9	25,9	74,1	30,0	70,0
90	25,9	74,1	23,9	76,1	27,6	72,4
100	24,0	76,0	22,1	77,9	25,6	74,4
110	22,4	77,6	20,6	79,4	23,9	76,1
120	21,0	79,0	19,4	80,6	22,5	77,5

dó melegfront, tartózkodó okklúziós front és a közelítő meleg- és hidegfront.

A havi átlagos fajlagos szélteljesítménnyel arányos görbe alatti terület meghatározásához hosszú idejű szélsősebesség mérésre, komoly számításokra van szükség. Az eddigi

6. táblázat: A havi átlagos fajlagos szélteljesítménnyel arányos mennyiség (T_{ga}) és a szeles napok havonkénti számának sztochasztikus kapcsolata: a korrelációs együttható (r), a regressziós együttható (b) és a regressziós konstans (a , $a\%$).

	Szombathely	Keszthely	Pécs	Budapest	Szeged	Debrecen	Kékestető
r	0,539	0,115	0,638	0,487	0,529	0,593	0,728
b	247,98	17,554	117,36	43,063	93,768	67,994	269,17
a	-10,784	668,58	241,49	423,72	618,82	405,58	-1388,4
$a\%$	-	-	15,0	45,4	34,5	32,4	-

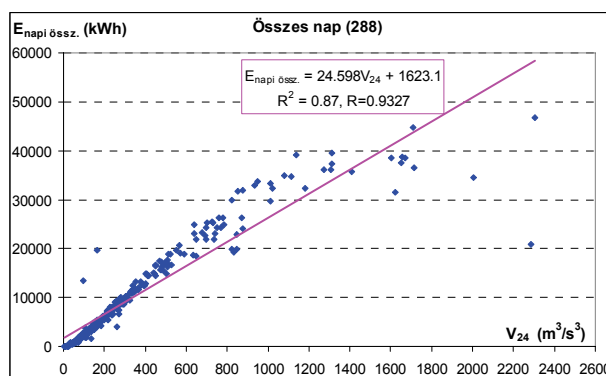
eredmények viszont lehetőséget adnak arra, hogy a T_{ga} havi értékeit kapcsolatba hozzuk egy másik, könnyen számolható, mérhető, megfigyelhető szélklimatológiai paraméterrel, pl. a szélirányok instabilitási indexének vagy a szélsőbességek havi átlagával, vagy a szeles napok havi számával. A szignifikáns kapcsolatok lehetővé teszik a T_{ga} becslését, sőt előrejelzését is.

Hét hazai meteorológiai állomáson megvizsgáltuk a havi átlagos fajlagos szélteljesítménnyel arányos görbe alatti terület és az OMSZ időjárás-jelentéseiben közölt szeles napok havonkénti számának sztochasztikus kapcsolatát a lineáris korreláció és regresszió módszerével az 1991–2000 évtizedben. A korrelációs együtthatót (r), a regressziós együtthatót (b) és a regressziós konstans (a , $a\%$) az 6. táblázatban adjuk meg. A korrelációs együttható Keszthely kivételével mindenhol szignifikáns 0,05 szinten.

A szignifikáns kapcsolat Kékestetőn a legerősebb és Budapesten a leggyengébb. Az a regressziós konstans esetünkben a 0 szeles naphoz tartozó átlagos görbe alatti területet adja meg. A 0 szeles nap ugyan kívül esik a regresszió érvényességi tartományán Pécs és Keszthely kivételével, de az egyenletek csak Szombathely és Kékestető esetében adnak negatív T_{ga} értéket. Keszthelyen a kapcsolat nem értékelhető. A többi állomásra bevezettük az $a\%$ paramétert, ami azt mutatja meg, hogy az a hány százaléka az átlagnak. A táblázat szerint a havi átlagos szélteljesítménynek Budapesten 45%-a, Debrecenben és Szegeden több, mint 30%-a, Pécsen viszont csak 15%-a származik a 0 szeles nappal rendelkező hónapokból.

A b regressziós együttható megmutatja, hogy a szeles napok számának egy nappal való megváltozása mennyivel növeli a görbe alatti területet, vagyis a prediktandusz érzékenységét a prediktor változására. A 6. táblázat szerint így a T_{ga} , a havi átlagos fajlagos szélteljesítmény is a szoba jöhető állomások közül Kékestetőn a legérzékenyebb, Budapesten pedig a legkevésbé érzékeny a szeles napok számának változására. A szignifikáns korrelációk

esetében a regressziós egyenlet segítségével előállítottuk a T_{ga} modellezett idősorait, majd megállapítottuk a becslés hibáit. A relatív hiba átlaga és szórása Szombathelyen a legnagyobb és Kékestetőn a legkisebb, utóbbit a három síkvidéki állomás előzi meg. Levonható tehát az a követ-



9. ábra: Összefüggés a termelt villamosenergia és a szélsősebesség köbök napi átlaga között (működő szelerómű adatai, 2005.08.18.–2006.06.30., szabályozatlan és szabályozott üzemmód).

kezdetés, hogy a síkvidéki állomásokon és a bizonyos értelemben hasonlóan szabad horizonttal rendelkező hegyvidéki állomáson a regressziós modell jobb közelítést ad a fajlagos szélteljesítmény havi átlagos értékeire. Egy nap összes potenciális szélenergiáját az egyes időpontjainban mért szélsőbességek köbök összege azonban nyilvánvalóan függ a mérések számától. Ezt a függést kétféleképpen lehet csökkenteni: vagy a nap egy adott időpontjára átlagosan jutó vagy a relatív szélenergiát határozzuk meg. A csúszó átlagok módszerének (SLIDAV modell) lényege, hogy a nap egy órájára átlagosan eső (napi átlagos) potenciális szélenergiát a nap tetszőleges órájáig megmért szélsőbességek köbök összegéből becsüljük. Egy nap i . órájában a P_i fajlagos szélteljesítmény

$$P_i = \frac{e}{2} v_i^3 \quad (12)$$

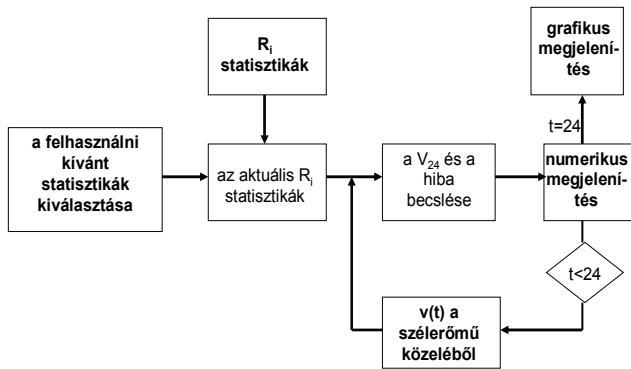
A szélsőbesség óránkénti köbökét az adott napon összegezve tehát a napi összes fajlagos szélteljesítménnyel arányos mennyiséget kapunk. Ha ezt az összeget elosztjuk a megfigyelések számával, akkor az egy órára átlagosan jutó értéket kapjuk, ami feltételezhetően közelítőleg független az összeg tagjainak számától. Jelölje tehát v_i egy adott nap i . órájában ($i=1, 2, \dots, 24$) a szélsőbesség értékét. A szélsőbességek köbökének csúszó átlagai (V_i) minden órában:

$$V_i = \overline{v_i^3} = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i v_j^3 \quad (13)$$

Nyilvánvaló, hogy V_{24} , az óránkénti szélsőbesség köbökének az adott nap egy órájára eső átlaga („napi átlag”) lesz. A $R_i = \frac{V_i}{V_{24}}$ relatív csúszó átlag (%), a nap i . órájáig kumulált és átlagolt szélsőbesség-köbök százalékát mutatja ugyanezen mennyiség napi átlagának.

A szélsőbesség napi menetéből következik, hogy már napközben ($i < 24$) elérheti a 100%-ot, majd egy maximális értéket felvéve az $i=24$ órában definíció szerint ismét

100% lesz. Az R_i egyébként a nap i . órájáig számolt átlagos és a napi átlagos fajlagos szélteljesítmény aránya is. A kiválasztott időszakok (év, évszakok, helyzetcsoportok) minden napjára elkészítettük az R_i értékeit, majd óránként meghatároztuk ennek különböző statisztikai jellemzőit. Óránkénti közepes értékeinek évszakos és éves napi menetét a 8. ábra mutatja Debrecenben (1988–1997). A V_{24} becslését ezekből ($[R_i]$) és a módusz óránkénti értékeiből ($\langle R_i \rangle$) végeztük el. Az $\langle R_i \rangle$ óránkénti értékeit az R_i óránkénti gyakorisági eloszlásából határoztuk meg 10%-os osztályközöket használva. A legnagyobb gyakorisággal rendelkező intervallum középpontját tekintettük a módusznak, értéke az összes esetet figyelembe véve 5 és 145% között változik. Ha tehát egy hosszabb időszak óránkénti szélesebbeségeiből előállítottuk az R_i statisztikai karakterisztikáit, akkor az átlagokból és a móduszokból megpróbálkozhatunk a mérési időszakon kívüli napokra előállítani a V_{24} értékét. Többféle, aránypárokra alapuló becslési mód is létezik, de ezek közül leghatékonyabbnak az adott időpontbeli móduszból történő becslés bizonyult.

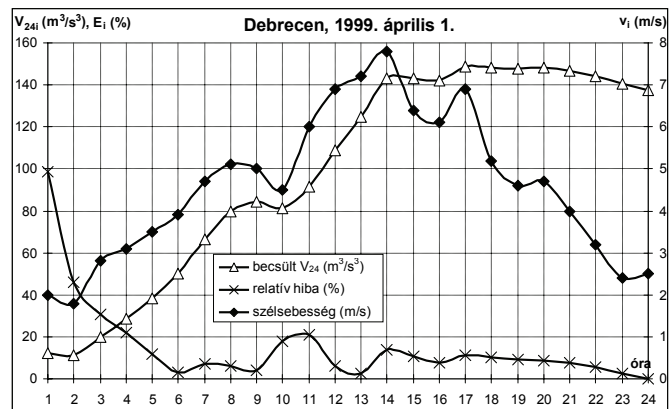


10. ábra: A V_{24} becslését folyamatosan végző szoftver (a SLIDAV modell) blokkdiagramja.

A csúszó átlagok módszere lehetőséget ad a napi átlagos szélteljesítménnyel arányos mennyiség, a szélesebbesség köbök napi átlagának (V_{24}) már a nap vége előtt 6–9 órával átlagosan 21%-os hibával történő becslésére (11. ábra). A legjobb becsléseket tavasszal és nyáron, valamint a Péczeley-féle ZE, az MN helyzetcsoportokban, ill. a ciklon-centrum helyzetben kapjuk. Az így kapott érték fontos információ lehet a szélturbina üzemtartójának: közelítőleg meghatározhatja az egész nap kitermelhető szélenergiát, eldöntheti, hogy érdemes-e egész nap működtetni a gépet, vagy leállíthatja a karbantartás elvégzésére. A megtermelt villamos energia és a V_{24} között ugyanis igen erős sztochasztikus kapcsolat mutatható ki, még akkor is, ha nem különítjük el a szabályozatlan és szabályozott üzemmódokat, ahogyan ezt a 9. ábrán láthatjuk. A V_{24} becsült értékéből a napi összes megtermelt villamos energia szintén megbecsülhető. Ebből következik, hogy modellünk „on-line” becslésre is alkalmas, ha a működő szélerőműhöz legközelebbi meteorológiai állomás hosszú idejű szélmeréseiből rendelkezésünkre állnak az R_i statisztikái. A folyamatos szélesebbesség adatokat pedig a szélerőmű közvetlen közeléből (pl. a torony tetejéről)

kapjuk. Az R_i relatív szám, értékei függetlenek a szélérés magasságától. A V_{24} becslését folyamatosan végző szoftver blokkdiagramja a 10. ábrán látható. A modellfuttatás egy napi eredménye pedig a 11. ábrán.

Nagytérségű szélklimatológiai vizsgálatok. A szélenergia jövőbeli fejlődéséhez nélkülözhetetlenül szükség van a szél energiájának térben és időben történő rendelkezésre állásának vizsgálatára, illetve a szélenergia potenciál olyan jellegzetességeinek ismeretére, amelyek a szélenergia villamosenergia-rendszerbe történő illesztését segíthetik anélkül, hogy az ellátás biztonságát fenyegetnék. A légmozgás tulajdonságainak alakulását a NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) reanalízis projekt (Kalnay et al., 1996) 1956–2005 közötti 50 év hosszú északi negyedgömbre vonatkozó meridionális és zonális szélvektorok napi adatsora alapján vizsgáltuk, melyet kiegészítettünk a 2006-os mérési sorral. (Kircsi, 2008). A kutatás során arra törekedtünk, hogy a Magyarországon rendelkezésre álló szélenergia-potenciál jellegzetességeit

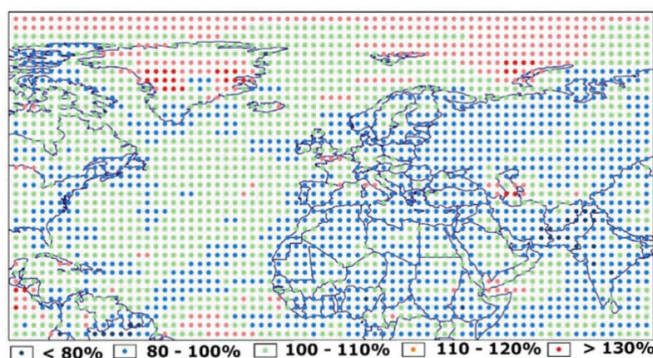


11. ábra: A SLIDAV modell futtatásának eredménye egy kiválasztott napon.

az északi negyedgömb más térségeinek szélviszonyaival összehasonlítva mutassuk be, ehhez különböző kontinensen és klímaövből elhelyezkedő 8 minta-régiót elemeztünk részletesen. A napi u és v szélvektorokat évenként a Climate Research Unit (CRU) adatbázisából töltöttük le. Adataink a nyugati és keleti hosszúság -90° és 90° közötti, illetve az Északi-sark és az Egyenlítő közötti területre, összesen 2701 gridre vonatkoztak, így hazánk kívül a teljes európai kontinens és tágabb környezetének szélklimája összefüggéseiben áttekinthető. Az u és v szélvektorok ún. 995 szigma szintre vonatkoznak, mely szint domborzatkövető, azaz az orográfiai viszonyoktól függetlenül a talaj felszíne felett kb. 80 m magasság szélviszonyairól tájékoztat. A modell horizontális felbontása T62, azaz $2,5^\circ$ meridionális és zonális irányban. A szélklimatológiai elemzéshez a (u, v) szélvektor komponensekből vektorszámítás szabályai szerint számított szélesebbesség adatokat használtuk fel. A napi adatsorokból állítottunk elő havi, évszakos, évi és sokévi átlagokat, melyeket felhasználva számítottunk különböző időskálán értelmezett szélindexeket. A szélindex (%) minden esetben úgy állítható elő, hogy az adott időpontban megfigyelt értéket egy

sokévi átlaghoz viszonyítjuk. A 12. ábrán a 2006 évi szélindexet mutatjuk be, amely az 1956–2005 közötti 50 évi átlaghoz viszonyítva mutatja be a 2006. évi szélesség területi eloszlását.

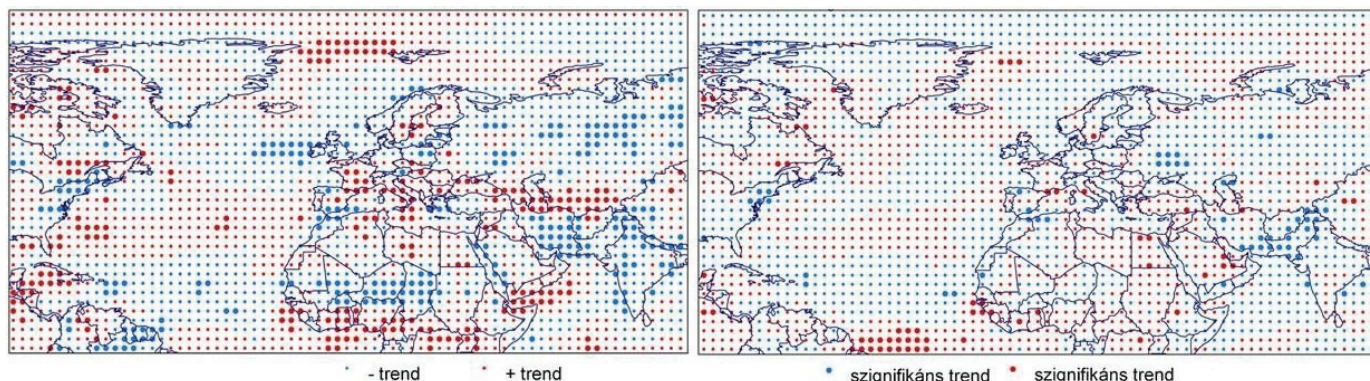
Az 1956–2005 közötti 50 év idősorának vizsgálatához regresszió-analízist végeztünk. Az idősorra illesztett lineáris trend-egyenes meredekségének (b) nullától való eltérését t -próbára visszavezetett vizsgálattal ellenőriztük. Az északi negyed gömb mind a 2701 gridjének időbeli változékonyságának jellemzéséhez használtuk a variációs együtthatót, amely a minta szórását a minta átlagához viszonyítva jellemzi. Megállapítottuk, hogy az északi negyed gömbön nem található tartósan egyirányú változás a szélesség évi átlagaiban. Az 50-es évek vége és a 90-es évek erősebb szelekkel volt jellemezhető, míg általában a 70-es évek voltak a legkevésbé szelesek. A '70-es éveket követő évtizedekben általában a mérsékelt és poláris öv óceáni területei felett erősödött a szél sebessége. A szélesség változásának iránya és nagysága erősen függ a választott térség földrajzi helyzetétől és a vizsgált időszak hosszától (13. ábra). Megállapított-



12. ábra: A szélindex (%) területi eloszlása a 2006 évben.

40%-ban térnek el a Nyugat-Magyarországot lefedő gridben. A napi szélesség átlagok statisztikailag télen és nyáron nagyobb, míg tavasszal és ősszel, kisebb hibával becsülhetők.

A mért szélesség tulajdonságainak változása a magassággal. Az OMSZ vezetésével zajlott magyarországi szélenergia-potenciált felmérő kutatás keretében SODAR-ral történtek három helyszínen (Budapest, Paks,



13. ábra: Az évi átlagos szélesség változásának iránya:

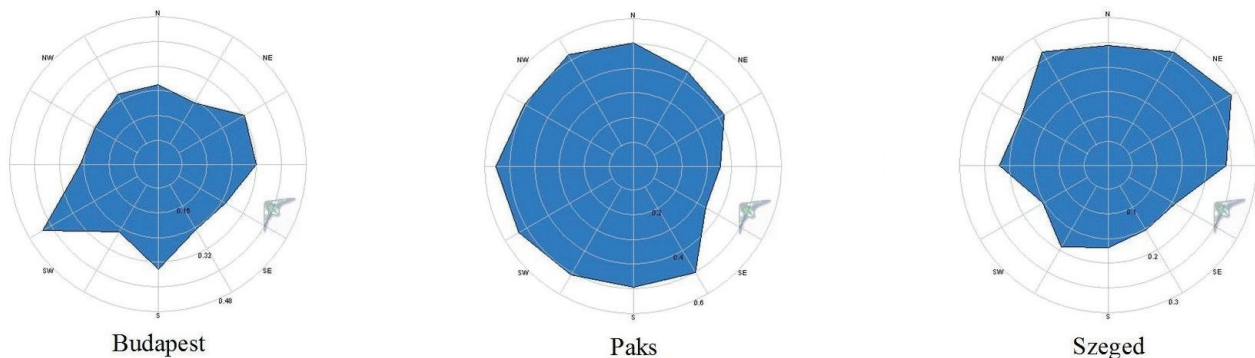
a) 1986–2005 között és b) 1996–2005 között NCEP/NCAR reanalízis alapján

tuk, hogy a mérsékelt éghajlati öv ideális terület a szél energiájának hasznosítására, mert a szélesség évek közötti és éven belüli változékonysága itt a legkisebb. Hazánkban évről évre statisztikailag sokkal pontatlanabban lehet becsülni az évi átlagos szélességet, a légmozgások energiatartalmát, illetve a technikailag kinyerhető hozamokat, mint Dániában, vagy az Ibériai-félszigeten. Ez azt jelenti, hogy hazánkban az 1 éves energetikai szélmérések információtartalma valójában túlságosan kevés annak megítélésére, hogy a tervezett szélenergia mennyi villamos energiát fog évről évre termelni. Az éves szélindex szórása Magyarországon keleti irányban növekszik, így az évi átlagos szélterjedési statisztikailag nagyobb hibával becsülhető hazánk keleti területein. Magyarországon egy éven belül, a havi szélesség változása mérsékelt, mint Dániában, azaz a rendszerirányítónak kisebb havi különbségekre kell számítani. Az extrém szeles hónapok nálunk kevésbé kiugróak a sokévi átlagokhoz viszonyítva. Magyarországi szélviszonyok között egy szélenergia hasznosító berendezés a téli félévben több mint kétszer-háromszor több villamos energiát termelhet, mint nyáron. A hónapokon belüli napi szélességek az 50 évi napi átlagtól mintegy

Szeged) expedíciós szélmérések. Magyarországon a 2003–2004 évi SODAR mérések adatait felhasználva arra a kérdésre kerestük a választ, hogy hogyan változnak a magassággal a szél tulajdonságai, milyen tényezők befolyásolják a szélprofilok irányfüggését az adott megfigyelőhelyeken, illetve hogyan változik a szélesség napi menete különböző magasságban, összefüggésben a magyar villamosenergia-rendszer átlagos terhelésével. Magyarországon 120 m magasságig a leggyakoribb északnyugati szélirányú szelek rendelkeznek a legnagyobb energiatartalommal. Ezen túl a déli, míg az Alföld déli részén az északkeleti szélirányok energiatartalma számottevő. A szélesség gyakorisági eloszlásának közelítésére a gyakorlatban elterjedten a Weibull-eloszlást használják. Ennek 'c' skála és 'k' alakparaméterei a rendelkezésre álló adatbázisból számíthatóak átlag és szórás ismeretében minden magassági szinten. A Weibull-eloszlás 'k' alakparaméterének magassággal történő változására Justus (1985) lineáris összefüggést alkalmazott, míg Wieringa (1986) feltételezte, hogy a 60–80 m magasságban lévő szélnyírási zónaig 'k' értéke növekszik, majd egyre nagyobb magasságban csökken. Budapesten mintegy 180 m magasságig a Weibull-eloszlás $k=2,1$

alakparaméterrel számolva pontosnak adódott. Nagyobb magasságokban a 'k' alakparaméter értéke csökkent. Szegeden és Paks-on a talajhoz közeli rétegben 'k' értéke növekedett, maximumát 60 m-nél vette fel, másodlagos maximumát 90 m magasságban tapasztaltuk. Értéke ezt követően általában csökkent. Paks esetén a hatványkitevős szélprofil összefüggés írta le szinte minden magasságban a legjobban a szélesség magasság szerinti változását, a többi mérőhelyen csak a talaj közelében. Budapesten 60 m, Szegeden 75 m magasság felett a logaritmusos szélprofil összefüggés bizonyult jobb közelítésnek. Az átlagos szélprofil ismeretében meghatároztuk szélirány szektoronként a z_0 érdességi magasságot, illetve a hatványkitevős összefüggés alfa paraméterét, amely a mérőhelyet övező területek érdességének függvényében irányonként is változott (14. ábra). Elemeztük a szélesség napi menetét különböző magasságokban a magyar villamosenergia-rendszer (VER) terhelés napi menetének függvényében. A 3 expedíciós SODAR mérés helyszínén általában csak a talajhoz legközelebbi, 30 és 45 m magasságban mutattunk ki szignifikáns pozitív kapcsolatot, azaz ebben a magasságban a szél sebessége akkor növekedett, amikor a fogyasztói igények is növekedtek. 60–105 m között egyáltalán nincs kimutatható összefüggés. Egyedül

desség által befolyásolt területi képének modellezéséhez egy norvég fejlesztésű szélpark tervező programot, a *WindSim* modellt adaptáltuk. A programcsomag alapját a *PHOENICS* program adja, amely egy 3D Reynolds átlagolású Navier-Stokes egyenlet megoldó alkalmazás (Castro et al., 2003; Lopez et al., 2007). A tömeg-, momentum- és energiacsereit leíró nem-lineáris mozgásegyenleteket a program iterációval közelíti. A moduláris felépítésű modell egy mérési szint szélirány és szélesség eloszlásából kiindulva 200 m magasságig képes szélesség eloszlást szimulálni. A *WindSim* modell adaptációja során két magyarországi helyszínen végeztünk vizsgálatokat. Egyrészt a Hernád-völgyben, ahol Hidasnémeti közelében felállított mérőtorony adataiból kiindulva készítettük el a domborzat által meghatározott szélesség eloszlás térképet 50 m, 80 m és 110 m magasságban (15. ábra). Másrészt Debrecen északi részén SODAR mérések adataiból kiindulva modelleztük a szélesség érdesség által befolyásolt területi képét. A Debreceni Egyetem Agrometeorológiai Observatóriumában 2012 májusában üzemeltünk be egy német gyártmányú (METEK GmbH) PCS.2000-24 típusú Doppler SODAR-t (16. ábra), amely 10–390 m magasság között képes nagy részletességgel a szél tulajdonságait monitorozni.



14. ábra: A hatványkitevő átlagos értéke szélirányonként Budapesten Paks-on és Szegeden 2003–2004-ben expedíciós SODAR mérések alapján

Szegeden volt 120 m felett a negatív kapcsolat szignifikáns. Nagyobb magasságokban tehát a szél általában akkor fúj, amikor nincs jelentős fogyasztói igény. A szélből termelt áram tárolása kulcsfontosságú a villamos energia-rendszer működése szempontjából (Kircsi, 2008).

A szélesség területi modellezése. Egy térség szélviszonyainak mezoskálájú feltárása lehet globális, illetve lokális megközelítésű. A térképezés indulhat numerikus időjárás előrejelző modellek reanalízis után származtatott globális adatbázisából. Ekkor a mezoskálájú széltérkép többlépcsős leskálázási folyamat után készül el (Szépszó et al., 2006). A helyi szélmérések ebben az esetben is nélkülözhetetlenek az ismeretlen szélklíma feltárásához. A helyszíni szélmérések adatait dinamikus vagy CFD modellek segítségével terjeszthetjük ki nagyobb térségre, ezáltal megrajzolhatjuk a felszíni elemek által befolyásolt szélmező földrajzi eloszlását. A szélpotenciál térképezése során egyaránt használunk globális és helyben előállított térinformatikai adatbázisokat, leginkább a domborzat, a felszínt borító érdességi elemek pontosabb leírásához. A szélesség a domborzat és ér-

A debreceni modellezett térképek SODAR adatokkal végzett verifikációja során megállapítottuk, hogy a legpontosabb szélesség eloszlás térképet 90–140 m magasságban készíthetjük a *WindSim* modell segítségével. 50–80 m között 5–15% relatív hibával felülbecsülünk, míg 150–200 m között kb. 5% nagyságrendben alulbecsüljük a szélesség értékét. Legjobb közelítést a valósághoz véleményünk szerint a 100–110 m magassági szintre készített térkép ad, amely valószínűleg annak köszönhető, hogy a szélpark tervező programot az ipari méretű szélturbinák jellemző tengelymagasságnak megfelelő szélviszonyok pontos modellezésére fejlesztették ki.

A szélesség hasznosítás társadalmi vonatkozásai.

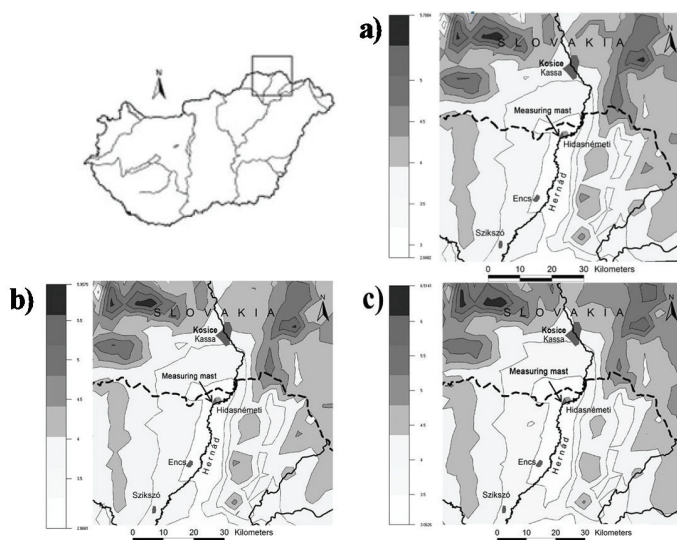
A kutatási terület általános bemutatása, alkalmazott módszerek.

A szélesség hasznosításához kapcsolódó ismeretek vizsgálatának helyszíne a magyarországi Hernád-völgy Kékedtől Zsujtáig terjedő szakasza volt (17. ábra, 7. táblázat). Az érintett terület Magyarország egyik komoly gazdasági gondokkal és társadalmi problémákkal küzdő vidéke. A fálvak szinte mindegyike hátrányos helyzetű települé-

lés, a népesség előregedő korstruktúrával és magas munkanélküliségi rátával rendelkezik. A Hernád-völgyben élők szélenergiával kapcsolatos ismeretének felmérése kérdőíves attitűdvizsgálat keretében, véletlenszerű mintavétel alapján történt. Az egyes települések korcsoport és nem szerinti bontását figyelembe véve, a reprezentativitás biztosítása érdekében a lekérdezés a háztartások 10%-át érintette, ami összesen 1188 darab kérdőíves interjú felvételét jelentette (Tóth, 2013).

A szélenergia ismertsége a Hernád völgyében. A kérdőíves attitűdvizsgálat keretében arra kerestük a választ, hogy a lakosság milyen ismerettel rendelkezik a szélről, mint energiaforrásról. A válaszadók tényleges tudásának minél pontosabb feltárása érdekében a kérdés két részből állt. Egyfelől a megkérdezettek hallottak-e már a szélenergiáról, tehát magát a szót ismerik-e, másfelől a puszta fogalmon kívül rendelkeznek-e ezen túlmenően bármilyen információval. A válaszok hitelessége a szemlélyek önbevallásán alapult, az ismeretek konkrét ellen-

közösségi szintű szélenergetikai beruházások megvalósításához igen fontos a helyi szintű (lakossági, önkormányzati, és helyi vállalkozói) hozzájárulás, ami nemcsak pénzügyi, hanem szellemi és erkölcsi szintű is lehet (Mellár, 2009.) A vizsgált területen a megkérdezettek többsége elfogadhatónak és erkölcsileg támogathatónak tartja a szélerőművek és a kisebb teljesítményű szélgenerátorok, szélmotorok létesítését (18. ábra bal oldali térkép). A támogatás, illetve a tolerancia megléte azért fontos, mert ha az érintett közösség bármilyen energetikai projektet a környezetére, az életminőségére, vagy egészségére nézve károsnak ítél meg, akkor lakossági ellenállás keretében hátráltathatja, vagy meg is akadályozhatja a beruházás megvalósítását (Tóth et al., 2012b). A válaszadók a rendelkezésre álló ismereteik alapján hasonló arányban reálisnak tartják a szélerőgépek és a szélerőművek létesítését saját településükön, ha a tulajdonosi kör, kiváltképp a finanszírozási háttér rendelkezésre áll (18. ábra jobb oldali térkép).



15. ábra: A szélesebesség (ms^{-1}) modellezett térbeli eloszlása a Hernád-völgyben 50 (a), 80 (b) és 110 (c) méter magasságban



16. ábra: A Debreceni Egyetem Agrometeorológiai Observatóriumának műszerkertje

őrzése, felmérése nem történt meg, mivel az nem képezte a kutatás tárgyát. A lekérdezés során, valamint az adatfeldolgozása eredményeiből kitűnt, hogy az egyes településeken a válaszadók tényleges ismereteit a kérdés második felére vonatkozó válaszok képezik le. A Hernád-völgy 21 településén a megkérdezettek döntő hányada, több mint 80%-a hallott a szélenergiáról, azonban az ismeretek terén rendkívüli információhiány tapasztalható. Ez 30 településből mindössze 12-ben haladja meg a 20%-os arányt, tehát a megkérdezettek közel négyötöde számára a szélenergia hasznosítási módjai, eszközei, lehetőségei teljesen ismeretlenek. A szélenergiával kapcsolatos alacsony ismeretek nemcsak azért riasztóak, mert kevesen tudnak róla, hanem mert az önbevalláson nyugvó alapszintű – azaz bármilyen – információ még önmagában nem jelenti, hogy az elegendő lenne bármelyik hasznosítási mód átgondolt eldöntéséhez. A pozitív változások eléréséhez kiemelkedően fontos a társadalmi részvétel, amely azonban sokszor az érintettek alulinformáltsága miatt nem valósul meg (Tóth et al., 2012a). A

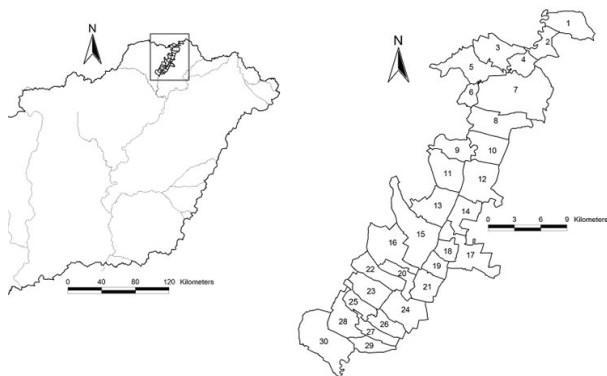
A rendelkezésre álló információ mennyisége és minősége rendkívül fontos. A fenti eredményekből kitűnik, hogy az egyes településeken jórészt nincsenek birtokában a megfelelő ismereteknek, és ily módon érdemben sokszor nem is tudhatnak a hasznosításból fakadó előnyökről és lehetőségekről. Azonban nemcsak a hiány lehet gátló tényező, hanem a kevés és olykor nem teljesen (korrekt) hiteles információ, amely az egyes kérdésekben félreértésekre adhat okot, így emiatt hiúsulhat meg egy fejlesztés vagy beruházás. A lakosság részéről eredményeket csak korrekt, hiteles és teljes körű tájékoztatással lehet elérni (Tóth és Kapocska, 2011). Nemcsak az információ áramlásban, hanem a szélenergetikai beruházások esetében is fontos szerep hárul a települések mindenkor vezetőire is, hiszen a beruházás megkezdésében, illetve kezdeményezésében az első és legfontosabb döntéseket nekik kell meghozniuk. A polgármesterek egy-egy projektípushoz való hozzáállása meghatározhatja a megvalósítás kimenetelét, ami végső soron az emberek jövőjére is hatással lehet (Tóth, 2011).

A tanszék kutatási projektjei és kapcsolatai. Négy fontos szélenergia kutatási projektet emelünk ki. A Meteorológiai Tanszék kutatói 2002–2005 között részt vettek abban az OMSZ által irányított, *Major György* akadémikus nevével fémjelzett kutatási konzorcium munkájában (NKFP-3A/0038/2002), melynek célja az volt, hogy feltérképezze Magyarország légköri eredetű megújuló energiaforrásainak (nap- és szélenergia) potenciálját annak érdekében, hogy ezen energiaforrások felhasználását elősegítse. 2009-ben Tar Károly témavezetésével induló OTKA pályázat keretében a Hernád-völgy nap-, szélenergia és biomassza potenciál meghatározását tűztük ki célul. A 3 éves kutatás során a szélklimatológiai mérésekhez egy 20 m magas szélmérő torony került fel-

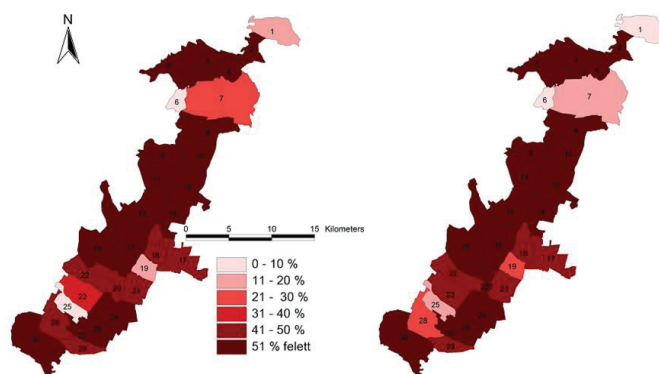
SODAR berendezés került beszerzésre, Nagyváradon (Oradea) és Biharfüreden (Stane de Vale) szónikus szél-méréseket végeztünk. A szélklimatológiai adatbázisok és a modellezési feladatok számítástechnikai igénye miatt a Meteorológiai Tanszék néhány munkatársa 2013. április 1. és 2014. október 31. között bekapcsolódott a Szuper-számítógép, a nemzeti virtuális laboratórium HPC-NVL (TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0010) projekt munkájába. Fenntartható energetika megújuló energiaforrások optimalizált integrálásával (DEnzero) című (TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0041) projekt 2013. január 1. és 2014. december 31. között került megvalósításra, amelynek Éghajlat, városklíma munkacsoport feladatai között szélenergia potenciál vizsgálatok szerepelnek

7. táblázat: A vizsgált települések névjegyzéke.

1. Kéked	7. Gönc	13. Méra	19. Hernádbúd	25. Kiskinizs
2. Abaújvár	8. Göncruszka	14. Hernádcéce	20. Hernádszentandrás	26. Hernádkécs
3. Tornyosné-meti	9. Garadna	15. Encs	21. Pere	27. Nagykinizs
4. Zsujta	10. Vilmány	16. Forró	22. Ináncs	28. Halmaj
5. Hidasnémeti	11. Novajdrány	17. Abaújkér	23. Csobád	29. Szentistvánbaksa
6. Hernádszurdok	12. Vízoly	18. Gibárt	24. Felsődobsza	30. Aszaló



17. ábra: A vizsgált terület települései.



18. ábra. A szél erőművek elfogadottsága (balra) és megvalósíthatósága (jobbra) a Hernád-völgy vizsgált településein.

állításra Hidasnémeti határában. A Meteorológiai Tanszék 2012 áprilisáig egy 2 év időtartamú, részletes önálló szélmérési adatsort állított elő 2 magassági szinten, melynek elemzése mellett térképeztük a szélesebbég térbeli eloszlását. 2011 márciusa és 2012 decembere között került megvalósításra a REGENERG HURO projekt (HURO/0802/083_AF REGENERG), mely során a Nagyvárad Egyetemmel együttműködve a DE Földtudományi és Fizika Intézet munkatársai a megújuló energiaforrások (napenergia, szélenergia, biomassza, geotermikus energia) potenciáljának felmérését végezték Hajdú-Bihar és Bihar megyékben. A szélenergia munkaprogram keretében modern szélmonitorozó rendszerek kiépítésére törekedtünk a projekt vizsgálati területén, mind a magyar, mind a román oldalon. Debrecenben egy

Debrecenben a tetőszint-közeli magasságra. A mérés és modellezés célja, hogy megalapozzák a településeken vagy azok közelében létesítendő kis teljesítményű szélenergia-hasznosító berendezések telepítését. Igazi kihívás az épületek közötti szélesebbég eloszlásának a modellezése, amelyhez egy mikroskálájú modell, az *ENVImet* modell tesztelését végeztük városi mintaterületen.

A Meteorológiai Tanszék külföldi kapcsolatai leginkább közös kutatási programoknak köszönhetőek, így jó kapcsolat alakult ki a Nagyvárad Egyetem Elektromérnöki és Informatikatechnológiai Karával is. A Tanszéknek a 2012–13 tanévtől a Babes-Bolyai Tudományegyetem Földrajz Karával létesült hivatalos ERASMUS kapcsolata, amely a 2014–15 tanévtől az Erasmus+ programban is folytatódik. 2012 óta minden félévben mindkét parter ré-

széről megvalósult az oktatói csere, amely remélhetően a jövőben is folytatódni fog. Jelenlegi terveink között a 2012 óta folyó SODAR mérések folytatása, adatainak klimatológiai elemzése szerepel. Továbbá újabb kutatási pályázatokon, a gyakorlati élet szereplőivel kötött együttműködések létesítésén és fejlesztésén szeretnénk dolgozni. A célunk az, hogy ezen együttműködésekkel, kutatási pályázatokkal fejlesszük saját és hallgatóink tudását és ezzel hozzá tudjunk járulni a hazai klimatológiai kutatásokhoz, a kutatási eredményeink gyakorlati alkalmazásához.

Irodalom

- Castro, F.A., Palma, J. M. L. M. and Lopes, A.S., 2003: Simulation of the Askervein flow. Part 1: Reynolds averaged Navier-Stokes equations (k-epsilon turbulence model). *Boundary-layer Meteorology* 107, 501–530.
- Hunyár, M., Veszprémi, K. és Szépszó, G., 2006: Újdonságok Magyarország szélenergia potenciáljáról. In: *Dobi, I. (szerk): Magyarország szél- és napenergia kutatás eredményei. OMSZ, Budapest, 94–109.*
- Justus, C. G., 1985: Handbook of Applied Meteorology. *John Wiley and Sons.*
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, L. and Iredell, D., 1996: The NCEP/NCAR 40 reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society* 77, 437–471.
- Kircsi, A. és Tar, K., 2008: Profile-tests for utilizing wind energy. *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica* 4, 107–123.
- Kircsi, A., 2008: Climatological aspects of utilization of wind energy. *PhD thesis, University of Debrecen*, pp. 145
- Lopez, A.S., Palma, J.M.L.M. and Castro, F.A., 2007: Simulation of the askervein flow. Part 2: Large-eddy simulations. *Boundary-layer Meteorology* 125, 85–108. DOI: 10.1007/s10546-007-9195-4
- Mellár, T. 2009: A helyi gazdaságok fejlesztése és a tulajdonviszonyok. In: *Kiss, T. és Somogyvári, M. (szerk.) Via Futuri 2009 – Közösségi tulajdonú energiarendszerek. Megújuló Energia Klaszter Egyesület, Pécs, 81–85.*
- Molnár, J. és Tar, K., 2003: Modification of air pressure and wind patterns in the Carpathian Basin. *Acta Geographica ac Geologica et Meteorologica Debrecina* 36, 67–80.
- MTA Energetikai Bizottság, Megújuló Energia Albizottság, 2006: Magyarország megújuló energetikai potenciálja. *Tanulmánykötet.*
- Puskás, J. és Tar, K., 2010: Időjárási frontok a Kárpát-medencében és használatuk az alkalmazott meteorológiában. In: VI. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, *Nyíregyházi Főiskola, Nyíregyháza. 385–388.*
- Puskás, J., Tar, K., Szepesi, J. és Kovács, E., 2014: Statistical Investigation of Subalternation of the Daily Mean Wind Speed on the North-West Region of Carpathian Basin. In: *Kanakidou, M., Mihalopoulos, N. and Nastos, P. (eds): COMECAP 2014 e-book of proceedings* 3, 85–89. ISBN: 978-960-524-430-9
- Szegedi, S. és Bíróné Kircsi, A., 2012: Klimatológiai kutatások a Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszékén. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek – Meteorological Notes of Universities* 24, 93–98.
- Szépszó, G., Horányi, A., Kertész, S. és Lábó, E., 2006: Magyarország szélklimatológia előállítása globális mezők dinamikai leskalázásával. In: *Wantuchné Dobi, I. (szerk): Magyarország szél és napenergia kutatás eredményei. OMSZ*
- Tar, K., 1980: A szélirány időbeli változékonyságának statisztikai vizsgálata. *Időjárás* 88, 151–159.
- Tar, K., 1991a: Magyarország szélklimájának komplex statisztikai elemzése. *Az Országos Meteorológiai Szolgálat Kiadományai* 124. pp. 67. ISBN 963 7702 393
- Tar, K., 1991b: The Concept and the Velocity- and Energy Distribution of Characteristic and Non-Characteristic Wind Directions. *The Int. Journal of Ambient Energy* 12, 95–100.
- Tar, K., 1998a: A magyarországi szélmező statisztikai jellemzői a globális felmelegedéssel összefüggésben. In: *Az éghajlatváltozás és következményei. Meteorológiai Tudományos Napok, 249–258.*
- Tar, K., 1998b: Alteration of the statistical structure of the wind field in Hungary in connection with the climatic change. In: 2nd European Conference on Applied Climatology, *Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Nr. 19, (CD-ROM, ISSN 1016-6254), Vienna, Austria*
- Tar, K., Makra, L., Horváth, Sz., 2000: Some statistical characteristics of the wind energy in Hungary in connection with climatic change. In: 3rd European Conference on Applied Climatology (CD-ROM, ISBN 88-900502-0-9), Pisa, Italy
- Tar, K., Makra, L., Horváth, Sz. and Kircsi, A., 2001a: Temporal change of some statistical characteristics of wind speed in the Great Hungarian Plane. *Theoretical and Applied Climatology* 69, 69–79.
- Tar, K., Makra, L. and Kircsi, A., 2001b: Temporal change of some statistical characteristics of wind speed in Hungary. In: *India, M. B. and Bonillo, D. L. (eds.): Detecting and Modelling Regional Climate Change. Springer-Verlag, 251–262.*
- Tar, K. és Kircsi, A., 2001a: Kísérlet a szélenergia statisztikai becslésére. *Szélenergia konferencia, Gödöllő, 28–34.*
- Tar, K. és Kircsi, A., 2001b: Módszer a napi átlagos fajlagos szélteljesítmény meghatározására. In: *A légköri erőforrások hasznosításának meteorológiai alapjai. Meteorológiai Tudományos Napok, 129–137.*
- Tar, K., Kircsi, A. and Szegedi, S., 2001c: A possible statistical estimation of wind energy. *Proceedings of the European Wind Energy Conference, Copenhagen, Denmark, 886–889.*
- Tar, K., Kircsi, A. and Vágvolgyi, S., 2002: Temporal changes of wind energy in connection with the climatic change. *Proceedings of the Global Windpower Conference and Exhibition, Paris, France, CD-ROM.*
- Tar, K. and Szegedi S., 2003: Relationship between the stability of wind directions and mean wind velocity under various weather conditions. *Időjárás* 107, 213–224.
- Tar, K., Kircsi, A. and Vágvolgyi, S., 2003: Relationship between the energy and the change of direction of the wind. In: *Proceedings CD-ROM 2, European Wind Energy Conference and Exhibition, Madrid, Spain*
- Tar, K. and Verdes, E., 2003: Temporal change of some statistical characteristics of wind direction over Hungary. *Időjárás*, 107, 153–170
- Tar, K., 2004a: A magyarországi szélmező és a nagytérségű légnemzési mező kapcsolatának számszerű jellemzése. In: *A II. Magyar Földrajzi Konferencia absztrakt kötete, pp. 218*
- Tar, K., 2004b: A szélirányonkénti energetikai paraméterek időbeli és területi eltérése Magyarországon. *Földrajzi Értesítő, 54, 219–233.*
- Tar, K., 2004c: Becslési módszerek a magyarországi szélenergia potenciál meghatározására. *Magyar Energetika*, 12, 37–48.
- Tar, K., 2004d: Empirikus szélprofil törvények energetikai célú vizsgálata. In: *III. Természet-, műszaki- és gazdaságtudományok alkalmazása nemzetközi konferencia, Szombathely, CD-ROM.*
- Tar, K. Baros, Z. and Szegedi, S., 2005: Stability of wind direction under various weather conditions during the growing season. 17th International Congress of Biometeorology. *Deutscher Wetterdienst. Annalen der Meteorologie* 41, 86–89.

- Tar, K., 2006a: A szeles napok statisztikai szerkezete Magyarországon. In: Táj, környezet és társadalom. *Ünnepi tanulmányok Keveiné Bárány Ilona professzor asszony tiszteletére*. Szeged, 687–696.
- Tar, K., 2006b: A szeles napok statisztikai szerkezetének kapcsolata az időjárási helyzetekkel. In: Földrajzi tanulmányok dr. Lóki József tiszteletére. *Debrecen*, 210–221.
- Tar, K., 2006c: Módszer a szélenergia napi menetének jellemzésére. In: Magyarországi szél- és napenergia kutatás eredményei. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, 54–70.
- Tar, K., 2007: A magyarországi szélmező és a nagytérségű légnemzési mező kapcsolatának számszerű jellemzése. In: Tanár úrnak tisztelettel. 56 tanulmány Dr. Korompai Gábor 70. születésnapjára. *Kossuth Egyetemi Kiadó*, Debrecen, 189–198.
- Tar, K., Maghiar, T., Bondor, K. and Szegedi, S., 2007: Statistical estimation of diurnal average potential windpower. In: Proceedings of the 9th International Conference on Engineering of Modern Electric System, *Oradea*, Romania, 86–90.
- Tar, K., 2008a: Energetic characterization of near surface windfield in Hungary. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 250–264. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.007
- Tar, K., 2008b: Some statistical characteristics of monthly average wind speed at various heights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 1712–1724. DOI: 10.1016/j.rser.2007.01.14.
- Tar, K., Tóth T. és Rózsavölgyi, K., 2008a: A potenciális szélenergia mennyiségének összefüggése a szeles napok számával. In: IV. Magyar Földrajzi Konferencia, *Debrecen* 196–204. ISBN 978-06-6004-4
- Tar, K., Tóth, T. and Rózsavölgyi, K., 2008b: Connection between the potential wind energy and the windy days. *Acta Geographica Debrecina Landscape & Environment Series* 2(1), 6–24., <http://geo.science.unideb.hu/acta.html>
- Tar, K., Kircsi, A., Szegedi, S., Makra, L. and Puskás, J., 2008: Energetic wind profile examinations in Hungary. In: Proceedings of 9th Conference of meteorology, climatology and atmospheric physics, Thessaloniki, 781–788.
- Tar, K. and Szegedi, S., 2009: Alteration of potential wind energy with height and parts of the day. *Journal of Electrical and Electronics Engineering* 2, 206–210.
- Tar, K. és Puskás, J., 2010a: Fronts and winds in Hungary. In: 10th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics, Patras, Greece, *Conference Proceedings*, 435–443. www.comecap10.upatras.gr
- Tar, K. és Puskás, J., 2010b: A napi átlagos szélesség megváltozásának kapcsolata az időjárási helyzetekkel. *Magyar Energetika* 17, 30–35.
- Tar, K. és Puskás, J., 2010c: A napi átlagos szélesség időbeli megváltozásának függése a frontos és front nélküli napok váltakozásától. In: VI. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia. *Nyíregyházi Főiskola*, Nyíregyháza, 321–326.
- Tar, K., 2010: Becslési módszerek a magyarországi szélenergia-potenciál meghatározására. In: Földrajzi szemelvények határok nélkül. *MTA Pécs*, Budapest, *Safarik Egyetem*, Kassa 49–53.
- Tar, K., Farkas, I. és Rózsavölgyi, K., 2011: Climatic conditions for operation of wind turbines in Hungary. *Renewable Energy* 36, 510–518. DOI: 10.1016/j.renene.2010.06.034.
- Tar, K. és Szegedi, S., 2011: A statistical model for estimating electricity produced by wind energy. *Renewable Energy* 36, 823–828. DOI: 10.1016/j.renene.2010.06.032.
- Tar, K., 2012: A szélenergia magyarországi hasznosításának reális lehetőségei. *Magyar Energetika* 19, 2–6.
- Tar, K. és Tömöri, M., 2013: Realistic Potentials of Wind Energy Utilisation in Hungary. In: *Bokor, L., Csapó, J., Szelesi, T. and Wilhelm, Z. (eds.): Locality and the Energy Resources. Geographical Locality Studies* 1(1). *Frugeo Geography Research Initiative*, Shrewsbury. 150–165.
- Tar, K., 2013a: Energetic Parameters of the Wind Directions. In: *Bokor, L., Csapó, J., Szelesi, T. and Wilhelm, Z. (eds.): Locality and the Energy Resources. Geographical Locality Studies* 1(1). *Frugeo Geography Research Initiative*, Shrewsbury. 132–149.
- Tar, K., 2013b: Methods for investigating the statistical structure of the surface layer wind field – taking Hungary as an example. In: *Méndez-Vilas, A. (ed.): Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments. Formatex Research Center* 545–558. ISBN-13: 978-84-939843-7-3
- Tar, K., 2014a: A napi átlagos szélességek egymásra következtetésének statisztikai elemzése az Alföldön. In: Fazekas, I. és Szabó, V. (szerk.): *Környezettudatos energiatermelés és –felhasználás. Meridián Alapítvány* 96–105. ISBN 978-963-7064-31-9
- Tar, K., 2014b: Statistical structure of the surface layer wind field in Hungary. Direction, speed and energy of the wind. *Lambert Academic Publishing*, pp. 88. ISBN: 978-3-8484-0139-0,
- Tóth, T., 2011 A megújuló energiaforrások hasznosításának feltételei a Hernád völgyében. In: *Frisnyák, S. és Gál, A. (szerk.): A magyarországi Hernád-völgy. Földrajzi tanulmányok*. Nyíregyháza–Szerencs 267–276.
- Tóth, T. és Kapocskai, L., 2011 A megújuló energiaforrások ismertségének és alkalmazásának jelenlegi helyzete a Hernád-völgy hátrányos helyzetű településein. In: *Szabó, V. és Fazekas, I. (szerk.): Környezettudatos energiatermelés és –felhasználás*. Debrecen, 264–69.
- Tóth, T., Szalontai, L., Spéder, F. és Vass, R., 2012a A biomassza hasznosításának társadalmi megítélése a Hernád völgyében. – In: *Lázár I. (szerk.): A megújuló energiaforrások hasznosításának természeti, társadalmi és gazdasági lehetőségei a Hernád-völgyben. Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszék*, Debrecen 61–72.
- Tóth, T., Tar, K. és Kapocskai, L., 2012b: A szélenergia hasznosítás természeti háttere és társadalmi támogatottsága a Hernád-völgyében. In: *Társadalmi kihívások a XXI. század Kelet-Közép-Európájában. Nemzetközi földrajzi konferencia*, Beregszász. 190–198.
- Tóth, T., 2013 A megújuló energiaforrások társadalmi háttérvizsgálata a Hernád-völgy településein, különös tekintettel a dendromassza-alapú közösség hőenergia-termelésre. Doktori (PhD) értekezés. *DE. Debrecen*. pp. 163
- Wieringa, J., 1986: Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages. *Quart. Journal of Royal Met. Soc.* 112, 867–889.
- www.msztet.hu: a Magyar Szélenergia Társaság honlapja
www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html