

SZENT ISTVÁN EGYETEM

ENERGIA CÉLÚ SZÉLMÉRÉS
Doktori értekezés

Tóth Gábor

Gödöllő
2005.

A doktori iskola

Megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

Tudományága: Agrárműszaki tudományok

Vezetője: Dr. Szendrő Péter egyetemi tanár,
mezőgazdasági tudományok doktora
SZIE Gödöllő, Gépészmérnöki Kar

Témavezető: Dr. Barótfi István egyetemi tanár,
mezőgazdasági tudomány kandidátusa
SZIE Gödöllő, Gépészmérnöki Kar

.....
A programvezető
jóváhagyása

.....
A témavezető
jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	9
2. Irodalmi áttekintés	13
2.1 Közvetlen motivációk a megújuló energiaforrások felhasználására...	13
2.1.1 A megújuló energiafelhasználás Magyarországon	14
2.2 A szélenergiáról általában.....	15
2.2.1 Szélenergia potenciál.....	15
2.2.2 Előzmények, helyzetértékelés.....	16
2.2.3 Nemzetközi áttekintés.....	17
2.2.4 A hazai szélklíma.....	19
2.2.5 Szélerőművek tervezése, telepítése.....	22
2.2.5.1 Szélerőművek tervezésének kérdései.....	22
2.2.5.2 Egyéb korlátozó tényezők.....	23
2.2.5.3 Általános megfontolások.....	24
2.2.5.4 Szélerőművek környezeti hatásai.....	25
2.2.5.5 Vizuális hatás.....	26
2.2.5.6 A zajhatás.....	28
2.2.5.7 Elektromágneses zavarás.....	30
2.2.5.8 Hatás a madarakra.....	30
2.2.5.9 Egyéb környezeti hatások.....	31
2.2.5.10 Környezeti hatások összefoglalás.....	32
2.2.5.11 Környezeti megfontolások.....	32
2.2.5.12 A szélgenerátorok terület igénye.....	33
2.3 A szél energetikai célú jellemzése, a szél jellemzői	34
2.3.1 A szélerő	34
2.3.2 A globális széljárás.....	34
2.3.3 A szél struktúrája.....	36
2.3.4 A földi határréteg.....	36

2.3.5	A szél változásai	37
2.3.6	A szél időbeni változásnak jellemzői	38
2.3.7	A szél változás a magasság függvényében	40
2.3.8	Atmoszferikus turbulencia.....	44
2.3.9	A földfelszíni változások hatása	45
2.3.10	Változások az atmoszferikus stabilitásban	46
2.3.11	Akadályok az áramlás útjában	47
2.3.11.1	Dombok és hegyek.....	47
2.3.11.2	Épületek és egyéb akadályok.....	50
2.3.12	Helyi hőmérsékletingadozások	50
3	Anyag és módszer.....	53
3.1	A mérés és kiértékelés során alkalmazott összefüggések	53
3.1.1	A szél mozgási energiája	53
3.1.2	A szél dinamikus energiaegyenlete	55
3.2	A szélenergia-potenciál meghatározása helyszíni mérésekkel	56
3.2.3	Mérési adatok gyűjtése	56
3.2.4	Mérőműszerek	60
3.2.4.1	Szélzászlók.....	60
3.2.4.2	Nyomólapos szélmérők.....	60
3.2.4.3	Rotációs szélssebesség érzékelők.....	61
3.2.4.4	Akusztikus szélmérő	63
3.3	A mérési eredmények elemzése	65
3.3.1	Éves mérés adatainak kiértékelés	71
3.4	Szélenergia-potenciál meghatározása modellezéssel.....	79
3.4.1	Fizikai modellezés	79
3.4.2	Numerikus modellezés.....	80
3.4.3	NOABL.....	81
3.4.4	WAsP.....	82
3.5	Magyarországi modellezések	84

4.	Eredmények.....	87
4.1	A mérési helyek	87
4.2	Szélesség, szélprofil.....	91
4.3	A hazai helyzet értékelése a végzett mérések alapján.....	100
4.4	A hazai szélérőművek megfigyelésével szerzett tapasztalatok.....	102
4.5	Hosszabb távú mérések elemzése, felhasználása	108
4.6	A szél jellemzése a generátorok szempontjából.....	110
4.7	Új tudományos eredmények.....	123
5.	Következtetések és javaslatok	125
6.	Összefoglalás	127
7.	Melléletek	129
7.1	Irodalomjegyzék.....	129
7.2	Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk.....	132
7.3-7.21	Egyéb melléletek	136

1. BEVEZETÉS

A téma jelentősége

Beszélhetünk az energia pazarló fogyasztásáról, a rendelkezésre álló források szűkösségéről, a globális felmelegedés és a környezet szennyezésének problémáiról, azonban a trendek jól követhetők: mind a fejlett iparú országokban, mind a feltörekvő régiókban a gazdasági növekedés és a gazdagodás egyértelműen magával hozza az energiafogyasztás növekedését. Tüzelőanyagról, infrastruktúráról, energiatermelő létesítményekről kell gondoskodni.

Szembe kell néznünk azzal, hogy energiafelhasználásunk rohamosan növekszik, míg a hagyományos fosszilis tüzelőanyag (szén, kőolaj, földgáz) és az urán bázisú hasadó nukleáris üzemanyag (elsősorban a szaporító reaktorokat a nukleáris fegyverek elterjedését megakadályozandó nemzetközi tiltás miatt) energia készletünk véges, területi eloszlása egyenetlen (az energiahordozó vagyon zöme kevés országra korlátozódik), és kinyerését állandó politikai és fegyveres konfliktusok akadályozzák, ebből adódóan árak folyamatosan növekedni fog.

Az emberiség már szerte a világon felismerte, hogy a növekvő energiafogyasztás egyre jobban terheli földünket. Jelenleg az energiatermelés és fogyasztás a leginkább környezetszennyező emberi tevékenység. Az energiaigényes ágazatok fejlődése-a légkört, a vízbázisokat és a talajt növekvő mértékben szennyezi és hozzájárul a föld globális felmelegedéséhez. Ezért az ENSZ tagországai Kiotóban 1997-ben szerződést írtak alá arról, hogy mindent megtesznek a környezeti terhelés növekedésének megállításáért, a szennyező tevékenység visszaszorításáért. Magyarországra vonatkozóan az EU részéről a tárgyalásokat követően a megújuló energiával termelt villamos energia részarány növelésére 3,6%-os részarány-elvárás alakult ki, mely jelenleg csak 0,5%.

2010 után 4-6 ezer megawatt kapacitású új erőmű-teljesítmény kiépítését kell megvalósítani, mivel addigra több elavult erőművet be kell zárni, miközben folyamatosan növekszik a villamos energia iránti igény. Az áramszükségletek kielégítését pedig a későbbiekben sem szabad csak az import energia behozatalra alapozni, a hazai és a környező országok hálózatának határkeresztező kapacitása így a behozatal is korlátos. Emellett nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy nem célszerű ha hazánk túlzott mértékben függ a külföldi importált villamos energiától. Hazai szakemberek szerint nem csak fent kell tartani a hazai erőmű kapacitást, ezek további fejlesztése javasolt.

A közhiedelemmel ellentétben a villamos energia szállítása igen drága. Ennek okai az átviteli hálózatok magas beruházási költségei, létesítésük hosszú átfutási ideje és a szállítás magas energiavesztése. Ezért a villamos energia nemzetközi kereskedelme más áruajtákhöz viszonyítva igen alacsony volumenű és kis távolságon jellemző.

A megújuló energiaforrások hasznosítása ma már a világ számos országában versenyképesé vált, mivel a hagyományos energiahordozó készletek fogyása, a mezők kimerülése következtében ezek árai folyamatosan emelkednek, főleg ezek import árai.

Az utóbbi időben történt - feltételezett szélturbina telepítési helyen és magasságban végezett - szélmérések azt mutatták, hogy Magyarországon is lehetséges nagyteljesítményű, villamos energiát hálózatra tápláló szélérőműveket telepíteni. Jelenleg 6db ilyen szélgenerátor üzemel Magyarországon, melyek összesen évi közel 6MWh környezetbarát villamos energiát termelnek. A viszonylag rövid idő alatt szerzett tapasztalatok azt támasztják alá, hogy további hasonló méretű szélturbinák telepítésére van lehetőség és igény.

Jelenleg még nem végleges az országos szélenergia térkép, így csak a meteorológiai szélmérések, vagy helyi szélenergia mérések alapján lehet meghatározni, hogy hova lehet vagy érdemes szélturbinát telepíteni.

A kitűzött célok

A disszertáció célja, a több éves és több helyen végzett szélmérések adatainak számítógépes elemzésén keresztül az eddigi tapasztalatok bemutatása, a szélenergia hazai kihasználás létjogosultságának alátámasztása.

A hazai szélviszonyok bemutatása, az adatok kiértékelése után a hazai specifikumok bemutatása, ajánlások készítése a mérés helyének kiválasztásának módszerére, a kiértékelés során elvégzendő feladatokra.

A mért adatok energetikai célú elemzése, hazai széljárások jellemzése, súrlódási tényező jellemzése. Ezek alapján ajánlás a hazai domborzati és széljárásnak viszonyok között legalkalmasabb szélérőmű típusokra.

A megoldandó feladatok ismertetése

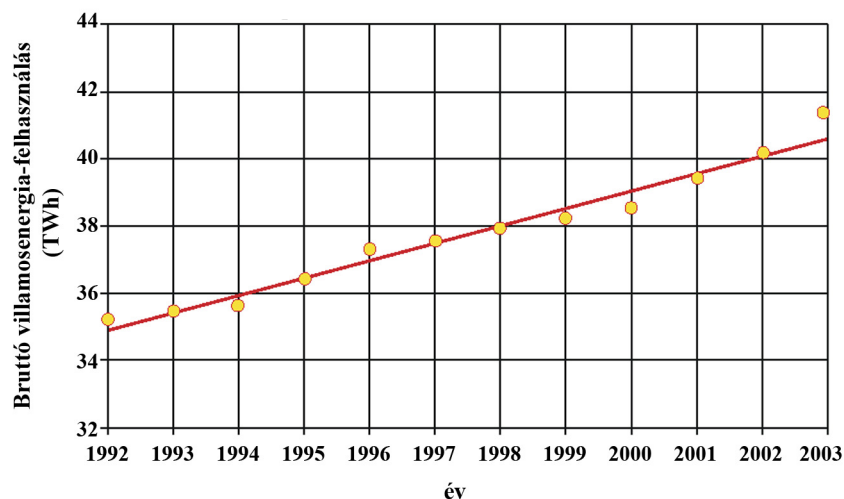
- A kapcsolódó irodalom feldolgozása, ezen belül is fókuszálva a téma aktualitására, majd a kapcsolódó fogalmak összefoglalására.
- A hazai szélméreés adatainak gyűjtése, értelmezése.
- A gyűjtött adathalmaz feldolgozási módszerének kidolgozása, szem előtt tartva a nemzetközi viszonylatban elfogadott és megkövetelt mutatószámokat.
- A módszertan ismertetése.
- Energia célú szélmérések helykiválasztási módszerének kidolgozása.
- Az energetikai szélmérések csoportosítása.
- Az energetikai széléréseknél alkalmazott tornyok jellemzése, csoportosítása.
- Hazai szélviszonyok jellemzése a mért adatok alapján.
- A jellemező súrlódási tényezők meghatározása, ebből a szélviszonyok jellemzése.
- A súrlódási tényező napszakonkénti és évszakonkénti változásának vizsgálata.
- A súrlódási tényező magasságtól való függésének vizsgálata.
- Ajánlás a súrlódási tényező meghatározására.
- Ajánlás a hazai szélviszonyoknak megfelelő szélgéptípusok kiválasztására.
- Ajánlás a hazai energia célú szélmérések során szükséges vizsgálatokra.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 Közvetlen motivációk a megújuló energiaforrások felhasználására

Várhatóan a következő évtizedekben, s talán az egész évszázadban többféle aspektusból is a műszaki fejlesztés meghatározó területe lesz az energiatermelés és az energiagazdálkodás. Folyamatosan növekvő energia felhasználásunk (2.1 ábra) mind a fogyasztói, mind a termelői oldalról (2.1 táblázat) a szakembereket újabb kérdések elé állították. Egy fontos kihívás már napjainkban is megjelent, a magyar energiagazdálkodási szektor előtt. Ennek bemutatása előtt szólni kell arról a tényről, amelyet több szakember, gazdaságpolitikus is leírt, miszerint a magyar energia felhasználás összetétele, struktúráját tekintve előnytelen.

Hazánkban túlságosan nagy szerep jut a földgáznak, amely várhatóan a következő évtizedekben a leginkább keresett és legnagyobb költséget jelentő energiatermelési ágazat lesz, vagyis ez a helyzet hosszútávon nem lesz fenntartható.



2.1 ábra Országos összes villamosenergia-felhasználás alakulása
(Forrás: MVM közlemény)

Az Európai Unió - a már ismert és sokat emlegetett környezeti okok miatt - a megújuló energiaforrásokat jelentős mértékben támogatja, s a létesítéseket előnyben részesíti, amelynek kifejezést ad a különféle kutatási és fejlesztési pályázatokban is.

Az EU Magyarország megújuló forrásokból termelt villamos energia arányát 2010-re 11,5%-ban határozza meg. Mivel ez teljesíthetetlen - számításokkal alátámasztott egyeztetések után – a 2001/77/EK Irányelve alapján a megújulókból termelt villamos energia jelenlegi 0,9%-os arányának növelését 2010-re 3,6 %-ra határozta meg.

2.1 táblázat Villamos energiatermelés forrásoldalon 2003-ben (MVM közlemény)

	2003. [TWh]	Megoszlás [%]
Összes villamos energia felhasználás	41,09	100
Import szaldó	6,93	16,9
Atom	11,01	26,8
Szénhidrogén tüzelésű erőműből	13,54	33,0
Szén tüzelésű erőműből	9,16	22,3
Nem közcélú és vízi erőmű	0,45	1,1

Kérdés, hogy 2010-ig, mely lehetőségek állnak rendelkezésünkre, ha ezt az arányt teljesíteni kívánjuk. Nem célszerű egy olyan előnytelen helyzetbe kényszerülni, hogy a megújuló energia mennyiségét - ami feltehetően drágább lesz, mint a hazai - importból kelljen biztosítani. Ebből következik, ha a megújuló energiaforrások felhasználása területén nem váltunk koncepciót, úgy a helyzetünk hosszú távon még inkább súlyosbodik, hiszen a valós elvárás az Európai Unió a tagjainál 2010-ig 12%, s 2020-ra átlagosan a 20%-ot irányoz elő. Egyes országoknál az elvárás teljesítése nem okoz gondot, hiszen jelenleg is igen magas a megújuló energiák felhasználása. Így van pl. a szomszédos Ausztriában is, ahol a villamos energiának már jelenleg is 37-38%-át a megújuló energiaforrások adják a meglévő vízi erőművek révén, miközben a magyar határ közelében - Neusiedler térségében - 200 MW teljesítményű szél erőmű parkot létesítenek, amelyből 2004-ben már 110 MW-ot üzembe is állítottak.

2.1.1 A megújuló energiafelhasználás Magyarországon

Magyarországon az elmúlt időszakban sok szó esett a megújuló energiákról (a környezettel foglalkozó, a gazdaságpolitikai, a népszerű tudományos és a tudományos szakajtóban is), azok fontosságáról, a környezet megóvása, s a fentebb említett elvárások teljesítése nézőpontjából. Ma az egész energia előállító iparág ún. energiaadót (környezetszennyezési bírságot) fizet, mivel a fosszilis energiával működő erőműveink kibocsátása széndioxidból és egyéb káros anyagokból egyértelmű. Közvetlenül legkevésbé károsító a nukleáris kapacitásunk, de az energiaadó rá is vonatkozik. Nyilvánvaló, hogy az itt befolyó összegeknek a költségvetésben számos helye van, de fordítható lenne a környezetszennyezés mérséklésére is, pl. megfelelő támogatási rendszerrel a szükséges megújuló energia kapacitás létrehozására. Számptalan közlemény jelenik meg (Internet, szaklapok, stb.) meg a megújuló energia forrásaink felhasználásáról, annak összetételéről. Amiről jelenleg szó van, az a villamos energia előállításra vonatkozó szekundér oldali kapacitásokat illeti. Ezzel kapcsolatban meg kell vizsgálni, hogy az említett 3,6 % eléréséhez mik a lehetőségeink [Tóth P. 2003]

2.2. táblázat A megújuló energiaforrások felhasználás alakulása 2003-ben (GKM)

Megújuló energiafajta	Villamosenergia-termelés		Hőhasznosítás
	GWh	TJ/év	TJ/év
Víz energia	194,7	701	
Szél energia	6		
Geotermikus			3600
Napkollektor			56
Fotovillamos	0,06	0,3	
Tűzifa	96,9	966	24000
Egyéb szilárd hulladék			3000
Szemételepi biogáz	2	20	12
Települési szennyvíz gáz	11,2	112	120
Hőszivattyú			40
Egyéb növényi hull			3870
Szemétegetés	58,2	582	480

Az 2.2. táblázat adataiból kiolvasható, hogy magyarországi viszonylatban az összes megújuló energia-felhasználás közel 70 %-át a tűzifa jelenti. A geotermikus a 10,2 %-ot, a vízenergia 3,0 %-ot, a növényi és egyéb szilárd hulladékok 11,3 %-ot, a hasznosított napenergia 0,2 %-ot tesz ki az összes felhasználáson belül. A szemételepi, valamint a települési szennyvizekből nyert biogázból és a kommunális szemétegetésből 2,8 % származik.

2.2 A szélenergiáról általában

2.2.1 Szélenergia potenciál

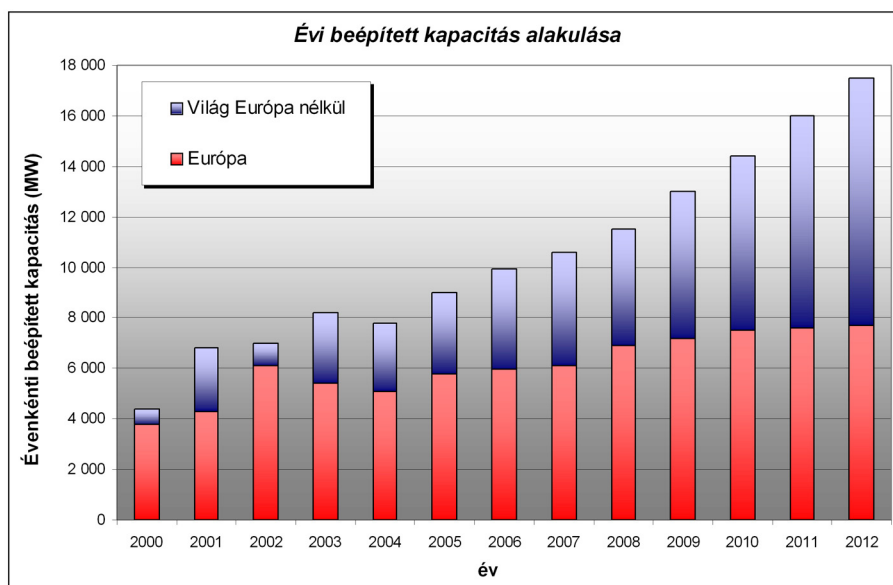
Földünkre egyetlen nap alatt 500 ezer TWh villamos energiával egyenértékű szélenergia jut. Ennek a becsült mennyiségnek mintegy 2%-a; azaz 10 000 TWh nagyságrendű energia hasznosítható a jelenlegi technológiákkal. Magyarországon földrajzi és klimatikai adottságaink függvényében a „befogható” fajlagos évi szélteljesítmény 900–365 kWh/m² között változik [GKM-PYLON, 2004].

2.2.2 Előzmények, helyzetértékelés

A több ezer éves hagyományokkal rendelkező szélenergia végnapjait élte a XX. század közepe táján, hiszen nem volt jelentős energiahiány a Föld fejlett országai-ban. A szélenergia ekkor relatíve drága, gyenge hatásfokú és csak időszakosan ki-nyerhető erőforrásnak számított. Ezért a fosszilis tüzelőanyagok, valamint az atom-energia átmenetileg háttérbe szorította a szélenergia hasznosítását. Az 1970-es évek sokkoló olaj-válsága, majd a rákövetkező évtizedekben a globális melegedés prob-lémája azonban újra a szél – mint megújuló energiaforrás – felé fordította a kuta-tók, a fejlesztők és a közvélemény figyelmét. Eddig soha nem tapasztalt ütemű fej-lődés indult meg, s önálló iparággá nőtte ki magát a mind hatékonyabb szélerőmű-vek tervezése, gyártása, karbantartása.

Az elmúlt évtizedben minden eddiginél nagyobb mértékben megnőtt, 1997 és 2002 között pedig megnégyszereződött a hasznosított szélenergia mennyisége Európában és az egész világon egyaránt. Az AWEA-EWEA gyorsjelentése a beépített telje-sítményt 2002 végén a világ egészét illetően kerekén 31 ezer MW-ra becsülte, ezen belül az EU országokra 23 ezer MW-ot jelzett. Magyarország a 2002 évi nemzet-közi statisztikákban először jelent meg prognosztizált 2 MW beépített teljesítmény-nel. [EWEA, 1999]

A szélenergetikai beruházási piac világszinten 28%-kal nőtt, számszerűen 6,8 mil-liárd Euró értékű volt. Ebből az Európai piac 5,8 milliárd Euróval részesült. A 2002 évi beruházások összesen 5871 MW beépített teljesítményt jelentenek (2.2 ábra).



2.2 ábra Szélerőművek beépített kapacitásának alakulása
(Forrás: EWEA)

A szélparkok által termelt villamos energia előállítási költsége az elmúlt években olyan szintre csökkent, hogy napjainkban már versenyképes számos hagyományos energiahordozóval.

Az Európai Unióban megfogalmazott célkitűzések közismertek, ennek megfelelően az elmúlt években a csatlakozó országokban – így nálunk is – az energiapolitika növekvő súllyal támogatja a megújuló energiaforrások hasznosítását, ezen belül a szélergia hasznosításnak is teret ad.

2.2.3 Nemzetközi áttekintés

Az utóbbi 10 évben e területen látható világviszonylatban is (önmagában csak az iparfejlesztést tekintve is) a legnagyobb fejlődés, mind az erőművek műszaki színvonalát, mind az előállított villamos energia volumenét tekintve is. Iparfejlesztési szakemberek szerint az utóbbi 10 év legdinamikusabban fejlődő iparága, ami a prognózisok szerint még hosszabb távon is változatlan marad (2.3-2.5 táblázatok). A leglátványosabb fejlődés Európában, közelebbről Spanyolországban zajlott le, ahol az utóbbi 5 évben az évi növekedés nagyobb volt 40 %-nál [EWEA, 2004]

2.3 táblázat A szélergia felhasználás növekedése 2004. évben a meghatározó kapacitást növelő országokban (Forrás: EWEA)

Ország	Beépített kapacitás 2004 (MW)	Növekedési ráta 2004 (%)	Összes kapacitás 2004 végén (MW)
Németország	2019,7	13,8	16 628,8
Spanyolország	2061,0	33,2	8 263,0
USA	370	5,8	6 740,0
Dánia	7	0,2	3 117,0
India	875	41,5	2 985,0
Olaszország	221,0	24,4	1 125,0
Hollandia	170,0	18,7	1 078,0
Anglia	240,0	37,0	888,0
Japán	390,2	77,1	896,2
Kína	197,0	34,7	764,0
Világ összesen	8 321	21,2	47 616,4

Európában ma Németország rendelkezik a legnagyobb szélerőmű parkkal, de a fejlődés ott is sok vonatkozásban kritizálható. Sok szélerőmű park létesült úgy, hogy azok a környezeti, s a lakossági elvárásoknak nem minden tekintetben felelnek meg. Spanyolországban a fejlesztéseket később kezdték, a szélparkokat átgondoltabban telepítették [EWEA, 1999]

Sok szakember – néha feltehetően „lobbi okok” miatt - kijelenti, hogy Magyarország nem tartozik azon országok közé, ahol a szélenergiát hasznosítani lehetne. Szélenergiában nem vagyunk gazdagok, ez tény, ezen kár is vitatkozni. Egyértelmű, hogy a tőlünk északra lévő országokban a széles tengerpartok szélben gazdagok, s ezért ott fajlagosan az energia előállítás nyilván olcsóbb is. Tudomásul kell venni, hogy ezek a helyek korlátozottak. Ezen helyekről az energia elszállításának a szállítási veszteségekből adódó költségei miatt az ár már közel azonos lesz, mint a helyi előállításé, ahol a kinyerhető energia mennyiség ugyan kisebb, így a fajlagos beruházás látszólag magasabb. Az off-shore létesítések (sekély tengerparti vizekben) igen költségigényesek, mivel olyan konstrukciók szükségesek, amelyek az ott uralkodó extrém környezeti viszonyokat is képesek elviselni. Ilyen például a víz alatti alapozás speciális anyagokkal, a sós tengervíz miatti fokozott korrózió védelem, a viharos szelek miatti masszívabb lapátok és torony, speciális kábelezés az energia elvezetéséhez, stb. [Tóth L. et al. 1998].

Jelenleg a szél erőművek közel 60%-a kontinensek belsejében létesül, ez figyelhető meg Európában is, de az utóbbi időben az Egyesült Államokra is ez a jellemző.

2.4.táblázat A szélenergia évi változási trendje 12 %-os szélenergia részesedés esetén 2020-ig (Forrás: EWEA)

Év	Évi átlagos növekedés (%)	Évente beépített teljesítmény (MW)	Összes új teljesítmény (MW)	Évi energia-termelés (TWh)	A világ tervezett villamos energia igénye (TWh)	Szélenergia részesedése a villamos energia igényéből (%)
2002	25	7227	32037	64,5	16233	0,40
2003	25	9034	41071	86,3	16666	0,52
2004	25	11292	52363	110,1	17110	0,64
2005	25	14115	66478	139,8	17567	0,80
2006	25	17644	84122	184,2	18035	1,02
2007	25	22055	106177	232,5	18156	1,26
2008	25	27569	133746	292,9	19010	1,54
2009	20	33083	166829	365,4	19517	1,87
2010	20	39699	206528	452,3	20037	2,26
2015	15	94668	556922	1366,0	22639	6,03
2020	0	151490	1231687	3021,1	25578	11,81

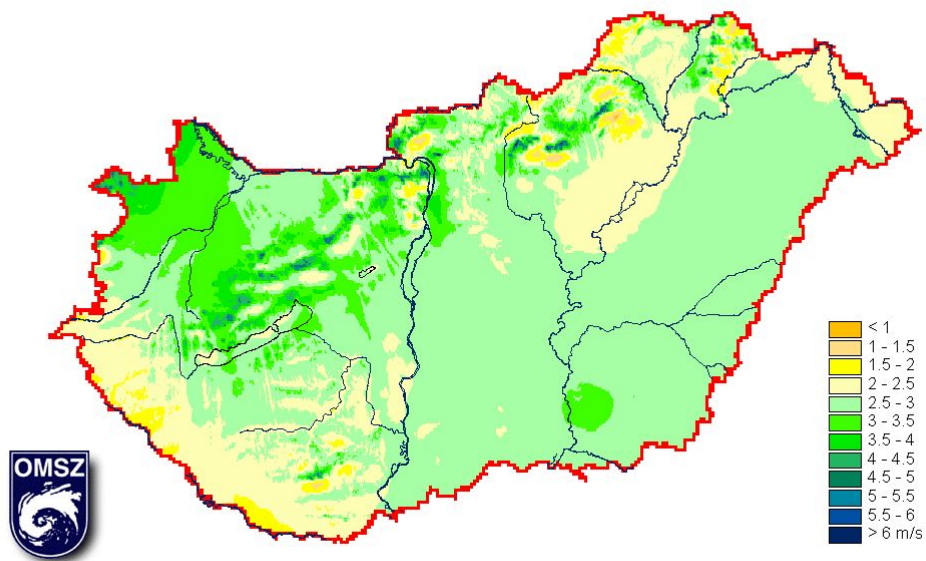
2.5. táblázat Régiók szerinti a villamos energiatermelés szélből, az összes beruházás, CO₂ csökkenés (Forrás: EWEA)

Régió	Beépített teljesítmény 2020-ig (GW)	Évi villamos energiatermelés szélenergiából (TWh/év)	Szélenergia részesedése az összes villamos energiából 2020-ban (%)	Összes beruházás (Milliárd Euro)	Évi CO ₂ csökkenés (millió t/év)
OECD Európa	230	564,0	13	129,9	338,4
OECD Észak-Amerika	310	760,1	11,3	175,2	456,1
USA	(250)	(613,0)	13)	(140,2)	(367,8)
OECD Szigetvilág	90	220,7	9,5	50,8	132,4
Latin-Amerika	100	245,2	15,7	61,0	147,1
Kelet-Ázsia	70	171,7	11,7	42,7	133,9
Dél-Ázsia	50	122,6	8,1	30,8	95,6
Kína	170	416,9	12	104,7	325,2
Közép-Kelet	25	61,3	6,8	13,5	36,8
Egyéb	130	318,9	14,2	78,0	229,6
Afrika	25	61,3	5,6	15,0	36,8
Világ összesen:	1200	3021,1	11,61	702,6	1931,9

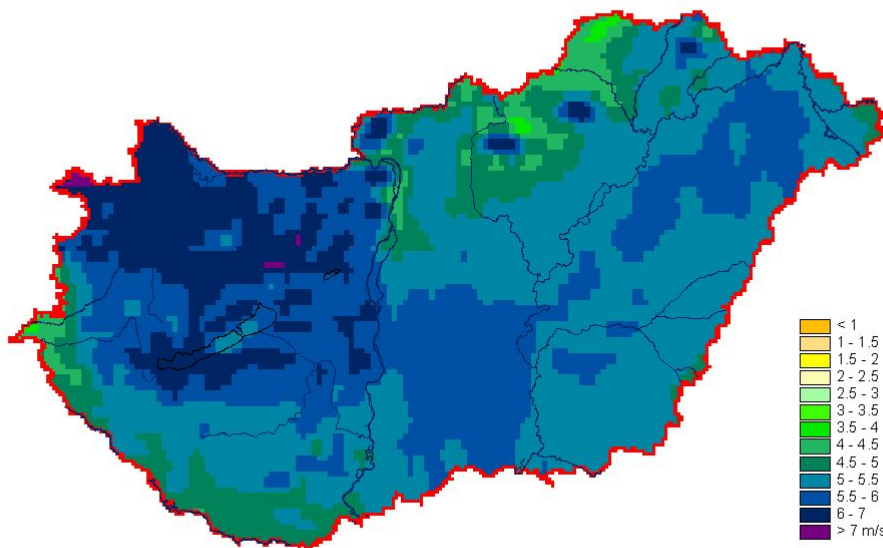
2.2.4 A hazai szélklíma

Az utóbbi években végzett kistérségi szélklimatológiai vizsgálatok (2.3 ábra) egyértelműen igazolták, hogy hazánk megfelelően kiválasztott térségeiben is lehetséges közép-, ill. nagyteljesítményű, villamos energiát termelő szelerőműveket telepíteni.

Ez évben jelent meg az Országos Meteorológiai Szolgálat mérőállomásának adatai alapján az a hazai térkép (2.4 ábra), amely tájékoztató jellegű útmutatásra alkalmas a regionális szélviszonyok megítélésére 100m-es magasságban. Ez az Európai Szélatlasz szerkesztésénél is alkalmazott WasP (Wind Atlas Analysis Application) modell alkalmazásával számolt adatok egy vizuális interpretációja, amely föliára másolt ország-térképpel fedve szemléletes képet mutat a hazai szélviszonyokról.



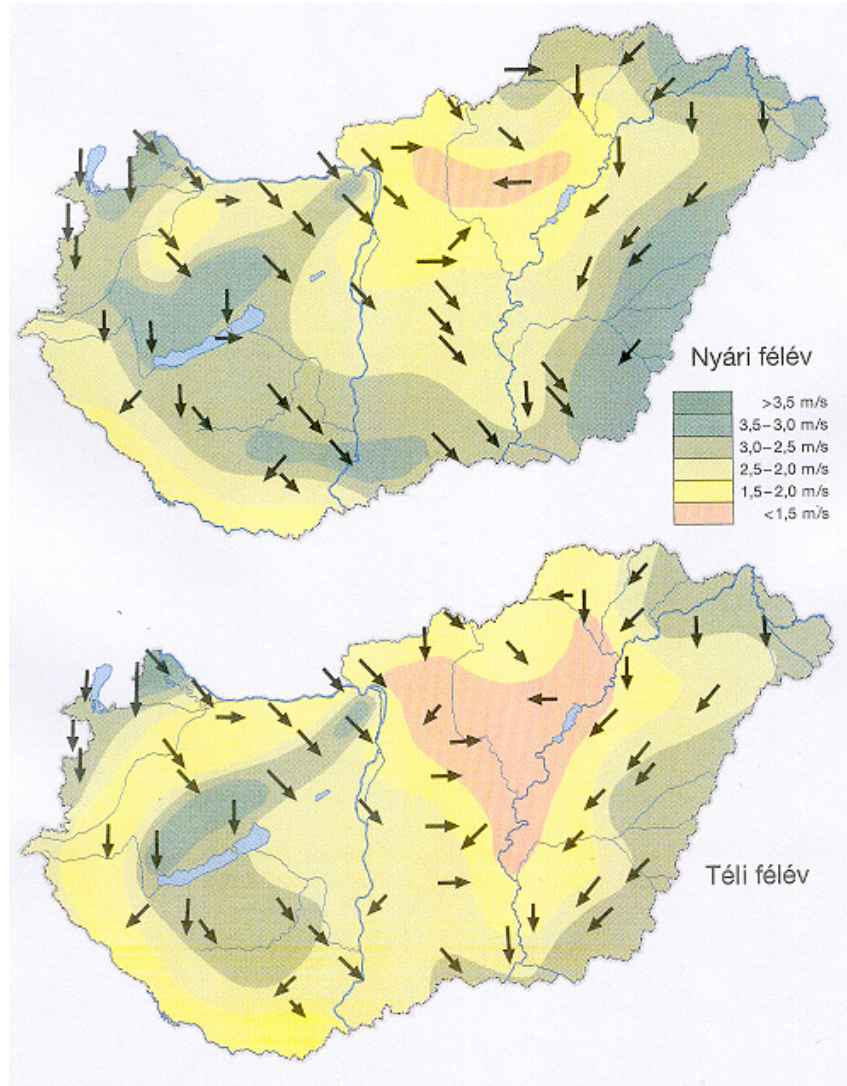
2.3 ábra Magyarország széltérképe 10m magasságban (Forrás: OMSZ)



2.4 ábra Magyarország széltérképe 100m magasságban (Forrás: OMSZ)

A térben viszonylag behatárolható szélviszonyok – sebesség és irány – e térképek alapján becsülhetővé váltak, azonban az időtartamok megállapítására szolgáló adat-sorok még hiányoztak.

A hosszabb távú meteorológiai megfigyelések és kutatási eredmények – az éves pe-riódust meghaladó átmeneti változásokra, szélsőségekre és az egyes sebesség-osztályok időtartamára – képezik a hiányzó adatsorokat a pontosabb becslésekhez.



2.5 ábra Nyári-téli szélirányok és szélsőségek területi megoszlása
(Forrás: OMSZ)

Az uralkodó szélirányokra vonatkozó regionális jellemzőket a téli és nyári hónapokra és a globális szélsőség adatokat külön térképek szemléltetik (2.5 ábra). A széltérképek eredményei alátámasztják mindazokat a hazai fejlesztési célokat, melyek több tíz megawattos szélgépparkok létesítését irányozzák elő.

A regionális, kistérségi helyi klimatikus sajátosságok, a hazai szélviszonyok mellett elsődleges fontossággal bírnak. A bemutatott térképek egyikén sem lehet szignifikánsan kijelölni, például Kulcs térségét telepítés szempontjából ideális helynek, miközben Kulcson kiváló termelési adatokkal jellemezhető szélturbina működik.

Minden kétséget kizáróan kijelenthető, hogy 4,5-8,5 m/sec sebességtartományban számos hely kijelölhető, ahol féléves-éves mérésekkel, megközelítő biztonsággal becsülhetők az éves átlagos széladatok, amelyek a termelési adatok számításához elengedhetetlenek.

Mindezek azonban nem jelentik azt, hogy ettől hazánk hegyekkel övezett síkságainak szélviszonyai versenyképesek lennének a kontinens ennél kedvezőbb adottságú, majd tengerparti területeivel az európai összehasonlításokban. Nyilvánvaló, hogy a rangsorban hátul állunk. Ugyanakkor kétségtelen, hogy vizsgálatokkal megalapozott helyszíneken lehetőség van több – akár 10–20–40 MW beépített teljesítményű – szélpark telepítésére is [Tóth L. et al. 2004]

2.2.5 Szélerőművek tervezése, telepítése

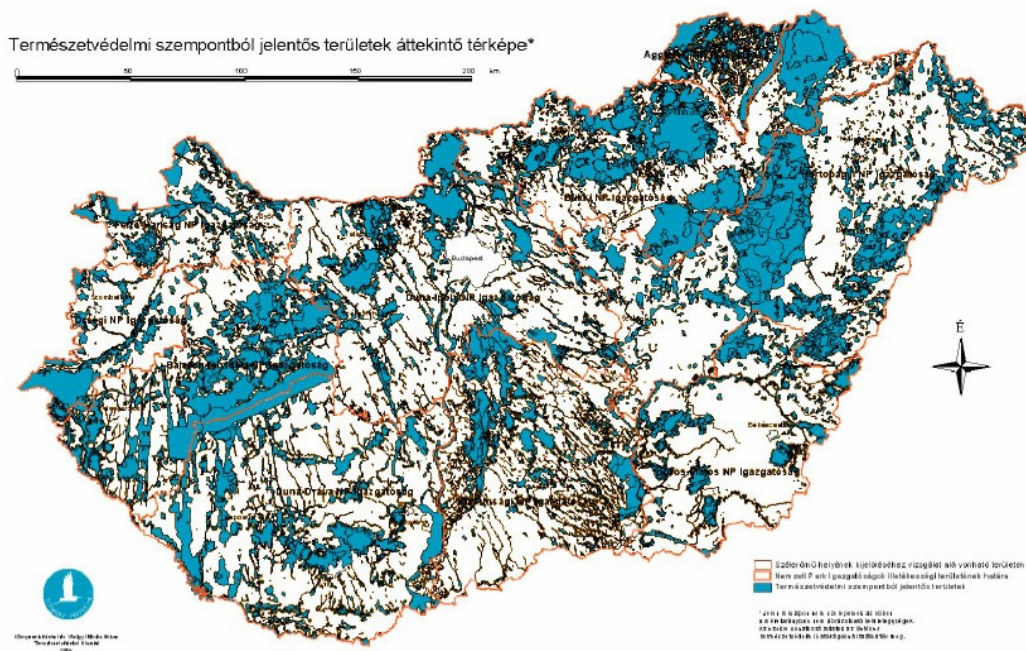
Okulva a németországi és más európai országok tapasztalataiból, célszerű a berendezéseket olyan helyre telepíteni, ahol a környezetet és a lakosságot nem zavarják, valamint környezeti károkat sem okoznak. Sok és szerteágazó környezeti követelményt kell a létesítéseknél figyelembe venni. A felsoroltak mellett az egyik legfontosabb szempont, hogy az adott helyen megfelelő szélmenyiség álljon rendelkezésre, hogy a beruházás gazdaságos legyen, vagyis az investált tőke megtérüljön. Ha ez teljesül, akkor a környezetre kell összpontosítani. Például a lakóépületektől olyan távolságra legyenek, hogy sem a zajhatás, sem a fény reflexió a települések lakóit ne érje. 500-600 m távolságból már egyik effektus sem zavaró. Ha ez is teljesül akkor meg kell vizsgálni, hogy a környezetben milyen károkat okozhatnak, vagyis az élővilágot ne veszélyeztessék, ami főként a madár populációkra vonatkozik. Ezért védett állatok környezetébe, vonulási útvonalakon a létesítések semmiféleképpen nem kívánatosak. E területeket, „útvonalakat” a szakemberek jól ismerik, gondos hely kiválasztással megelőzhetők [Hunyár et al. 2004]

2.2.5.1 Szélerőművek tervezésének táj és természetvédelmi kérdései

A villamos energia termelésére szolgáló egyes berendezések, de még inkább ezek csoportos telepítésének többek között a természet- és környezetvédelem szempontjai szabnak határt. Magyarország területének mindössze 7%-a minősül természetvédelmi területnek (2.6 ábra), a 2002 évi statisztikák szerint csupán Portugáliát hagyja maga mögött ezzel a csekély hányaddal

Ez a helyzet jelentősen megjavítható, ha a NATURA 2000 program keretében további jelentős területek kijelölése és védelme megtörténik, amely – a munkaközi anyag szerint – mintegy 22%-ra növeli a jelenlegi arányt.

Az „Érzékeny Természeti Területek” és az „Ökológiai hálózatok” kialakítása, továbbá a biodiverzitás megőrzését célzó program (az ökológiai hálózatokon és az ESA területeken kívül eső), amely mezőgazdasági és állattenyésztési területeket is érint, a későbbiekben tovább javítja hazánk ökológiai helyzetét és pozícióját. E védett területek kiterjesztésére külön törvény, kormány- és miniszteri rendeletek szabályai vonatkoznak. Ezek a fejlesztési célkitűzések ugyanakkor összhangban vannak az ország nemzetközi megállapodásaival és vállalt kötelezettségeivel.



2.6 ábra Magyarország Természetvédelmi Területeinek megoszlása
A kézzel jelölt területeken szélerőművek nem létesülhetnek
(Forrás: KTM Természetvédelmi Hivatala 2004.)

2.2.5.2 Egyéb korlátozó tényezők

A természetvédelmi területek bővítésére vonatkozó programok, a domborzati viszonyok az erdősültség, a meglévő magisztrális nyomvonalas létesítmények, a közösségi területek olyan adottságok, egyben olyan behatárolásokat jelentenek, amelyek szélenergetikai projektek telepítési helyszíneit jelentősen korlátozzák s csak jól körülhatárolt feltételek betartása esetén engedélyezhetők.

Az általánosságokon túl a táj-és természetvédelemmel kapcsolatos követelmények –mint az engedélyezés során megjelenő feltételek- a kizáró okok, a tájesztétika, a táj-rehabilitáció, az élővilág védelme, az egyedi tájértékek, a földtudományi értékek, vízvédelem, zajhatások szempontjából – a KTM Természetvédelmi Hivatal által kiadott tájékoztató nyomán kikristályosodtak.

A környezeti hatásvizsgálatról szóló 20/2001.(II. 14.) Kormány rendelet általában 2 MW, védett természeti területen 200 kW összteljesítménytől követeli meg az engedélyt. Az előkészítő környezeti hatástanulmány benyújtása nyomán a természetvédelmi hatóság jogosult a táj-és természetvédelem szempontjából szükséges részletes vizsgálati területek meghatározására. Mindazonáltal, hogy az engedélyezési feltételek az említett tájékoztató ismeretében adottak, számos feltétel – a megfelelő hazai gyakorlat és számosság hiányában – egyelőre szubjektív mérlegelés tárgya [Tóth P., 2001]

2.2.5.3 Általános megfontolások, előírások és követelmények a szélerőművekkel kapcsolatban.

A szélerőművek létesítését és üzemeltetését - egyéb villamos erőművekhez hasonlóan - jól körülhatárolt követelmények határozzák meg. A szélerőművekkel kapcsolatos konkrét magyar szabványok nem állnak rendelkezésre, de a nemzetközi IEC szabványokat a Magyar Szabványügyi Hivatal Magyar Előszabványként elfogadta, és megfelelő MSZ ENV jelzéssel nyilvántartja, s az angol nyelvű változatukat kell alkalmazni.

Az EU-ban a szélerőművekre vonatkozó első előírások 1989-ben jelentek meg. Ettől kezdve részletesen megfogalmazták a telepítésre, az üzemeltetésre, a gyártásra, a szerelésre, a szervizelésre, az építési logisztikára és a biztonságtechnikára vonatkozó követelményeket. Külön előírások léteznek a környezeti hatásokkal kapcsolatos elvárásokra vonatkozóan. Az összes számottevő előírást itt - terjedelmi okok miatt - nem is lehet felsorolni.

A nemzetközi szabványcsomag kiindulásként meghatározza az általánosan használatos „terminus technicus”-okat, s mindezeket - angol nyelven - jól körülírva értelmezi is.

Ahhoz, hogy a szélerőművet, vagy rendszert telepíteni tudjunk, jól fel kell mérni a környezetet és meg kell határozni adott térségben a széllel kapcsolatos jellemzőket, úgymint átlagos szélesség, referencia szélesség, stb. Ezek ismerete nélkül a gyártók nem tudnak szélerőművet ajánlani, hiszen ismernünk kell a várható terheléseket, amelyeket a szél okoz a lapátrendszeren, a tornyon és a különféle elemeken. A nemzetközi gyakorlat szerint a szélerőműveket 4 osztályba sorolják, amelyben alapvetők a szélességek értékei. Legszigorúbb követelményeket az I. szélerőmű osztály jelenti, amely gépeket 10 m/s-os átlagos szélességre készítenek,

és az ún. „referencia szélesség” - ami a területen nagyobb gyakorisággal előforduló nagy szélességeket jelenti - 50 m/s, ez a IV. osztálynál már csupán 30 m/s. Ismerni kell a területen például az átlagos turbulenciát, amelyet viszont minden turbina osztálynak teljesíteni kell (legalább 0,17-re adják meg). Fontos ismerni például az extrém szelek, viharok előfordulását, annak gyakoriságát, amelyek maximumát pl. az 50 m/s-nál mérhető turbulencia ötszörösében határozták meg. Fel kell tárnani a területre jellemző egyéb klimatikus jellemzőket is. Ezek például a hőmérséklet, a páratartalom, a napsugárzás, az esők, a zúzmaraképződés gyakorisága, a havazási és jegesedési viszonyok, a területre jellemző felületi koptató hatások (légtéri homok előfordulása), kémiai behatások (savas esők stb.), a már említett általános - a szél dinamikájából fakadó - mechanikai jellemzők, a földrajzi koordináták a nap járásának megállapítása céljából, stb. Nyilvánvalóan fontosak az átlagostól való jelentős eltérések. A normális környezeti tényezők: $-10 - +40$ C hőmérséklet, 95% relatív páratartalom, 1000 W/m^2 napsugárzás, $1,225 \text{ kg/m}^3$ légsűrűség (15°C -nál).

A beruházónak ismerni kell az adott területen a talajviszonyokat is, például statikus és dinamikus terhelhetőség, a talajvíz szintjét s annak mozgását valamint a talaj összetételét.

A generátor szállítójának - az ajánlatához - ismernie kell a villamos hálózatra kapcsolás követelményeit, amelyeket a berendezéseknek maradéktalanul teljesíteni kell (frekvencia eltérés, túlfeszültség, fáziseltolódás, felharmónikusok, szimmetrikus és aszimmetrikus eltérések, stb.).

A gyártók ezek alapján tudnak konkrét ajánlatot tenni a szállításra kerülő típusra, s ekkor jutunk hozzá azon paraméterekhez, amelyek ismeretében a villamoshálózat üzemeltetője megválaszolhatja, képes-e fogadni az ilyen módon termelt villamos energiát (a legkisebb és legnagyobb kimenő teljesítmények értékeit, fázistényezőket, feszültség lökések ki és bekapcsolások alkalmával, a várható szervizelési időszakokat, és azok időtartamát, stb.).

2.2.5.4 Szélerőművek környezeti hatásai

A szélenergiát lokálisan két szempontból célszerű vizsgálni:

- a „komfortérzés”-re gyakorolt és
- a környezeti hatását.

A "komfortérzés" olyan tényezőket foglal magába, amelyek az emberi érzékelésre, vagy viselkedésre lehetnek hatással. A legjellemzőbbek: a vizuális hatás, a tájkép, a hang, és az elektromágneses zavarás.

A környezeti hatás: a növény és az állatvilágra gyakorolt minden közvetlen és közvetett befolyást magába foglal.

Ezek közé tartoznak általában a madarak, a ritka növényfajták és a lokális hidrológiai feltételek változásai, stb. A regionális, nemzeti és nemzetközi megnevezések

azt jelzik, hol várhatók elfogadhatatlan hatások és ezek gyakran képezik a fő részét a tervezési útmutatóknak.

A szélenergia felhasználása hozzásegít a globális felmelegedést okozó anyagok kibocsátásának mérsékléséhez (2.6 táblázat). Az iparosodás előtti idők óta a légköri CO₂ koncentráció 25%-kal növekedett és 2050-re várhatóan megkétszereződik. Az emberi tevékenységeknek tulajdonítható globális felmelegedést tényként rögzítették és az IPCC kutatói még nagyobb környezeti változások előfordulását várják. Az Európai Unióban a CO₂ kibocsátás mintegy egyharmada származik energiatermelésből.

Minden 1 %-nyi hagyományos energiatermelő kapacitás megújuló energia forrásokkal való felváltásával 0.3% CO₂ kibocsátás-csökkenés érhető el. Például egy 600 kW-os szél erőmű 20 évre tervezett élettartama alatt mintegy 20 000 – 35 000 tonna CO₂ - kibocsátást előz meg a hagyományos energiaforrásokhoz képest.

A fosszilis tüzelőanyaggal működő erőművekből kibocsátott CO₂ csökkentésére nincsenek kielégítő vagy kereskedelmileg életképes eszközök.

2.6 táblázat A tervezett szélenergia felhasználás révén évente elkerülhető szennyező gázki-bocsátások az EU-ban (Forrás: EWEA)

Év	EWEA célok, várható szél-erőmű kapacitás [MW]	Energia termelés [TWh/év]	CO ₂ csökkenés [t/év]	SO ₂ csökkenés [t/év]	NO _x csökkenés [t/év]
2005	20 000	40	34 200 000	114 000	95 000
2010	40 000	80	64 800 000	216 000	180 000
2020	100 000	200	134 400 000	480 000	400 000

Az erőművekből kibocsátott CO₂ mennyisége az EU-ban 1992-ben 973 millió tonna volt. Ez a szám várhatóan 1195 millió tonna/év CO₂-re fog növekedni 2020-ban. Ha az EWEA fejlesztési céljai 2020-ra beteljesednek, az EU energiaszektorának CO₂-kibocsátását több mint 11 %-kal lehetne csökkenteni a fent leírt feltételezések alapján [EWEA, 2001]

2.2.5.5 Vizuális hatás

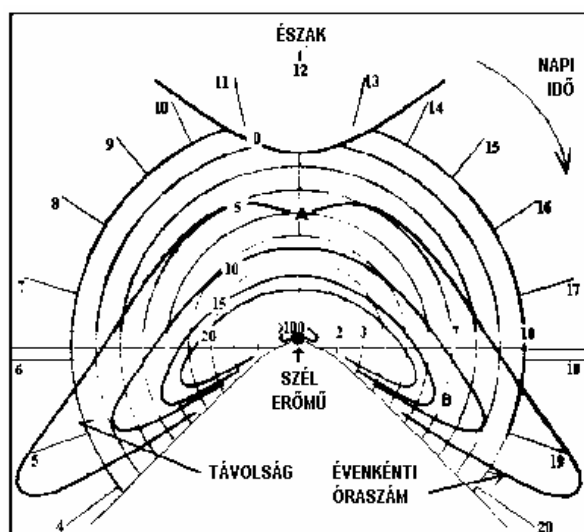
A szél erőmű-parkoknak nyílt területen kell lenniük ahhoz, hogy gazdaságilag életképesek legyenek, ezért távolról is jól láthatóak. A szél erőmű-park látványára a lakosság reagálása nagymértékben szubjektív. Sok ember a szél erőműveket a tiszta energia szimbólumaként szemléli, s ezért kedveli a látványt, míg néhányan a tájkép barátságtalan kiegészítőinek tekintik.

Az ipar jelentős erőfeszítéseket tett azért, hogy a kifejlesztett gépeket beleillessze a tájképbe. Számítógépes fotomontázsok, animációk és a vizuális hatás feltérképezett zónáival együtt objektív előrejelzéseket adnak az objektum megjelenéséről.

A nagyobb szélturbinák irányába mutató trend csökkenti a szubjektív vizuális hatást azonos kapacitás esetén.

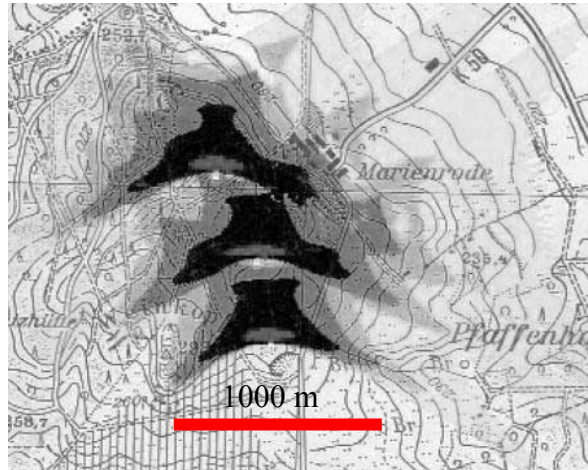
A legtöbb szélgenerátor hosszú, kúpos acéltoronyra van felszerelve, amit a legtöbb ember esztétikusnak talál. Rendszerint tájképfornálással foglalkozó építészeket vonnak be az új tervek vizuális értékelésébe.

A napfény periodikus tükröződésének (felvillanás) vagy megszakításának (árnyék vibrálás) hatásait a gép telepítésénél és a lapátkerék felületi kezelésénél figyelembe veszik. Ezek a jelenségek teljes mértékben előre jelezhetők és a mérséklésük könnyen elvégezhető a szélerőmű-park tervezése során, főként annak kezdeti szakaszában.



2.7 ábra Az árnyékhatás számítása
(Forrás: Danish Wind Industry Association)

Az árnyékhatás számítható (2.7 ábra). A földrajzi elhelyezkedés eltérése miatt az eredmények országonként eltérőek, de befolyásolja a felhőtakarás és az erőművet körülvevő domborzati viszonyok. A képen A- és B-vel jelölve két ház van a középpontban lévő turbinától a 6-os és 7-es távolsági vonalon. Az ábra azt mutatja, hogy az "A" házban évenként 5 óra, a "B" házban pedig évenként mintegy 12 óra időtartamban érzékelik a turbina árnyékát (a lapátkerék forgásából adódó villódzó, ún. „diszkó” hatást is). A szezonális változás ugyancsak számítható. Ezért is célszerű a hazai földrajzi viszonyok között, a 100 m magas turbináktól min 500 m-es távolságot tartani a legközelebbi erre érzékeny objektummal, mivel így a legrosszabb esetben is az évi 4-5 órás (szezonálisa napi max. 4-10 perces átvonulással) időtartomány alakul ki, ami legfeljebb évi 30-40 nap jelentkezik. Az árnyékhatás számítása szélparkok esetén kiemelten fontos szerepet kap (2.8 ábra) [Tóth L. et al. 2003].

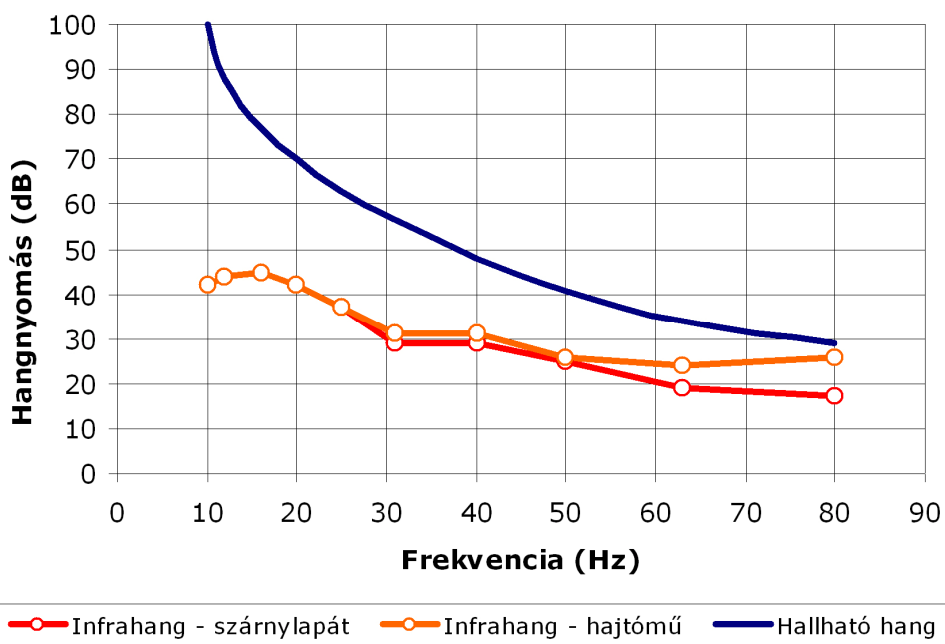


2.8 ábra Árnyékhatás 3 erőmű esetén
(Forrás: Danish Wind Industry Association)

2.2.5.6 A zajhatás

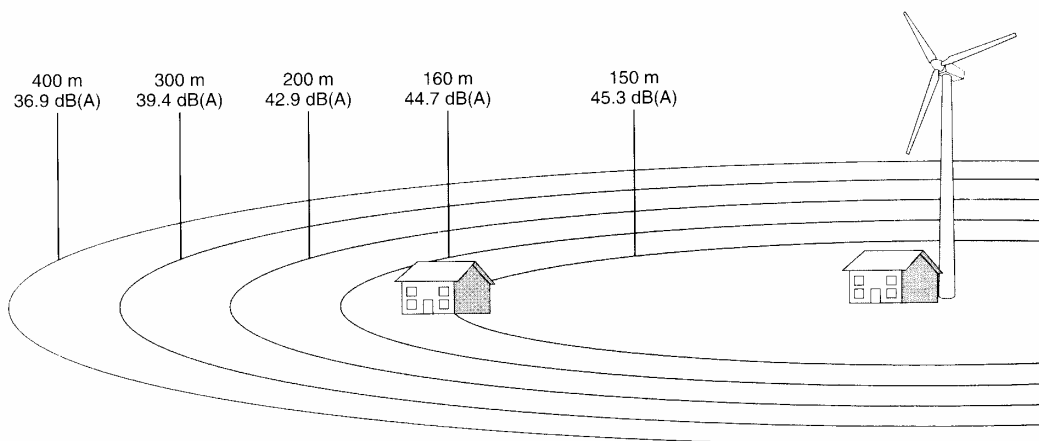
A modern szél turbinák csendesek. Ahhoz, hogy ezt az állítást objektíven meg tudjuk ítélni, valamennyire meg kell vizsgálni a hang (zaj) terjedésének jellemzőit. A decibel a hang nyomásszintjének mértéke - a levegőben lévő nyomásváltozás nagyságrendje. 3 dB változás a hangnyomás kétszerezésével egyenlő, s ez már figyelemreméltó érték. 10 dB növekedés nagyjából olyan mint a "hangosság" megkettőződése. A környezeti zaj mérése dB(A)-ban történik, ami az emberi fül érzékenységének korrekcióját is magába foglalja. Formálisan a hang méréséhez néhány további jellemzőre is szükség van: például arra az időre ami alatt a hangot mérik, mely általában 1 perc, 10 perc vagy 1 óra. A szél turbinák esetében ezek a megközelítések hasonlóak más zajforrások méréséhez, ezért eltekintek a részletes ismertetéstől.

A hangnyomás szintje a szél erőmű mellett 70-90 dB (A), de 80-100 méter távolságban már csupán 50-60 dB(A), nagyjából ugyanolyan szintű, mint egy párbeszéd két személy között. Egy turbina esetén az 500 méterrel távolabb lévő háznál, amikor a szél a turbina felől a ház felé fúj, a hangnyomás szintje ~ 35 dB(A), ami annak a hangnak felel meg, ami egy „csendes” házon belül van. Több szél generátorból álló szél erőmű-park 500 méteres távolságban 42 dB(A) hangszintet teremt, ami egy nyugodt irodában mérhető hanggal egyenértékű. Amikor a szél ellenkező irányba fúj, a hang szintje jelentősen, akár 10 dB-lel is kisebb lehet.



2.9 ábra Frekvencia függvényében az infrahangnyomás (dB) a toronytól 10 m-re, míg 600 m-re az értékek nem voltak kimutathatók (Forrás: GigaWind)

A szélérőmű által kibocsátott infrahangok (2.9 ábra) – a németországi GigaWind program mérési eredményeit figyelembe véve– az emberi szervezet szempontjából nem jelentenek problémát. A szél természetes formákon is létrehoz infrahangokat a szélereősségtől és a turbulenciától függően.



2.10 ábra A hallható hanghatás az oszloptól távolodva (konkrét mérés során)

A 2.10 ábra egy átlagos szélturbina környezetében a zajszint értékeket mutatja dB(A)-ban. Ez a mérték a legtöbb zajszint-mérő műszeren közvetlenül leolvasható. (A műszer az (A) jelű nemzetközileg szabványosított szűrővel mér, ami elég jól követi az emberi fül sajátságait.) A szélturbinától 160 m távolságra a zajszint már csak 44,7 dB(A), és távolodva ez tovább csökken.

A zaj fő forrása elsősorban a gépészeti berendezés és a szélturbina lapátkerék áramlási zaja.

A szélerőmű hangja kismértékben emelkedik a szél sebességével. A szél hangja a fák és élő sövények mellett, épületek körül és a helyi terepen átfújva ugyancsak növekszik a szélesebséggel, de rendszerint nagyobb mértékben és így gyakran elnyomja a turbina hangját. Sok erőfeszítés történt a jelenlegi csendes gépek megalakítása érdekében, amelynek során részleteiben is figyelmet fordítottak a formára, a lapátkerékre továbbá a gép mechanikus részeire. Ennek eredményeként a hang nem okoz gondot a modern szélturbináknál, amelyeket körültekintően telepítettek [Gasch, 1991]

2.2.5.7 Elektromágneses zavarás

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a szélerőmű-park körültekintő tervezése elkerülhetővé teszi a telekommunikációs rendszerek bármiféle zavarását. A szélturbinák úgy kelthetnek elektromágneses zavaró hatást, hogy a jelek visszaverődnek a lapátkerékről úgy, hogy a közelben lévő vevőkészülék fogja mind a közvetlen, mind a visszaverődött jeleket.

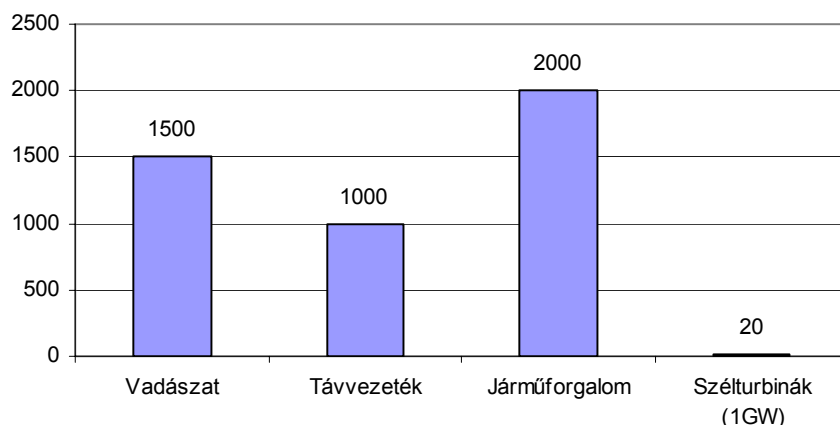
Az üvegszálás poliészter amit a modern lapátkerékekhez használnak, részlegesen áteresztő az elektromágneses hullámok számára és ezért közbenső helyet foglal el az elektromágneses zavarás skáláján.

Azok a polgári és katonai kommunikációs jel-típusok, amelyeket az elektromágneses zavaró hatások befolyásolhatnak, a TV- és rádió-adásokat, mikrohullámú és cellás rádiókommunikációt valamint a különböző navigációs és légi közlekedési ellenőrző rendszereket foglalják magukba. A szélerőmű-parkok tervezői konzultálnak az illetékes polgári és katonai hatóságokkal, hogy megállapítsák, várhatók-e elektromágneses zavarások. A mikrohullámú hálózatokat és a légügyi kommunikációs rendszereket befolyásoló problémákat már a tervezés szakaszában rendezni kell [Sembery, 2004]

2.2.5.8 Hatás a madarakra

A madarak gyakran ütköznek olyan szerkezetekkel, amelyeket nehezen látnak, különösen a nagyfeszültségű távvezetékekkel, árbocokkal, oszlopokkal és épületek ablakaival. De legjelentősebb pusztítóik a mozgó járművek, s főként az országúti jármű forgalomban. A madarak viselkedése fajok és telephelyek szerint specifikus tendenciát mutat. A különböző okoknak tulajdonítható madárpusztulások évenkénti

becsült értékét Hollandiára vonatkozóan 1000-1200 turbinára vonatkoztatva a 2.11 ábra szemlélteti:



2.11 ábra Évenkénti madárpusztulások becsült száma Hollandiában
(Forrás: ECN)

Hollandiában jelenleg 600 MW feletti kapacitás van telepítve. A madarakat ritkán háborgatják a szélturbinák. A Dánia nyugati partján lévő Tjaereborgra vonatkozó radarvizsgálatok - ahol egy 2 MW-os szélerőművet telepítettek 60 méter átmérőjű rotorral - azt mutatják, hogy a madarak hajlamosak arra, hogy megváltoztassák repülési útvonalukat a turbinától 100-200 méterrel megelőzően, majd felette vagy mellette haladnak el biztos távolságban.

A megfigyelések szerint ez a viselkedés éppolyan következetes éjszaka, mint napközben. Dániában számos példa van arra is, hogy a sólymok a szélturbinák tornyai-erősített ketrecekben fészkelnek. Ausztriában a Neusiedel melletti szélparkban figyelték meg, hogy az építés időszakában a madár populáció mérséklődött (az építkezés zavaró hatása miatt, de a következő évben intenzív növekedés indult, ami azt jelzi, hogy önmagában a turbinák jelenlétéhez a madarak gyorsan alkalmazkodnak. E témában több nagy jelentőségű mű, akadémiai értekezés – például Frank Bergen, Dr. Reichenbech – készült, melyekre dolgozatomban részleteiben nem tértek ki, de mind alátámasztják az általam említetteket.

Ezek ismeretében e problémát a szélerőművek tervezői, a terveket jóváhagyók egyaránt komolyan veszik, ezért a fejlesztésekből kizárják a „madár-érzékeny” területeket, például a fő vonulási útvonalakat, s a madárvédelmi körzeteket.

2.2.5.9 Egyéb környezeti hatások

A szárazföldi környezetre gyakorolt hatások főként az építési tevékenység, a földelhordás (útépítés, alapozás) és hidrológiai erózió következményei. Ezeknek a ha-

tásoknak a mértéke az ökológiai rendszer típusától, a vízvezetés módjától, az építési módszerektől és azok időtartamától, valamint a helyreállítási gyakorlattól függ. Mindezen tényezők és a kár mérsékléséhez szükséges intézkedések megvitására kerülnek a környezetvédelmi hatásvizelésnél (erre még visszatérünk). A kitermelt termőföldet az építkezést követően azonnal visszaszállítják. Bizonyított, hogy sem a vadállatokra, sem a háziállatokra a szélerőmű-parkok nincsenek hatással.

2.2.5.10 Környezeti hatások összefoglalás

Károsanyag-kibocsátások. A szélturbinák működésének nincs közvetlen károsító hatású kibocsátása.

Energiaegyensúly. A szélturbina költségeire vonatkozik mindaz, ami jellemzi a többi megújuló energiaforrás hasznosítását is, azaz a megtérülési idő után szinte teljes mértékben elhanyagolható az üzemeltetési költség.

Bontási költségek és társadalmi kötelezettségek. A szélturbinákból nyert elektromos energia járulékos és társadalmi költsége rendkívül alacsony. Az elavult szél-erőművek lebontása nem jár különleges kötelezettségekkel, s a modern szélturbina anyagainak 98-99%-a újrafelhasználható.

Területhasználat. A szélerőmű-park által elfoglalt terület 99 %-a érintetlen marad, s pl. mezőgazdasági célokra változatlanul felhasználható.

A turbinázaj. A korszerű turbinák zajszintje alacsony. A megengedett kibocsátási és terhelési szint nagyban függ a helyi szabályozástól. Európában a szélturbinák és a lakóterületek közötti jellemző távolság több mint 300 – 600m [Tóth P, 2001]

2.2.5.11 Környezeti megfontolások

A technikai elemzés készítésekor a beruházónak a lehetséges helyszín környezeti elfogadhatóságát is mérlegelnie kell. A lehetséges helyek kezdeti környezeti elfogadhatóságát adatokon alapuló tanulmányokkal támogatják. Az Európai Szélenergia Szövetség ajánlja a környezeti hatástanulmány elkészítését. Ezenkívül fontos a területről szóló jelentések és térképek áttekintése az esetlegesen felmerülő különleges technikai, vagy környezeti kérdések meghatározásához. A beruházónak számba kell vennie a meglévő nemzeti, regionális és helyi tervezési politikát is. Figyelembe veendő néhány további szempont:

Vizuális szempont. A beruházónak értékelnie kell a javasolt helyszín láthatóságát és a fontosabb tervezett nyilvános fejlesztések helyeiről való láthatóságot.

Ökológia. A fejlesztőknek számításba kell venniük a területre vonatkozó ökológiai rendelkezéseket (növényzet, talaj, víz, állatvilág, stb.).

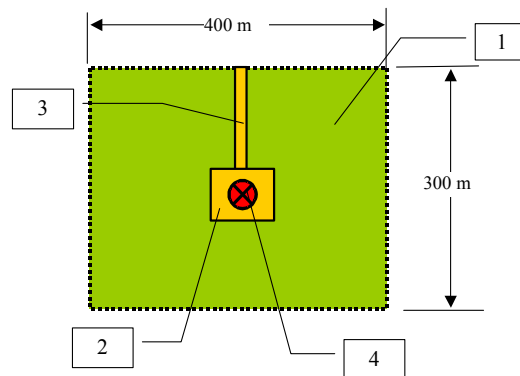
Polgári és katonai repülőterek. A repülőterekhez közel eső helyeknél a repülési hatóságok előírásai a mérvadók.

Egyéb korlátozott területek. Katonai területek, telekommunikáció, nemzeti parkok közelsége, világörökségi területek, stb.

2.2.5.12 A szélgenerátorok terület igénye

Ha a magyar környezetvédelmi atlaszt szemügyre vesszük, akkor számos olyan terület fellelhető, ahol a szélerőművek semmiféleképpen nem okozhatnak károkat. Ezek a területek általában mezőgazdasági művelés alatt állnak. A létesítés szempontjából is ezek a legalkalmasabbak, mivel jól megközelíthetők, és a szél útjában álló, annak intenzitását csökkentő létesítményektől is távolra esnek.

Egy szélgenerátor létesítéséhez átlagosan 5-7 ha terület szükséges. Szélparkban az egy generátorra eső terület ~6 ha. Tehát egy 25 generátorból álló szélpark 150-170 ha területen létesíthető. Hozzá kell tenni, hogy e terület a mezőgazdasági felhasználás vonatkozásában továbbra is 100%-os értékű marad (2.12 ábra).



2.12 ábra Szélgenerátor területigénye

Egy szélerőmű (1,5 MW) terület igénye, 1-mezőgazdaságilag hasznosítható terület, 2-szervízterület, 100-150 m² (esetleg a transzformátor helye is), 3-szerviz út, 4-generátor alap

Termőterület-csökkenést csupán az a felület jelent, amelyen a berendezés áll, amely elrendezésében hasonló, mint egy rövid hullámú átjátszó állomás-, vagy egy villamos távvezeték oszlopa. A szemlélődő szakember számára megdöbbentő, hogy hazánkban szinte a környezetvédők ellenállása nélkül létesítettek több ezer átjátszó állomást (35-60 m magasságúakat, akár környezetvédelmi területeken is), miközben felemelték hangjukat a legtisztább energiát nyújtó szélerőművekkel kapcsolatban. A mezőgazdaságból művelés alól kivont terület az, amelyen a berendezés áll, 100-150 m² generátoronként. Ehhez járul még az a szerviz út amely a berendezéshez vezet, hiszen javítás, karbantartás alkalmával a létesítményt meg kell közelíteni, mint ahogy az szükséges a távvezeték- és mikrohullámú átjátszó oszlopoknál is. E területek a mezőgazdaságilag művelt területek százalékában szinte ki sem fejezhető [Patay, 1997]

2.3 A szél energetikai célú jellemzése, a szél jellemzői

A szélgenerátorok telepítésének magyarországi ellenzői azzal szoktak érvelni, hogy az ország széljárása nem megfelelő, túl alacsonyok a szélesség értékek. Természetesen ez sok helyen igaz, azonban nem szabad megfeledkezni arról a tényről, hogy Magyarországon az 1900-as évek elején még legalább 1000 szélmalom működött, s 1933-ban is több mint 250 darab volt üzemben. Karcagon még 1972-ben is volt működőképes szélmotor.

2.3.1 A szélerő

A földfelszín által elnyelt napsugárzás nagyobb mértékű az egyenlítőnél, mint a sarkoknál. A bejövő hőmennyiség különbsége az atmoszféra legalsó rétegében (a troposzférában) konvektív területeket hoz létre. Leegyszerűsített megközelítéssel a légtömegek az egyenlítőtől kiindulva áramlanak a sarkok felé, amelyeket a Föld forgása módosít, s ezzel számos örvénylés alakul ki mind az északi, mind a déli féltekén is.

A Föld azon részein, ahol pedig a légtömegek leszálló ágban vannak, nagy légnyomású területek alakulnak ki, ahol emelkednek, ott alacsony légnyomásúak jönnek létre. Ez a nyomásemelkedés irányítja a légtömegek áramlását a magasabb légnyomású területekről a kisebb légnyomásúak felé. Ez a szél keletkezésének oka. A szélre hatással van a Föld forgásából eredő Coriolis-erő, amely a forgó viszonyítási rendszerben a horizontálisan mozgó légtömegekre hat, ezért a kialakuló szél keleti vagy nyugati irányba fordul. A geosztrófikus szél - egyfajta egyensúlya a nyomásból származó erőnek és a Coriolis-erőnek -, amely párhuzamos az egyenlő légnyomású pontokat összekötő vonalakkal. A nyomáskülönbség mentén létrejövő légáramlás a szél. A szél hajtóereje a nyomáskülönbség. Ez azonban egy idealizált eset, mely csak a magas illetve alacsony légnyomású helyek jelenlétének figyelembevételéből adódik. [Petersen E. L, 1998]

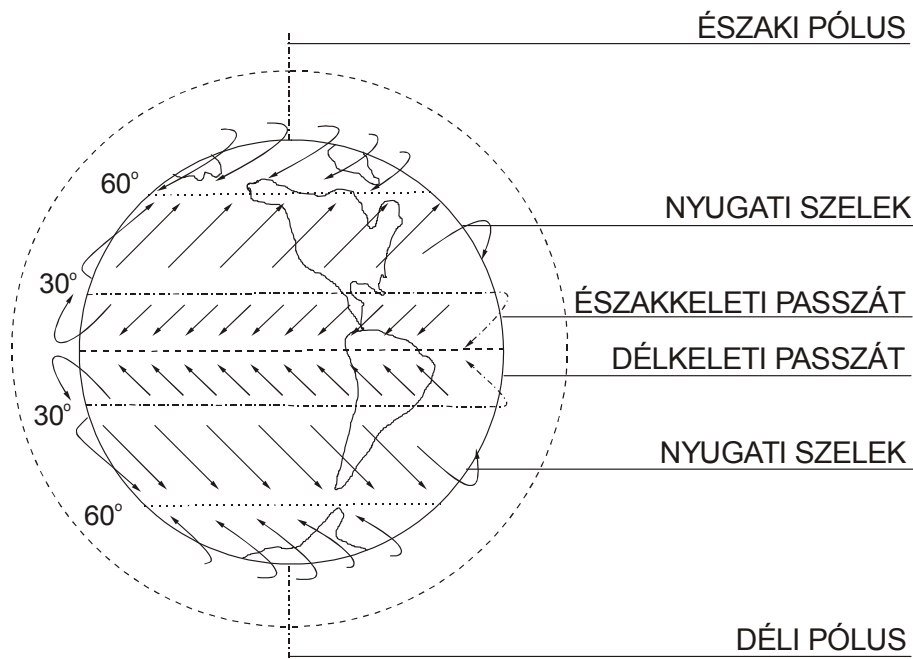
A szélre még a felszínhez való súrlódásból eredő erő is hat. A felszínhez közel a szél lelassul és többé már nem párhuzamos az izobár vonalakkal.

2.3.2 A globális széljárás

Az előzőekben leírt áramlás leginkább egy sima gömbfelület felett alakulhatna ki. A Föld felszíne óceánokkal és szárazföldekkel tagolt, s ezek az eltérő felszínek különbözőképpen befolyásolják az áramlást (2.13 ábra), például:

- légnyomásváltozáson,
- a napsugárzás különböző fokú elnyelésén,
- eltérő csapadékmennyiségen keresztül.

Az óceánok szintén jelentős mértékben nyelik el a hőt. Az említett hatások mind befolyással vannak a globális, és számos állandó helyi szélre is, mint például a monszunra.



2.13 ábra Széljárások a Földön

Az állandó lokális szelek szezonális vagy napi rendszerességgel jelentkezhetnek, a helyi felmelegedés és lehűlés váltakozásával.

A légáramlást az egyenlítő és a trópusok között, az úgynevezett Hadley - cirkuláció irányítja. A légtömeg az egyenlítőtől száll felfelé a trópusokig. A lehűlt levegő kb. a 30-as szélességi foknál ereszkedik le. A felszíni szél aztán visszatér az egyenlítőhöz keleti irányból. Ezt hívjuk passzátshélnek, mely egész évben megfigyelhető.

Ezen a területen csak kis ingadozás tapasztalható a szélsőségekben, mely általában elég nagy az energiatermeléshez.

Az ázsiai kontinens és az óceán hőmérsékletének változása szezonális szelet eredményez, ez a monszun. Nyáron a kontinens erősen felmelegszik, alacsony légnyomású terület jön létre és hűvös párás levegő áramlik az Indiai-óceán felől a szárazföld belseje felé. Télen a kontinens lehül, és nagy légnyomás alakul ki. A szél ekkor a szárazföld felől fúj az óceán felé.

A közepes szélességi fokoknál megfigyelhető áramlásokat az atmoszférában az úgynevezett Rossby – hullámok irányítják, összekeverik a sarkok közeléből származó hideg levegőt a trópusi, melegebb levegővel. A légáramlás ezen a területen jellemzően nyugati, de a keveredések a szélsőségek nagy változékonyságához vezetnek, s frontok képződnek.

Az északi félgömbön a nagy vízfelületek és a kontinensek eloszlása hatással van a nyugati áramlásra. A hegyvidékek részben lelassítják, részben el is terelik az áramló légtömegeket.

A sarki területeken a felszint borító jég visszaveri a beérkező nyári napsugárzást, s a folyamatos hűtő hatás állandó anticiklonos állapothoz vezet. Jellemzőek az igen erős keleti szelek. [Petersen E. L, 1998]

2.3.3 A szél struktúrája

A szél sebességét és irányát az atmoszférában folyó lég cirkuláció, a helyi termikus viszonyok és a talajegyenletlenségek befolyásolják, változása az általános lég cirkuláció keretében lassan órák, vagy napok alatt megy végbe. A talaj egyenletlenségei és a légkör termikus jelenségei szélökéseket idéznek elő, amikor is a szél sebességében és irányában pillanatnyi változások következnek be, amelyeket turbulenciáknak nevezünk. A függőleges hőmérséklet-gradiensektől függően az atmoszférának három lehetséges egyensúlyi alakja különböztethető meg: stabilis, indifferens és labilis.

A *stabilis* egyensúlynál a föld felületén felmelegedett levegőnek nincs függőleges mozgása. Turbulenciák kizárólag mechanikus úton jöhetnek létre, a terepen levő akadályok miatt, de a turbulens áramlás által érintett légréteg vastagságát az atmoszféra állapota korlátozza.

Indifferens egyensúly esetén a mechanikus turbulenciát az atmoszféra termikus rétegezettsége nem csillapítja.

Labilis egyensúly esetén a hőmérséklet-gradiens nagyobb, mint az adiabatikus gradiens, s így a konvekció által előidézett és a mechanikus turbulencia egyaránt kialakul. A 6 m/s-nál kisebb szélesebségeknél - szorosán a talaj fölött - a turbulenciát főként konvekció okozza. Nagyobb szélesebségeknél az akadályok okozta mechanikus turbulencia játszik nagyobb szerepet. A nagyobb légtömegek az akadályokon mind kisebb energia és impulzus értékekre oszlanak, s egy bizonyos ideig, a tér egyes pontjain szélesebség- és szélirányváltozások formájában megtartják tulajdonságaikat [Patay, 2002]

2.3.4 A földi határréteg

A legerősebb, egyenletes és állandó szelek a földfelszín felett néhány 10 km – es magasságban található. A szélturbinák az atmoszféra legalsó 30-160 m magasságú rétegében működnek. Ezen a magasságon a szélre közvetlen hatással van a talaj felszín, s a súrlódás miatt a szélesebségek alacsonyabbak. A légkörnek ezt a réteget hívják földi határrétegnek, amely a nap során a hőmérséklet növekedésével vastagodik. E határrétegben végbemenő folyamatok: a hőátadás, a rotáció és a turbulens áramlás. Ezen folyamatok megértése igen fontos a szélgenerátorok optimális helyének kiválasztása és a szerkezetet érő terhelések felmérése szempontjából.

A felszíni súrlódás fékező erőt fejt ki az áramló légtömegre, melynek sebessége gyakorlatilag nulla a talajszinten. Lefelé ható nyomatók és nyíróerők ébrednek a szél szabad áramlási rétegéig. A szabad áramlás a geosztrofikus, vagy a határréteg feletti szél. A nyíróerők által uralt határréteget hívják semleges, vagy semlegesen könnyű határréteggnek. A szélesebbesség növekedése a magasság függvényében igen fontos az energianyeres szempontjából. Ez a felismerés vezetett el a magas építésű szélgenerátorok építéséhez.

A határréteg alsó 100 métere az úgynevezett felszíni réteg. Itt a földfelszín által okozott súrlódás a legjelentősebb hatás. Ezzel szemben a magasság függvényében a Föld forgásának hatására ébredő Coriolis - erő változása elhanyagolható. Ez az áramlatok egyszerűbb áttekintését teszi lehetővé, és mivel a berendezések ebben a rétegben találhatóak, az energiatartalom számításánál jelentős könnyebbítés. A felszíni szél a nyomásból, a Coriolisi-, és a súrlódási erő egyensúlyából keletkezik, iránya az alacsonyabb légnyomás felé mutat [Tóth L. et al. 2003]

2.3.5 A szél változásai

A szél sebessége folyamatosan változik, ami jól érzékelhető bármely anemométeres szélesebbesség mérés során. Ha a hosszú távú szélesebbesség-mérési eredményeket mint idősorokat átalakítjuk gyakorisági függvényé, akkor egyfajta energiaspektrumot kapunk, vagyis megismerhetjük, hogy mely szélesebbességek tartalmazzák a legtöbb energiát. Ez alapján megbecsülhetjük a kinyerhető energia mértékét is. A mérsékelt égövet két kiemelkedő érték jellemzi. Az egyiket a nagy időjárási rendszerek elhaladása, a másikat pedig ezen áramlatokban lévő turbulencia okozza.

Az utóbbi a szellökésekben észlelhető, hatása az energia termelésre nem jelentős, de fontos a lapátokat, és az oszlopokat érő dinamikus terhelés miatt. Ezért figyelembe kell venni a rendszer rendszerek tervezésekor. Az energiatermelés csökken a gyakori szélirányváltozásoktól függően, hiszen a turbina nem minden esetben van közvetlenül a szél irányában, és a beállási időtartam miatt a hatásfok csökken.

A turbulenciát, zavarnak tekintjük a nagyméretű időjárási rendszer áramlásában. A pillanatnyi szél leírható mint az átlagos szél és a változó komponens előjeles összege:

$$v(t)=v+v'(t) \quad [\text{m/s}] \quad (2.1)$$

Az átlagos szélesebbesség leírja a turbina számára elérhető energiamennyiséget. A változó komponensnek (turbulenciának) is van hatása az energiatermelésre, de nem közvetlen módon, mivel a lapátkerekek nem képesek rögtön reagálni a szélesebbesség vagy irány megváltozására. Ezek a változások jól megérthetőek, ha a szél struktúráját úgy képzeljük el, mint különféle méretű, háromdimenziós örvények sorozatát a fő áramlás mentén. Amint egy örvény elhalad a mérési pontnál, a szélmérő felveszi annak a sebességét az örvény méretével arányos időtartamra. Ezek gyakorlatilag a szellökések.

A legtöbb esetben ezek nem okoznak extra terhelést a szerkezeteken, de ha az örvény mérete megegyezik a turbina méretével, akkor hatása kiterjedhet az egész berendezésre. Három másodperces szélleökés megfelel a 20 m, a 15 másodperces pedig az 50 m átmérőjű örvénynek. Az ilyen szélleökéseket kiváltó örvények mérete megegyezhet a szárnylapátok méretével. Ezért a méretezés során számításba kell venni - a turbina élettartama miatt is - várható legnagyobb szélleökésből származó terheléseket is. Az adott területen a legnagyobb értéket mindig az utolsó 50 évben mért legnagyobb széleseesség jelenti. [Melzer, 2001]

A széljárás megváltozik, amint az időjárási front áthalad. A szélnek ez a változékonysága azt okozza, hogy az elektromos áram termelése is folyton változni fog. A mérési hely szélstatistikája leírja ezeket a változásokat. A szél állandóságának hiánya adott helyen érv lehet a szélturbinák telepítése ellen. Ha előre adott időpontra és területre nem is lehet pontosan jelezni a várható széleseességet, de statisztikai módszerekkel jól becsülhető annak átlaga és maximális értéke. Így az elektromos hálózatra történő táplálás aránya is megmondható a turbina kapacitásának és terhelési tényezőjének függvényében. Ilyen megfontolások alapján a széleenergia hasznosítását „iparszerűnek”, előre tervezhetőnek tekinthetjük. [Dobesch et. al, 2001]

A várható energiatermelésben jó prognózist a szélgenerátorok nagy területen történő csoportos elhelyezése jelent, ami által a helyi széleseesség különbségek kiegyenlítődnek. Természetesen még ekkor is előfordulhat, hogy egy-egy nagyobb anticiklon hatása miatt napokon keresztül az egész térségben csak gyengén fúj a szél.

2.3.6 A szél időbeni változásnak jellemzői

A pillanatnyi szél tehát két részre bontható, a közepes, és a váltakozó összetevőre, mely a turbulencia hatásaként jön létre. Az átlagos szél időben lassan változik, oka a légnyomás változása. Függ az évszakok változásából és az időjárási rendszerekből, melyek általában 3 – 4 nap alatt haladnak át az adott terület felett.

Az éves átlagos széleseesség elfedi a rövidebb ideig tartó változásokat. Mivel a kinyerhető energia a széleseesség köbével arányos, elhanyagolása komoly kihatással lehet az éves energiapotenciál becslésére. E probléma csak a széleseességek várható éves eloszlásának leírásával hidalható át. Ezért egy perces, legfeljebb a 10 perces átlagok mérésére van szükség. A mérés során minden széleseesség tartományban tárolni kell az előfordulások számát, és végül éves összeget kell képezni. Így kapjuk az adott terület széljárásának statisztikai leírását. A legjobb statisztikák készítéséhez a méréseket éveken át - tíz évig - kell folytatni ahhoz, hogy figyelembe vesszük az évek közti eltéréseket is.

Mivel a mintavétel hosszának jelentős szerepe van a statisztikai eredményekre, ezért nagy körültekintéssel kell eljárni. Számos statisztikai eloszlásfüggvényt kipróbáltak a szélességek leírásához, de a gyakorlatban két eloszlás függvény alkalmaznak[Patay, 2002]:

- 1.) Az átlagos szélesség ismeretében az adott helyre vonatkozó szélesség gyakorisága megfelelő közelítéssel adható meg a Rayleigh-féle eloszlásfüggvény segítségével. A v sebességű szél relatív gyakorisága:

$$f(v) = \frac{\pi \cdot v}{2 \cdot v_a^2} \cdot e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_a}\right)^2} \quad [\%] \quad (2.2)$$

ahol v_a az átlagos szélesség

- 2.) Azonban a kétparaméteres Weibull - eloszlás bizonyult a leginkább alkalmasnak azáltal, hogy a szél dinamikáját is figyelembe veszi, így az adatsorokhoz megfelelő pontossággal illeszkedik.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad [\%] \quad (2.3)$$

ahol:

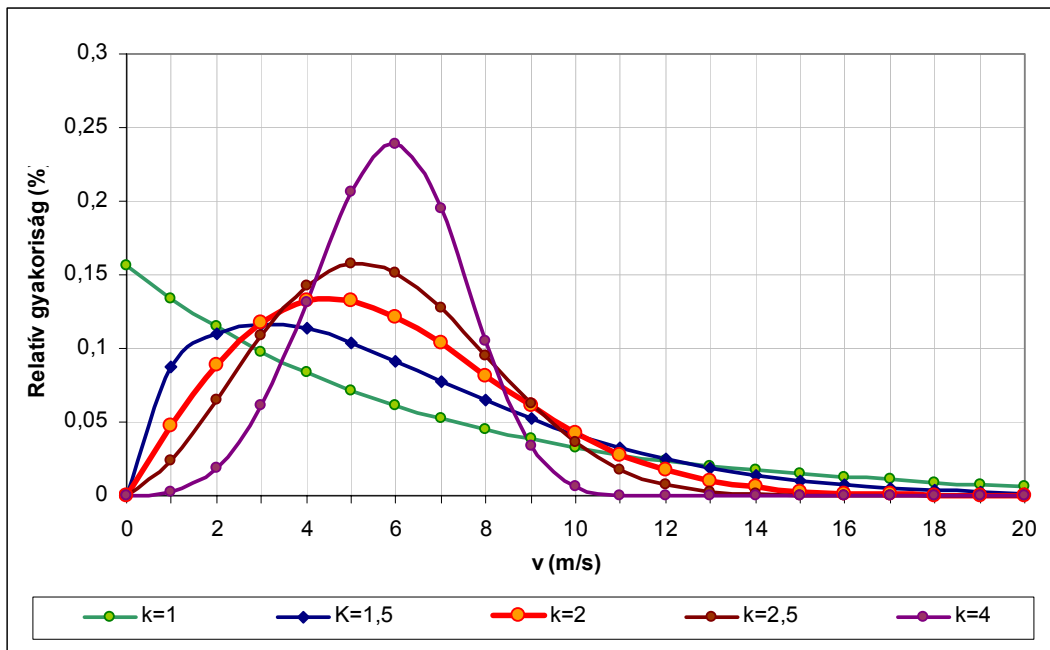
v szélesség (m/s),

c a méret tényező (m/s),

k alaktényező.

Ha $k=2$, akkor megkapjuk a Rayleigh – eloszlást, amennyiben $k=1$, akkor exponenciális eloszlást kapunk (2.14 ábra). Ezek a Weibull – eloszlás speciális esetei. Észak-Európa nagy részén a k tényező közel egyenlő kettővel. A c tényező értéke az adott átlagos szélesség értékével egyezik meg.

A két Weibull-paraméter, k és c , a mérési eredményekből származtatható. Gyakori eset, hogy a Weibull-görbe jól illeszkedik az adatok többségéhez, néhányhoz kevésbé. Ha ezek a kis szélesség-tartományba esnek, vagyis a bekapcsolási sebesség alá, akkor eltekinthetünk a figyelembevételétől, és nem lesz különösebb hatása a becslésben.



2.14 ábra A Weibull eloszlás alakulása különböző k értékek esetén

A szélesség-gyakoriságok matematikai leírása lehetővé teszi a generátorok teljesítmény-görbéivel való összevetést. Így megkapható a turbina éves energiahozáma, valamint lehetséges olyan turbina kiválasztása, be- illetve kikapcsolási szélességének figyelembevételével, mely lehetővé teszi a legnagyobb termelékenységet.

2.3.7 A szél változás a magasság függvényében

A turbulens keveredés az atmoszférában a molekuláris keveredéshez hasonló módon tárgyalható. Mivel a turbulencia a nyíróerők által okozott mechanikai okokra vezethető vissza, a szélesség és a felszín feletti magasság között kapcsolat van [Troen, 1989]:

$$v = \frac{v_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z-D}{z_0}\right) \quad [\text{m/s}] \quad (2.4)$$

ahol

v - adott magasságban a sebesség (m/s),

v_* - a súrlódási sebesség (m/s),

κ - a Kármán – állandó,

z_0 - a felszíni egyenetlenség mértéke,

D - a helyettesítő magasság, mely azt a magasságot jelöli, melyen az áramlás már akadálytalan (m).

A Kármán – állandó értéke általában 0.4. A felszíni egyenetlenség mértéke, z_0 , a területen található növényzettel van kapcsolatban, erre vonatkozóan több forrásból léteznek táblázatok (2.8 táblázat).

2.8 táblázat Egyenetlenségi osztályok

Egyenetlenségi osztály (z_0 tartomány)	z_0 [m]	Terület jellege
3 (0.40-0.26)	1.00	Város, erdő
	0.50	Külváros
	0.30	Fasor, erdősáv
2 (0.13-0.07)	0.20	Cserjék, bozótos
	0.10	Körülzárt mezőgazdasági terület
1 (0.05-0.02)	0.05	Nyílt mezőgazdasági terület
	0.03	Mezőgazdasági terület kevés építménnyel, fával; Repülőtér épületekkel, fákkal
	0.01	Kifutópálya, nyírt füves terület
	0.005	Simított földfelszín
	0.001	Síma havas felület
0 (0.0003-0.00015)	0.0003	Síma homokos felület
	0.0001	Nyílt vízfelszín

A helyettesítő magasság, a D , sík terepen, alacsony növényzetnél nagyon kicsi szám, gyakorlatilag nulla. Nagy egyenetlenségeknél, magas fáknál és épületeknél azonban már nem elhanyagolható. A turbinákat ritkán telepítik városokba vagy erdőkbe, ezért D értéke általában nullának vehető.

A szélsősebesség tetszőleges z magasságban számítható, ha adott z_R magasságban ismert az értéke. A logaritmus-szabály szerint:

$$\frac{v}{v_R} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)} \quad (2.5)$$

ahol:

v a referencia szélsősebesség (m/s), a z_0 magasságon(m)

v_R a szélsősebesség (m/s), a z_R , magasságon (m).

A referencia-magasság a meteorológiai méréseknél általában 10 m, mivel a legtöbb átlagos szélesség érték erről a magasságról származik.

Mérnökök inkább hatványkitevős képletet használnak, a könnyebb kiértékelhetősége miatt..

$$\frac{v}{v_R} = \left(\frac{z - D}{z_R} \right)^\alpha \quad (2.6)$$

Az α kitevő értéke jellemzően 0.1 és 0.5 között változik, a táj felszínének jellegétől függően. A kitevő értéke az egyenletlenségek mértéke alapján kiszámítható.

$$\alpha = \frac{\ln \left(\frac{\left(\frac{z}{z_0} \right)}{\left(\frac{z_R}{z_0} \right)} \right)}{\ln \left(\frac{z}{z_R} \right)} \approx \frac{1}{\ln \sqrt{\frac{z \cdot z_R}{z_0}}} \quad (2.7)$$

ahol

z a mérési magasság,

z_R a referencia magasság,

z_0 a felszíni egyenletlenség mértéke.

Az α kitevő értéke ezen kívül változik még a mérési magasság változásával is.

A szélgenerátorokkal energiatermelés céljából 30-40 méter fölé kell menni, de legfeljebb 100-200 méter talajszint fölötti magasságig tudunk hatolni, így csak ezen magasság érdekel bennünket. Ha a mérőberendezést csak 10-20 méteres talajszint feletti magasságokban tudjuk elhelyezni, a szélességet a megfelelő magasságra át kell számítani.

A földfelszín feletti magassággal növekszik a szélesség. A növekedés a terepalakulattól (a talaj egyenletlenségétől), a gradiens-szélességtől és a függőleges hőmérsékletprofiltól (az atmoszféra egyensúlyi állapotától) függ.

A légkör termikus rétegződése kihat a gyenge szél profiljának a függőlegességére. Erős szél esetén (6 m/s felett), 10 m feletti magasságban, ez a hatás elenyészően kicsi, ha erős, mechanikus turbulencia lép fel (viharok, zivatarok vagy frontok alkalmával kivételek is előfordulhatnak, ha alul igen meleg levegő áramlik).

A gradiens-sebességnek itt annyiban van hatása, hogy az erős szél magassággal kapcsolatos sebességnövekedése kisebb, mint a gyenge szélé. Erős szél esetén a terep egyenletlensége a döntő. A szél magasságtól való függése exponenciálisan fejezhető ki [Lysen, 1982]

$$\frac{v}{v_g} = \left(\frac{h}{h_g} \right)^\alpha \quad (\text{m/s}) \quad (2.8)$$

ahol:

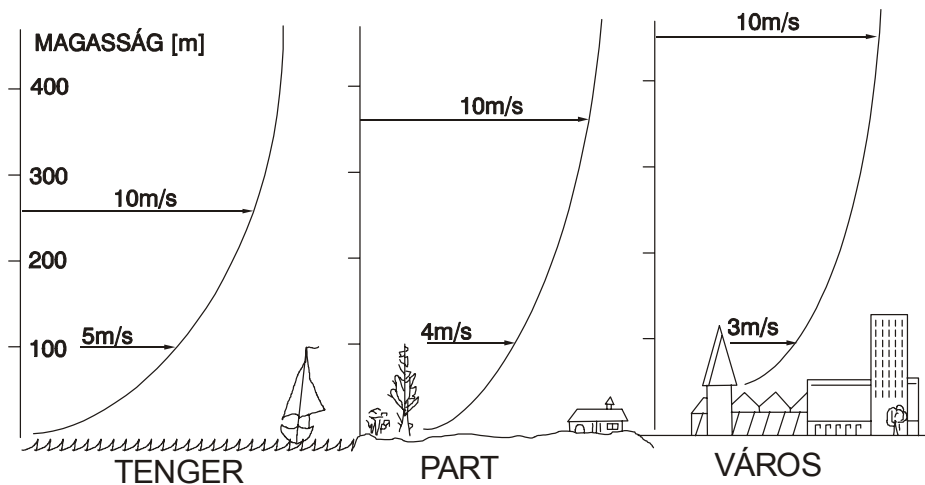
h: magasság (m)

h_g : határmagasság

v: h magasságban mérhető sebesség

v_g : gradiens szél sebessége a határmagasságban

α : a terep egyenletlenségétől (érdességétől), a szélesebességtől függő tényező



2.15 ábra A felszíni egyenletlenségek befolyásoló hatása

A terep egyenletlensége, a beépítés sűrűsége, a meglévő építmények nagysága, valamint a fa-, ill. bokorállomány határozza meg az α értékét (2.15 ábra). Az egyenletlenség nem az egyes akadályok hatásából, hanem számos akadály összegződött hatásából származik [Davenport, 1960]

Davenport vizsgálta ezt, szerinte az α kitevő értéke a földfelszín minőségétől függően a következőképpen alakul:

Sík mező	0,12
Nyílt terep	0,16
Erdős síkság	0,28
Város alacsony épületekkel	0,35
Város magas házakkal	0,50

A felszíni réteg, illetve a talajhoz közeli áramlás pontos ismerete nélkül igen körültekintően kell használni ezt a kifejezést. Mind a kétféle kifejezés csak egyszerűsített módja az igazi szélprofil leírásának. Az érvényességi körük sima, egyenletes területekre terjed ki. Ez azt jelenti, hogy nem foglalják magukba a domborzat hatását, zavaró objektumokat, vagy a felszíni egyenetlenségek változását. A nem homogén területekre ezeknek a törvényeknek módosított változatai használhatók fel, ezekhez táblázatok és grafikonok állnak rendelkezésre [Gasch, 1991]

2.3.8 Atmoszferikus turbulencia

A turbulencia fogalmának pontos meghatározása helyett tulajdonságait és hatásait írják le. Háromdimenziós, a rendkívül gyors keveredéshez kapcsolható jelenség, nagy Reynolds – számok esetén alakulhat ki. A nemlineáris tehetetlenségi erők hatására analitikusan nagyon nehezen kezelhetők, sztochasztikus modelleket kell alkalmazni. A fő áramlás mentén haladó különféle méretű örvényekként lehet elképzelni. A szélesebbé és irányának ingadozása szinte minden frekvenciával létrejöhöz, a jelenlévő örvények méretétől függően.

A turbulens áramlat jelentős mennyiségű energiát tartalmazhat, s ha frekvenciája a szélturbina saját frekvenciája közelében van, komoly dinamikai igénybevételeket jelent. Ha a turbinán végzetes sérülést nem is okoz, a hasznos élettartama csökken az anyagkifáradások révén. Mivel a turbulencia az áramlással együtt jár, nem lehet figyelmen kívül hagyni, hanem a hatását a tervezés során a méretezésnél számításba kell venni [Szlivka, 1999]

A turbulencia erősségének mértékét a következő különbség adja:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0 - T/2}^{t_0 + T/2} [v(t) - v_a]^2 dt \quad (2.9)$$

ahol

$v(t)$ a pillanatnyi szélesebbé,
 v_a az átlagos szélesebbé,
 T a vizsgált időtartam.

A szél viharossága a turbulencia intenzitással mérhető.

$$I_v = \frac{\sigma_v}{v_a} \quad (2.10)$$

A szerkezetek saját frekvenciája általában ismert, illetve módosítható a tervek megváltoztatásával, ha az atmoszférában található frekvenciacsúcsok közelébe esik. A jellemző örvényméret szintén levezethető a spektrumból.

Az elmúlt száz évben a szél és a turbulencia hatása a szerkezetekre jól ismertté vált, a tervezés során nyugodtan lehet építeni ezekre a tapasztalatokra. Másrészt a várható maximális szélsebesség nagysága, ismétlődési periódusa, és az ezekre vonatkozó kockázatelemzések jól dokumentáltak.

A szélturbinák tervezése során szintén figyelembe kell venni a gyorsan forgó rotor-nál kialakuló turbulencia hatását is. Különösen azért, mert az áramlás képe megváltozik, miközben áthalad a szárnylapátok között. Ez fontos lehet, hogyha a rotor leáll, a lehető legkisebb legyen a légellenállása.

2.3.9 A földfelszíni változások hatása

A potenciális szélturbina telephelye körül csak igen ritkán van homogén, lapos terület. Gyakran különféle növények veszik körül, erdős területek, sövények és épületek találhatóak a közelben szétszórtan. Nagyjából a telephelytől számított 10 km-es körön belüli felszíni objektumoknak van érezhető hatása a szélturbina működésére. Természetesen a távolabb lévő dolgok hatása kisebb, mint a közelié.

Ha a tájkép jellege úgy változik, hogy a szél a simább területről érkezik egy egyenetlenebbre, akkor a sebessége csökkenni fog a felszíni rétegben. A nagyobb felszíni súrlódás hatására bekövetkező sebességcsökkenés lassan, a növekvő nyíróerők által, kiterjed az egész légtömegre. Így a felszínnek megfelelő légáramlás alakul ki.

Hasonlóan, ha az egyenetlen területről ér a simább részre, akkor a sebesség növekedése kiterjed az egész profiljára. Természetesen az egész változás lejátszódásához meglehetősen hosszú útra van szükség.

Általában a gyakorlatban az egyensúly beálltát megelőzi egy másik változás, ami oda vezet, hogy egy közbenső határréteg alakul ki, mely a légáramlás irányában a távolság mentén növekszik. Az olyan esetben, amikor az egyensúly beállt elmarad, a szélprofilban törés látható valamilyen h magasságban. Ezen magasság alatt a profil a felszíni változások hatása alatt van, felette pedig még a kezdeti egyenetlenségek mértékének hatása érződik.

Feltételezve, hogy a szél hajtóereje, a geosztrofikus szél, az egész területre azonos, lehetőség van a profil leírására a módosított logaritmus-szabály alapján. Minden további változás a felszín egyenetlenségében hasonló módon kezelhető, amennyiben nem túl rövid távolságon belül történik.

A tájkép jellege még hatással lehet a felszín hőmérsékletére, nedvesség tartalmára, melyek szintén befolyásolhatják a szélprofil alakulását. Ez különösen jellemző nagy, nyílt vízfelszín – szárazföld, illetve jég – szárazföld átmenetknél. Ezeknek a hatása megváltoztatja a profil stabilitását, a függőleges légmozgások szerepe megnövekedhet [Gasch, 1999]

2.3.10 Változások az atmoszferikus stabilitásban

Eddig azt feltételeztük, hogy az atmoszféra semleges, stabil állapotban van. Ez azt jelenti, hogy a légtömeg adiabatikus egyensúlyban van. Miközben ez a légtömeg elmozdul felfelé vagy lefelé, kitér vagy összehúzódik anélkül, hogy energiát vesztené, illetve külső energiát nyerne, és továbbra is egyensúlyban marad az atmoszférával. A semleges stabilitás egy elfogadható közelítés nagy szélességeknél, amikor a nyíróerőknek nagyobb a jelentőségük, mint a felhajtó-erőknek.

Éjszaka a határretegek alacsonyak (30 m, vagy kevesebb), a turbulencia kismértékű, a szélességek szintén alacsonyabbak. Az instabil határretegek a 2 km-es magasságot is elérhetik egy-egy napsütéses nyári napon. A felszín melegíti a nap-sugárzás, a légtömegek emelkednek. Közben a párolgás is jelentős lehet a felszín nedvességtartalmának és az atmoszféra páratartalmának függvényében. Ezek a hatások mind befolyásolják a szélprofil alakulását az alsó néhány tíz méterben.

A logaritmikus szélprofil az alsó 100 méterben továbbra is alkalmazható, megfelelő kiegészítésekkel [Troen, 1989]:

$$v(z) = \frac{v_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad [\text{m/s}] \quad (2.11)$$

ahol

- v_* a súrlódási sebesség,
- k a von Karman – állandó,
- z_0 a felszíni egyenetlenség mértéke,
- z a talaj feletti magasság,
- L_{MO} a Monin-Obukov – féle magasság.

A Monin-Obukov – féle L_{MO} méret, a felszíni hőárammal arányos tényező. Semleges feltételek között ez végtelen nagy, azaz a korrekciós tényező eltűnik.

$$L_{MO} = \frac{T_0}{g \cdot k} \frac{c_p v_*^3}{H_0} \quad [\text{m}] \quad (2.12)$$

ahol

- T_0 a felszín abszolút hőmérséklete,
- H_0 a felszíni hőáram,
- c_p a levegő hőkapacitása állandó nyomáson,
- g gravitációs gyorsulás.

A korrekciós tag két változata van használatban, a stabil és az instabil helyzetre vonatkozóan:

$$\Psi\left(\frac{z}{L}\right) = \left(1 - 16\frac{z}{L}\right)^{1/4} - 1 \quad \text{instabil helyzetre} \quad (2.13)$$

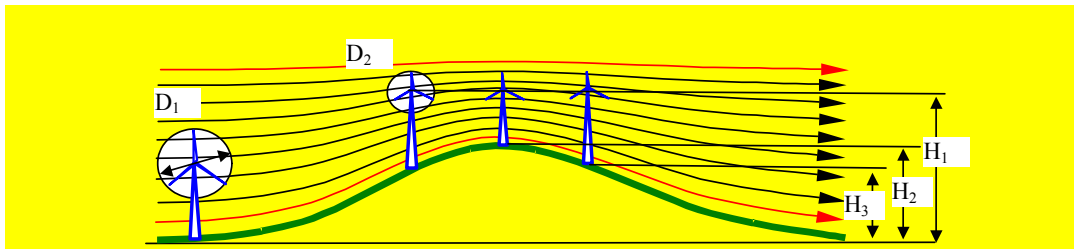
$$\Psi\left(\frac{z}{L}\right) = -4.7\frac{z}{L} \quad \text{stabil helyzetre} \quad (2.14)$$

2.3.11 Akadályok az áramlás útjában

2.3.11.1 Dombok és hegyek

Ezek akadályokat jelentenek a légtömegek áramlása számára. A levegő felettük, vagy azokat megkerülve halad tovább. Ezek mérete és formája jelentős hatással van a kialakuló áramlási képre (2.16 ábra)

Amikor a szél egy sima domb felett halad át, az áramvonalak összenyomódnak, a szélesség növekszik. Ez teszi a dombtetőket különösen alkalmassá a szélturbinák telepítéséhez.



2.16 ábra A szél sima domb felett halad át, az áramvonalak összenyomódnak

A szél felgyorsulása arányos a domb meredekségével [Jackson és Hunt 1975.], amennyiben ez 20-30 fok alatt van, és természetesen függ a növényzet egyenetlenségének mértékétől is. A logaritmus-szabály alkalmazható az összenyomódott áramvonalú területre is, az áramvonalak sűrűsége l . Egy, a felszínhez képest, adott h magasságú dombnak, melynek horizontális mérete L a dombtetőtől addig a pontig, ahol a magassága már csak $h/2$, a gyorsítási tényezője:

$$\Delta S = \frac{\Delta v}{v} = \frac{h}{L} \frac{\ln^2\left(\frac{L}{z_0}\right)}{\ln^2\left(\frac{l}{z_0}\right)} \quad (2.15)$$

ahol

$\Delta v/v$ a szélesség-változás aránya az eredeti szélességhez képest, adott magasságon.

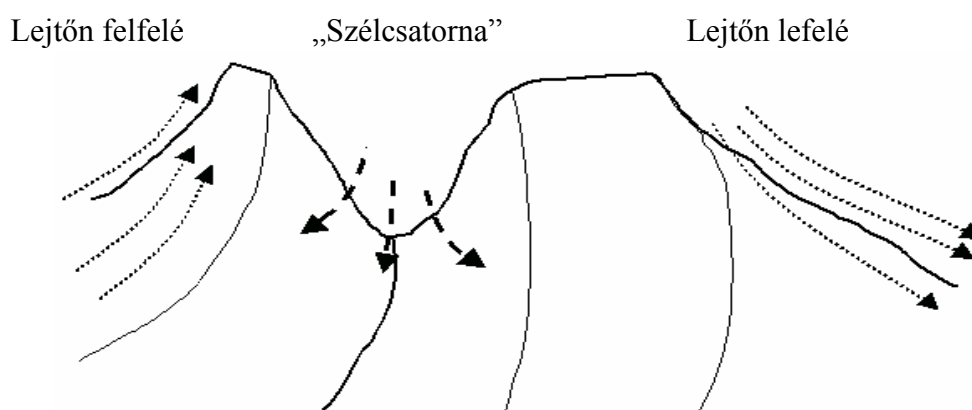
Az l sűrűség $0.1 \cdot L$ nagyságrendű. A gyakorlatban ennek a gyorsítási tényezőnek az értéke $2h/L$ nagyságrendű. Ekkor feltételezzük, hogy az egyenetlenség mértéke a dombon is ugyanakkora, mint környezetében.

Amennyiben a szél egyenetlen terület felől érkezik egy sima dombra, a két tényező is, melyek hatása közelítően összeadható, a légsebesség növekedését okozza. Az ilyen területek ideálisak a szélenergia kinyerésére.



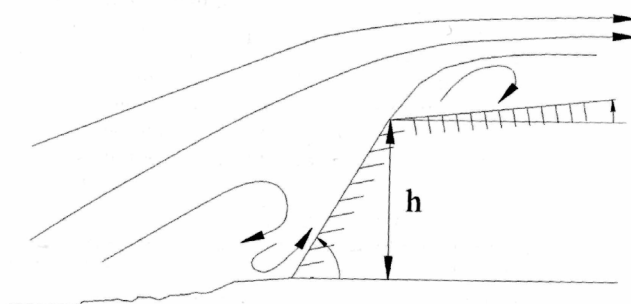
2.17 ábra Magas fasoroknál turbulencia lép fel (különösen a mérőállomások telepítésénél fontos).

Sajnos az ilyen ideális dombok igen ritkák, a területek ennél sokkal összetettebb képet mutatnak. Számos nagy szélességű terület van hegyvidékeken, ahol a hegyek, gerincek felgyorsítják a légáramlást. De az ilyen területeken figyelembe kell venni azt a tényt is, hogy a turbulencia általában nagyobb méretű. Ráadásul a hegyoldalak növényzete gyakran egyenetlenebb, és a gyorsítóhatást ellensúlyozza ennek lassító hatása (2.17 ábra).



2.18 ábra Meredek dombokon kialakuló légmozgások

A meredek dombok, melyek lejtőszöge 30 foknál nagyobb, vagy lehet kisebb is, ha nagyon egyenetlen a felszínük, függőleges falként viselkednek, és az áramlás leválását eredményezik a belépő élnél, vagy a dombtetőn, a domb formájától függően (2.18 ábra). A dombok formája így nem kívánt hatásokat is okozhat a nagyobb turbulencia és az áramlás leválása miatt. Ez esetenként igen kis szélességeket jelent a leválási buborék közelében (2.19 ábra). Mivel a dombok ritkán szimmetrikusak, ezért néhány igen jó áramlási képet hoz létre az egyik irányból, de más irányokból rosszat [Tóth L. et al. 2003]

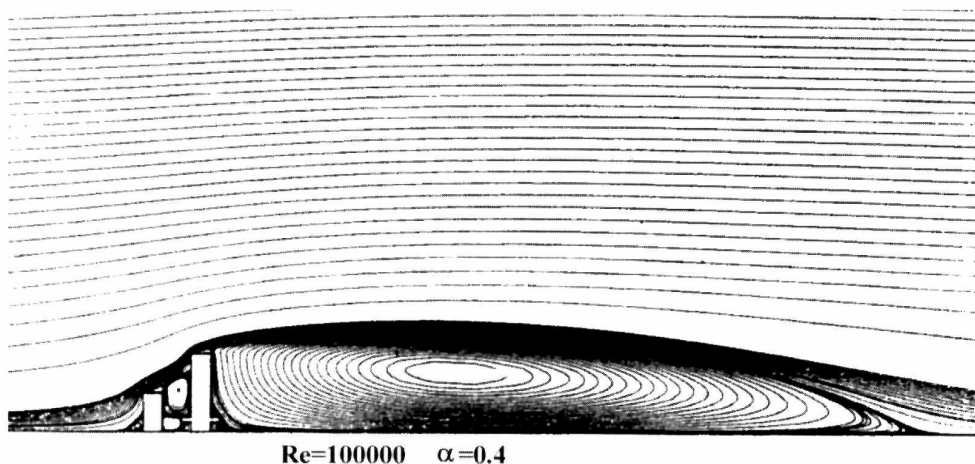


2.19 ábra Hirtelen magasság-növekedésnél turbulencia lép fel.

Számos numerikus modell létezik a domborzat hatásának elemzéséhez, de a legtöbb dombos vagy hegyvidéki terület komplexitása igen megnehezíti a helyzetet. Az atmoszferikus stabilitás gyakran szintén légmozgást okoz, melyet nehéz előre jelezni. Ezen okok miatt a leendő telephely előzetes megfigyelése létfontosságú.

2.3.11.2 Épületek és egyéb akadályok

A turbina közelében lévő épületek, vagy nagy fasorok jelentősen megzavarhatják az áramlás képét. Akadályozzák az áramlást, és turbulenciát okoznak (2.20 ábra). A nagyobb akadályok hatása az áramlásra a magasságának legalább tízszeresén érződik hosszanti irányban, felfelé pedig a kétszeresén.



2.20 ábra Akadályok mögött a kiegyenlítődésk csak nagy távolságban következik be.

Az okozott turbulencia extra terhelést jelenthet a szélturbina részei számára, amennyiben az a turbina komponenseinek mérettartományába esik. Ez kifáradáshoz vagy meghibásodáshoz vezethet a várható időnél hamarabb. Ennek természetesen szigorú gazdasági következményei vannak, amennyiben a beruházás nem térül meg [Troen, 1989].

A turbina elhelyezésére a nagyobb akadályoktól minél messzebb kerüljön sor, ha ez nem lehetséges, akkor a lehető legmagasabb oszlop alkalmazására kell törekedni.

2.3.12 Helyi hőmérsékletingadozások

A különböző felszínek közötti hőmérsékletkülönbség, vagy a napsütés hatásának való kitettség különbsége helyi szelek kialakulásához vezethet. Ezek közül számos a kisebb méretű változata a nagyméretű, regionális szeleknek.

A *tengeri szelek* a szárazföld és a víztömeg hőmérséklet-különbségének hatására jönnek létre, hiszen a tenger általában nyáron hűvösebb, télen melegebb, mint a szomszédos szárazföld. Ez vezet a parti légáramlatokhoz, nyári nappalokon a tenger felől, esténként és télen a tenger felé. Ezeknek a szeleknek jelentős sebességük

lehet, akár 5 – 8 m/s 10 m magasságban a tenger szintje felett. Több kilométeres mélységbe képesek behatolni a szárazföld belseje felé. Tengeri szelet a parttól 50 km-es távolságban is lehet tapasztalni Angliában, vagy akár Ausztráliában is [Simpson 1994.].

A helyi tengeri szeleknek csak az atmoszféra alsó 100 méterére van hatása, ami azonban pont beleesik a szélturbinák működési magasságába, így hasznosíthatják azokat.

A tenger felől érkező szél nincs kitéve akkora felszíni súrlódásnak, ezért a sebessége nagyobb. Általában a tengerparti szélturbina-állomásoknál az átlagos szélesebesség nem olyan nagy, mint a hegyvidéki telephelyeknél, de a tengeri szelek járulékos hatása miatt jól használhatóak. A szélben levő turbulencia is csekélyebb.

A *hegyi szelek* a hőmérséklet különbségekből adódó légáramlás másik formája a hegyvidéki szél. Amint egy völgy oldala felmelegszik a nap folyamán, a légtömegek elindulnak a lejtőkön felfelé, ezt nevezzük felszálló szélnek. A felszín közelében a sebességük alacsony, 3 m/s körüli, energiatermeléshez nem megfelelőek. De a felszálló szél által okozott turbulencia fontos tényező a gerinceken lévő szélturbinák elhelyezése szempontjából.

Este, amint a völgyek alja lehül, a szélirány ellenkező lesz, ezt hívjuk leszálló szélnek. Ezek már némileg erősebbek, különösen a meredek havas lejtőknél, ahol a lehülés intenzívebb. Amennyiben a levegő a völgyben, mint egy csatornában áramlik, vagy keskenyebb réseken halad keresztül, sebessége igen nagy lehet, akár károkat is okozhat. Számos kaliforniai szélfarm alapult ezekre a völgyekben uralkodó sajátos szelekre.

Más leszálló szeleket találhatunk a fennsíkknál. Amennyiben egy fennsíkon hideg, nedves levegő gyűlik össze, és ezt egy közelítő melegebb légtömeg kiszorítja a medencéből, akkor az a gerincen áthaladva a lejtőn lefelé haladva felgyorsul. Az ilyen szelek sebessége igen nagy lehet, elérheti akár a 20 –30 m/s-t is.

A hegyvidéki szél a hegyvonulatok akadályozó hatásának következtében jön létre. Miközben a légtömegek emelkednek, hőmérsékletük lecsökken, a bennük lévő nedvesség lecsapódik. A hegyek túloldalán lesüllyednek, közben hőmérsékletük növekszik. Ilyen jellegű szelek a világ minden táján találhatóak, erejük nagy lehet.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1 A mérés és kiértékelés során alkalmazott összefüggések

3.1.1 A szél mozgási energiája

Mint tudjuk, a szél a légkör termikus egyensúlyának megbomlásából eredő légmozgás, azaz a levegő áramlása.

Az A keresztmetszeten, v sebességgel átáramló levegő (3.1 ábra) tömegárama:

$$m^* = \rho Av \quad [\text{kg/s}] \quad (3.1)$$

amelynek egy másodpercre vonatkozó mozgási energiája:

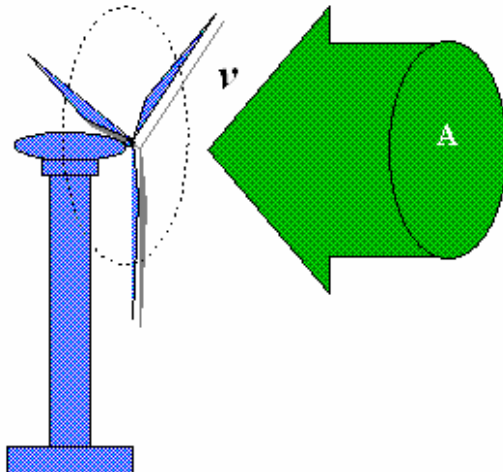
$$P_k = \frac{1}{2}(\rho Av)v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad [W] \quad (3.2)$$

Ahol:

ρ - a levegő sűrűsége [kg/m^3],

A – a vizsgált (pl. generátoroknál a rotor által súrolt) felület [m^2],

v - a zavartalan szél sebessége [m/s].



3.1 ábra A lapátkerék által súrolt felület

Az egyenlet három tényezőre is felhívja a figyelmet:

- A szélenergia arányos a levegő sűrűségével, vagyis a magasabb hegységekben ugyanahhoz a szélesebességhez kevesebb energia tartozik.
- A szélenergia a szélesebesség köbével arányos, ezért igen fontos a nagy szélesebességű helyek kiválasztása. *Kétszer nagyobb szélesebesség nyolcszor több energiát jelent.*
- A szélgenerátoroknál a szélenergia arányos a rotor által súrolt felülettel, vagy a rotor átmérőjének a négyzetével.

A szélérőművek a szélnek csak egy részét képesek hasznosítani, mégpedig

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A v_{\infty}^3 \quad [\text{W}] \quad (3.3)$$

Ez a Betz-maximum, értéke a potenciális 59,3 %-a. A gyakorlatban, részben technikai okokból, és a szél változásai miatt további veszteségek lépnek fel. Ténylegesen 20-30% az, amit kinyerhetünk a meglévő szélenergia potenciálból.

Látható, hogy a turbinák teljesítménye alapvetően függ a szélesebességtől. Teljesítményük a szélesebességet megduplázva a nyolcszorosára, viszont a rotor által súrolt felület megkétszerezésével csupán a kétszeresére fog változni. *Ezért a turbinák telepítési helyének optimalizálása döntő jelentőségű a gazdaságosság szempontjából.*

A turbina karakterisztikájától függetlenül a turbina energia-előállítási képességét a területen mért szélesebességtől függő energiasűrűséggel fejezhetjük ki W/m^2 – ben, példaként ld. a 3.1 táblázatot.

3.1 táblázat A turbina elméleti energia-előállítási képessége

Szélesebesség (m/s)	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0
Teljesítmény* (W/m^2)	76.6	612.5	2067.2	4900.0	95700.3

Megjegyzés: *Normál atmoszféránál, 1.225 kg/m^3 – es légsűrűségnél.

A levegő sűrűsége csökken a hőmérséklet és a magasság növekedésével. A sűrűség értéke körülbelül $0.9 - 1.4 \text{ kg/m}^3$ között változik. E változás hatása lényegesen kisebb a szélesebességénél, ezért a gyakorlatban, például a szélesebesség méréseknél nem szokták figyelembe venni [Patay, 2002]

3.1.2 A szél dinamikus energiaegyenlete

A mi éghajlati viszonyaink között a légköri nyomás csak kismértékben, de a hőmérséklet viszonylag tág határok között változik.

Gázok sűrűségének hőmérséklettől és nyomástól való függése az általános gáztörvényből határozható meg. A p nyomású és V térfogatú, m tömegű és T hőmérsékletű levegőre írhatjuk, hogy [Patay, 1997]:

$$p \cdot V = m \cdot R_l \cdot T \quad (3.4)$$

ahol: R_l : a levegő gázállandója [$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$]

Ezzel a levegő sűrűségfüggvénye:

$$\rho(p, T) = \frac{m}{V} = \frac{1}{R_l} \cdot \frac{p}{T} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (3.5)$$

Az összefüggésekben a levegő ideális gázként szerepel, ami nem nagy hiba, mivel a légkörben extrém nyomások és hőmérsékletek nem fordulnak elő.

A légnyomás – a mi földrajzi szélességünkön – csak kismértékben változik, úgy is mondjuk, hogy ingadozik. A legalacsonyabb légnyomásérték 980 hPa, a legmagasabb 1030-1040 hPa körül van. Ha figyelmen kívül hagyjuk a légnyomás változását, a hibahatárok közelítőleg:

$$h_1 = \frac{p_{\max} - p_o}{p_o} \cong \frac{1040 - 1025}{1025} \cong 0,014 \rightarrow 1,4 \% \quad (3.6)$$

$$h_2 = \frac{p_{\min} - p_o}{p_o} \cong \frac{980 - 1025}{1025} \cong -0,044 \rightarrow -4,4 \% \quad (3.7)$$

Ha a légnyomásváltozást az energetikai számításoknál nem vesszük figyelembe, +4,4, -1,4 %-os hibával dolgozunk. Egész évre vonatkoztatott energia célú szélmérési kalkulációkban a gyakori kétirányú változása miatt el is hanyagoljuk (a pozitív és a negatív hibák kiegyenlítődnek).

A szélturbinák általában a névleges teljesítményüket a névleges szélesebségnél szolgáltatják. A névleges szélesebséget az adott terület széljárásának megfelelően lehet meghatározni, ami gyakran 1.5 – szerese a térség átlagos szélesebségének.

A szélturbina teljesítménye nullától, a bekapcsolási sebességtől a maximális teljesítményig növekszik, amely érték a névleges szélesebségnél van. Ezt követően a turbina folyamatosan a névleges teljesítményt szolgáltatja, mígnem a szélesebség a szerkezetre veszélyessé válik, s ekkor a szabályozó rendszer a turbinát leállítja

(20-25 m/s). A fenti határértékek megismerése céljából egyértelmű, hogy a szélturbinák energiatermelésének pontos meghatározásához a telepítési pontra (területre) vonatkozó éves szélesség-adatbázis ismerete nélkülözhetetlen. A következőkben a széllel kapcsolatban néhány alapfogalmat mutatok be, nem a teljesség igényével.

3.2 A szélenergia-potenciál meghatározása helyszíni mérésekkel

Az adott helyen rendelkezésre álló szélenergia-erőforrás minél pontosabb felbecsüléséhez, a lehetőségekhez képest, a leghosszabb mérési adatsorok felhasználása szükséges. Ezen túlmenően, a szélturbina felállítási helyén a turbulens viszonyok feltérképezése is igen hasznos a tervezési munkához.

3.2.3 Mérési adatok gyűjtése

A meghatározott telephelyre vonatkozó adatok gyűjtésére a telepítés várható helye közelében mérő oszlopot szokás felállítani. Ezekre kerülnek a kiválasztott mérőműszerek. Minden mérési adatot tárolni kell valamilyen formában, vagy a mérés helyén, például szalagon, vagy automatikusan le kell tölteni egy távolabbi helyre, ahol a feldolgozás és tárolás történik. Néhány kapcsolódó fogalom [Patay, 2002]:

Szélesség. A szélesség az a pillanatnyi sebesség, amellyel a levegő adott földrajzi helyen, a terepszinttől meghatározott magasságban mozog.

Jelölése: v , mértékegysége m/s.

Átlagos szélesség. Mivel a levegő mozgását nehéz pontosan követni és leírni, ezért a szél mozgását a légsebesség időbeli átlagával jellemezzük, ami bizonyos esetekben pontatlanságot visz számításainkba. Az átlagos szélesség annál pontosabban jellemzi a levegő mozgását, minél több adat áll rendelkezésünkre az adott vonatkoztatási időtartam alatt. Az átlagos szélesség megadásánál mindig hivatkozni kell a vonatkoztatási időalapra, máskülönben nem értelmezhető. Például: óránkénti, napi, havi, évi, stb. átlagos szélesség.

Az átlagos szélesség az adott földrajzi helyen adott magasságban, meghatározott időtartam alatt mért szélességek számtani átlaga.

Jelölése: v_a , mértékegysége: m/s.

Relatív szélesség-gyakoriság. Mivel a szél energiatartalma a szélesség harmadik hatványával arányos, energetikai számításoknál pontos eredményt úgy kapunk, hogy meghatározzuk az adatsorból az egyes szélességekhez tartozó előfordulást, vagy gyakoriságot. Ha elég kicsi szélesség-tartományokat határozunk meg a gyakoriság megállapításához, többé-kevésbé szabályos eloszlásgörbét kapunk, amelyhez függvény illeszthető. Az eloszlásfüggvény ismerete pedig igen jelentősen leegyszerűsíti az energetikai vizsgálatokat.

A relatív szélesség-gyakoriság egy adott szélesség vagy meghatározott szélesség-tartományba eső szélességek mért vagy számított előfordulása, vagy előfordulási valószínűsége.

Szélirány. A szél iránya mind függőleges, mind pedig vízszintes síkban változhat, de energetikai szempontból a szélirány vízszintes komponense a döntő. A szélirányt az égtájak alapján határozzuk meg.

A szélirány a szél mozgási irányának vízszintes vetülete, amelyet az égtájakhoz viszonyítva adunk meg.

Relatív szélirány-gyakoriság.

A relatív szélirány-gyakoriság egy adott szélirány vagy szélirány-tartományba eső szélirányok mért előfordulása vagy számított valószínűsége.

Összességében kijelenthető, hogy szélesség és irány mérése nélkülözhetetlen, de gyakran nagyon hasznos lehet egyéb meteorológiai mennyiségek mérése is, különösen a hőmérsékleté és a légnyomásé. Ezek lehetővé teszik az adatsorok összevetését más mérési helyről származó adatokkal.

3.2 táblázat Bizonytalansági tényezők a széleenergia méréseknél (Forrás: DEWI)

Bizonytalansági tényezők a széleenergia méréseknél	A lehetséges eltérés (%)
A mérőegységek hitelesítése	0,5 - 3,0
A mérési ponton a turbulencia (függőleges áramlás hatása)	0,5 - 4,0
Az érzékelők helyzete a mérőoszlophoz viszonyítva	0,2 - 3,0
A mérési hely kiválasztása	0,5 - 5,0
A mérés időtartama	0,3 - 3,0
A mérési adatok kezelése, feldolgozása	0 - 2,0
Eltérés a hosszabbtávú mérésektől	0,5 - 5,0
A mérési adatok átszámítása a megfelelő helyre- és magasságra	1,0 - 10,0
Bizonytalanság a végső energiatermelés prognózisára	3,0 - 30,0

A használt mérőműszereknek erőteljes és megbízható kialakításúaknak kell lenniük, hiszen ezeket általában hosszabb időre magukra hagyják, gyakran zord körülmények között (3.2 táblázat). A szélesség és irány mérésehez legalább két magasságban kell elhelyezni a műszereket, 10 méteren, és a szélturbina középmagasságában. Amennyiben a mérési eredményeket a terület felszíni egyenetlenségi fokának meghatározásához is fel kívánják használni, akkor még egy másik magasságban is szükséges mérőműszert kihelyezni.

Az átlagos szélesebességek méréséhez általában ún. kanalas anemométereket használnak, mivel ezek elég megbízhatóak és viszonylag alacsony az áruk. Az ilyen jellegű mérésekhez felhasznált anemométereknek gyakran jobb a karakterisztikájuk mint azoknak, melyeket a meteorológiai állomásokon használnak. A szélirány méréséhez szélzászlókat használnak, melyek csak a horizontális irányváltozásokat érzékelik.

Ha a kialakult turbulenciáról is képet kívánunk kapni, úgy háromdimenziós adatokra van szükségünk. Ezekhez használják az igen drága akusztikus anemométereket, ill. a propelleres anemométereket, melyek viszont kevésbé megbízhatóak. Ezek a műszerek a szél irányának és sebességének a mérését is elvégzik. Az adatvételi gyakoriságnak nagyoknak kell lennie (akár 20 Hz is lehet). Ez igen nagy adatmennyiséget jelent, rövid idő alatt megtelnek az adattárolók, a méréseket ezért csak ritkán lehet folyamatosan végezni.

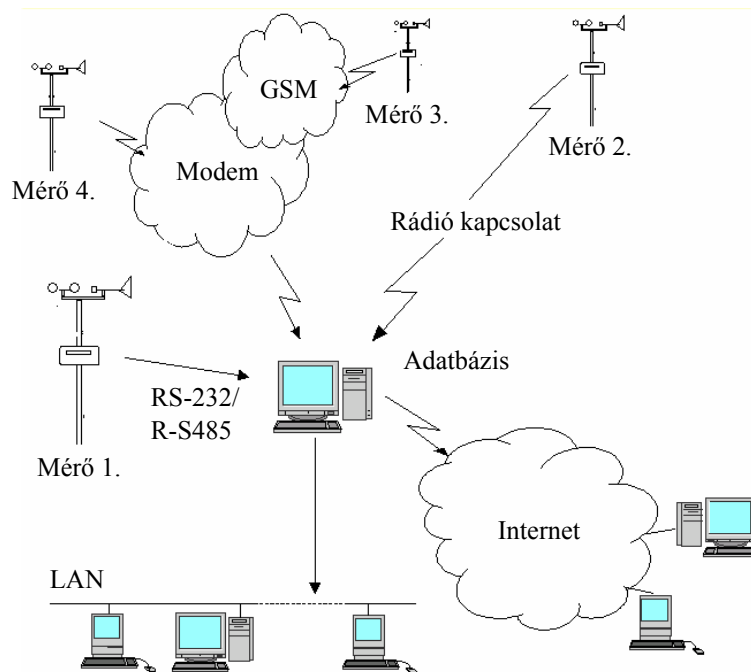
A kanalas vagy a propelleres anemométernek a forgása a szél sebességének nagyságával arányos. Ezt a készülék feszültséggé vagy impulzussá alakítja. Minden forgó rendszerű anemométernek van egy küszöb légsebessége, ahol elkezd működni. Ez általában 0.5-2 m/s között van. Minden forgó rendszerű anemométernek van egy távolság-, és egy idő-állandója. A távolság-állandó a légoszlop hosszát jelenti, melynek a műszer érzékelőjén át kell haladnia mire a műszer a sebességváltozást 63.2 %-ban már érzékeli. Ez függ a levegő sűrűségétől. Az időállandó azt az időt jelenti, mely alatt a műszer már 63.2 %-ban reagál a változásra. Ez a szélesebességgel fordítottan arányos érték. A kanalas anemométerek tehetetlenségéből következik, hogy nagy hibákkal mérik a gyorsuló és a lassuló szeleket.

Minden szélesebességmérő-műszert először légcsatornában kell kalibrálni. Amennyiben az adatgyűjtés hosszú távon folyik, akkor a mérőhelyen szükséges lehet a kihelyezett műszer ellenőrzése egy másik, referencia műszer segítségével.

Az eredményekben torzítást okozhat maga a műszer tartószerkezete, vagy egyéb elhelyezett műszerek is, ezért a műszerek elhelyezése nagy gondosságot követel. Azokat az elemeket, melyek zavart okozhatnak, lehetőleg 9 legkevésbé gyakori szélirányba kell elhelyezni, amit általában ismerünk a meteorológiai szolgálatok adataiból.

Másik fontos tényező az adatgyűjtő megbízhatósága. A berendezés szigeteléséről feltétlenül gondoskodni kell. Lehetőség van az adatok lekérdezésére távközlési eszközökkel, például telefonon keresztül (3.2 ábra). Ennek nagy előnye, hogy az adatokat rendszeresen lehet ellenőrizni, és az esetleges meghibásodásokat igen rövid idő alatt fel lehet tární. Méréseim során is számos esetben volt példa a nagyarányú adatvesztésre vagy adatmódosulásra a víz behatolásának eredményeképpen, mely az energiaellátásban okozott zavart. Az adatgyűjtő-tároló rendszer gondos tervezése elengedhetetlen.

A levegő mozgásállapotára egy adott pillanatban, meghatározott helyen, egy vektor jellemző, melynek nagysága a szél sebességével van arányban, és a mozgás irányába mutat. A vektor leírása kitüntetett x, y, z irányokhoz képest irányszögeivel és abszolút értékével (polár-koordinátaival), vagy x, y, z irányú derékszögű komponenseivel történhet.



3.2 ábra Mérési adatok leolvasásának lehetőségei

Energia előállításban a „szél” fogalmán szűkebb értelemben a domináns vízszintes irányú légmozgásokat értjük, eltekintve – a szerkezet szempontjából egyébként fontos - az alkalmanként jelentős függőleges összetevőktől. A szél mérésére (a jellemző vektor leírására) több módszer áll a rendelkezésünkre:

- mérhetjük külön-külön, egymástól függetlenül a szél irányát illetve a sebességét,
- alkalmazhatunk olyan szélmérőt, melynek érzékelő eleme a mérés pillanatában uralkodó közepes szélirányba fordul és közvetlenül méri a közepes szélvektor abszolút nagyságát,
- megfelelően (a kijelölt irányokhoz képest) rögzített érzékelőkkel külön-külön mérhetőek a szél vektorösszetevői.

A szél irányának (szélirány = ahonnan a szél fúj) megadására a gyakorlatban kétféle megadási mód terjedt el. Az első, melyet az éghajlatkutatásban illetve az időjárás jelentésekben alkalmaznak, mely az úgy nevezett „fő- és mellékirányok” (égtájak) leírásával történik (3.3 táblázat).

3.3 táblázat A szélirányok megadása

Főirányok							
N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Mellékirányok							
NNE	ENE	ESE	SSE	SSW	WSW	WNW	NNW

A szélirányok megjelölése az égtájak angol megnevezéseinek kezdőbetűiből adódik (*N–North* – észak; *E–East* – kelet; *W–West* – nyugat; *S–South* – dél).

A másik jelölési mód esetén, például a fokokat használják, vagyis a szélirány skálának 360 fokos osztása van.

3.2.4 Mérőműszerek

3.2.4.1 Szélzászlók

Összefoglalóan szélzászlóknak nevezzük azokat a mechanikus szerkezeteket, melyek a szél irányának meghatározására szolgálnak. Ezek függőleges tengely körül szabadon elforduló nem szimmetrikus testek, melyek egyik vége, az úgynevezett vitorla, nagy akadályt képvisel a szél útjában amíg a szélirányba be nem fordul. A szélzászlók általában potenciométert működtetnek. Jellemzően a legnagyobb feszültség értékhez az északi irány tartozik (0 fok), a minimum érték nagyjából 357 foknál van. Az eszközök hibája általában plusz-mínusz 2 fok. Mérésnél a tartóoszlop szélárnyékoló hatására tekintettel kell lenni.

3.2.4.2 Nyomólapos szélmérők

A műszer közvetlenül a szél nyomásának a mérésére szolgál. Fő része egy fémlap, melyet a szélkakashoz hasonló szerkezet fordít szembe a széllel. A fémlap egy karon függ, és a szél nyomásának hatására kilendülni, a kilendülés mértéke skáláról leolvasható. A kitérés a szél nyomásától és a fémlap súlyától függ.

A szélnyomás és a kilendülés közötti összefüggés pontos elméleti leírásának hiányában a műszer skálázását kísérleti úton készítették el. A skálabeosztásokat egy vizuális megfigyelésre létrehozott tengerészeti szélskála, az ún. „Beaufort – skála” alapján jelölték ki (3.4 táblázat).

Napjainkban e műszereket nem használják.

3.4 táblázat Beaufort-skála

Beaufort fok (B°)	Vizuális megfigyelés	Szélesség (m/s)
0	Teljes szélcsend.	0 – 0.2
1	Gyenge fuvallat. Füst éppen elhajlik.	0.3 – 1.5
2	Gyenge szellő. Falevelek alig mozognak.	1.6 – 3.3
3	Gyenge szél. Falevelek élénken mozognak.	3.4 – 5.4
4	Mérsékelt szél. Vékonyabb gallyak mozognak.	5.5 – 7.9
5	Élénk szél. Vastagabb gallyak is mozognak.	8.0 – 10.7
6	Erős szél. Ágak mozognak.	10.8 – 13.8
7	Heves szél. Gyenge fatörzsek meghajlanak.	13.9 – 17.1
8	Viharos szél. Kisebb károk.	17.2 – 20.7
9	Vihar. Fák gyökerestől kidőlnek.	20.8 – 24.4
10	Szélvész. Nagy károk.	24.5 – 28.4
11	Heves szélvész. Egyes épületek lerombolása.	28.5 – 32.6
12	Orkán. Egészen nagy és tömeges károk.	32.7 -

3.2.4.3 Rotációs szélesség érzékelők

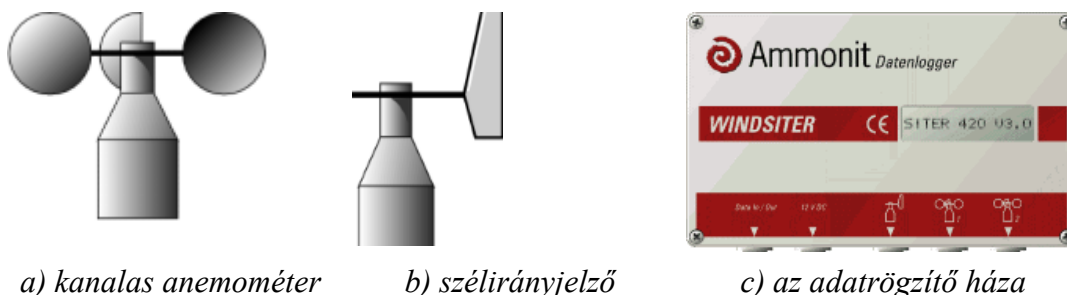
Ezek leggyakrabban használt formája a kanalas szélességmérő az ún. anemométer (3.3 ábra).

Kialakítását tekintve a szabadon forgó, függőleges tengelyre rendszerint három (esetleg négy) kanalat erősítenek. A szélességtől függően a szélnyomás forgásba hozza a kanalakat, illetve a tengelyt.

A forgó tengelyről különböző jelek (mint elektromos kontaktus, feszültség, fényjel) vehetők le, melyek analóg úton, időtengelyen regisztrálhatók, vagy digitális módon memóriában illetve valamilyen háttértárolón rögzíthetők. Az átlagos sebesség a jelsűrűség és az időintervallum alapján számítható.

Ilyen pl. az általunk is használt, az Ammonit cég Windsiter 420 – as jelű adatgyűjtő és feldolgozó egysége. Ez a készülék lehetőséget biztosít két anemométer és egy szélirányjelző által nyert adatok statisztikai feldolgozására. Ezek a korábban jelzett összefüggésekre alapuló statisztikák a szelenergia-potenciál előrejelzést szolgálják. Az érzékelők csatlakozókon keresztül kapcsolódhatnak a központi egységhez.

Az adatgyűjtő programozása, és az adatok letöltése soros RS 232-es csatlakozón keresztül lehetséges, melyet a PC programja illeszt. A statisztikák a műszeren is megtekinthetők, amennyiben nincs egy PC vagy laptop a lekérdezéshez. Lehetőség van az adatok azonnali kinyomtatására is (pl. kézi printer segítségével).



a) kanalas anemométer

b) szélirányjelző

c) az adatrögzítő háza

3.3 ábra Szélenergia meghatározására használt mérőműszerek

A Windsiter processzora minden perc végén kiszámítja az átlag szélesebességet, m/s-ban, 0,1 m/s-os pontossággal, valamint rögzíti a szélirányt. Amennyiben az átlagolási idő egy percre volt állítva, az eredményeket közvetlenül a statisztikába teszi. Ha átlagolási idő tíz perc volt, akkor először a tíz értékből képez egy átlagot, és csak az kerül a statisztikába. A statisztika tartalmazza az átlag és a maximum értékeket, az eloszlást, a szélcsendre vonatkozó analízist, a napi közepes szélesebességet és a szélirányt. A készülék 13 statisztika tárolására alkalmas (lehet havi, heti illetve napi bontású). A 13 mérési periódus vége után felülírja az első statisztikai állományt. Az adatok teljes áramkimaradás után is elérhetők maradnak.

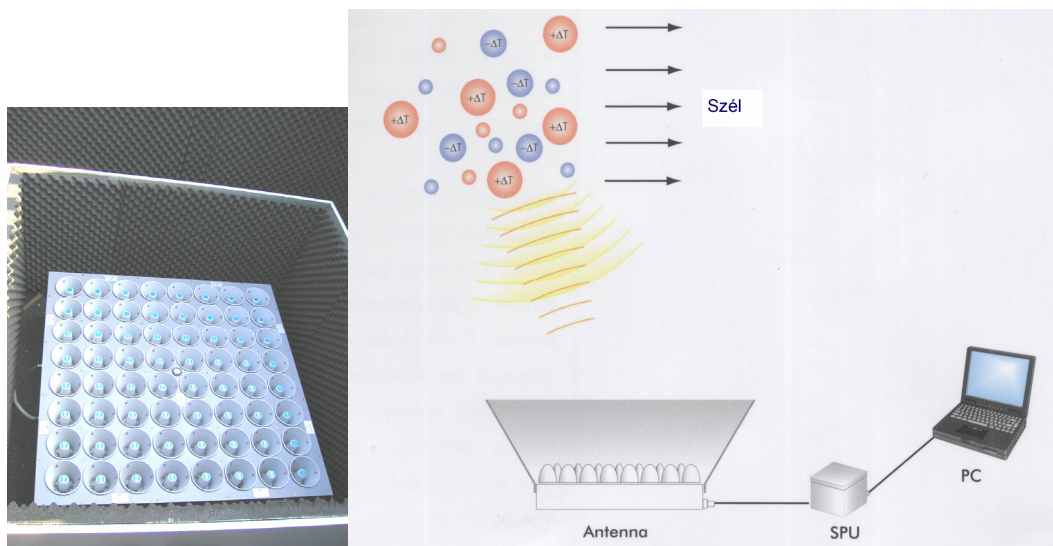
A kanalas anemométerek a legelterjedtebbek napjainkban, működésükről és jellemzőikről számos publikáció szól (pl. Kaganov és Yaglom 1976).

A kanalas rotorokon kívül eltérő kialakításúak is elterjedten vannak használatban. Ilyenek például a lapátkerekek és a propellerek. Ezeket általában a szélzászló végére szerelik fel úgy, hogy mindig szélirányba forduljanak [Tóth L. et al. 2003]

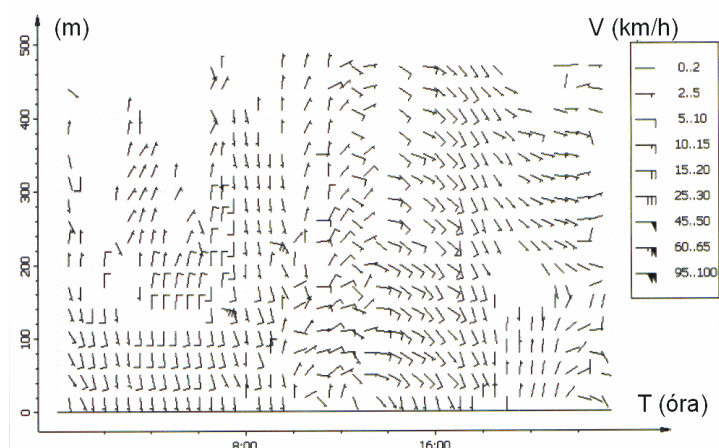
Hődrótos anemométer: A műszer a kis légáramlatok iránytól független mérésére szolgál. Az érzékelő rész egy vékony platinaszál, melyet elektromos úton hevítenek. A platinaszál közepéhez egy termoelem mérőpontja csatlakozik. A termoelem referenciapontja a mindenkori léghőmérsékletet veszi fel. A két hőmérséklet különbségének állandó értéken tartásához, a légáramlás sebességétől függően kisebb vagy nagyobb fűtőáram szükséges. A fűtőáram mérésére szolgáló műszer közvetlenül szélesebesség-skálával van ellátva.

3.2.4.4 Akusztikus szélmérő

Speciális fémkereten hat darab kettősrendeltetésű mérőtest van elhelyezve. Ezek feladata a hangkibocsátás és az érzékelés is. Az egyes mérőtestek által kibocsátott hangimpulzusok a széliránytól és szélsébségtől függően különböző időbeli eltéréssel jutnak el a többi mérőtesthez. Az így nyert adatokat elektronikus berendezés dolgozza fel (3.4 ábra).



a)



b)

3.4 ábra SODAR rendszerű akusztikus szélmérő

a) hangimpulzusokat kibocsátó egységei, az oldalt elhelyezkedő hangelnyelő falak és a rendszer elvi működése b) a mérés vektoros ábrája

Sodar rendszerű akusztikus szélmérő szélirányokra és szélsébségekre jellemző vektorsora úgy jön létre, hogy a számítógép egy-egy vektor „mögé” decimális számok formájában feljegyzi az aktuális szélsébséget is.

A bemutatott műszerek alkalmasak a szélsébség pontos mérésére, a széliránytól függetlenül. Ez természetesen csak akkor valósulhat meg, ha szélárnyékoló objektumok nincsenek a közelben. Mérőállványoknál akkor, ha az árnyékoló tárgy, építmény a magasságához viszonyítva legalább tízszeres távolságban van.

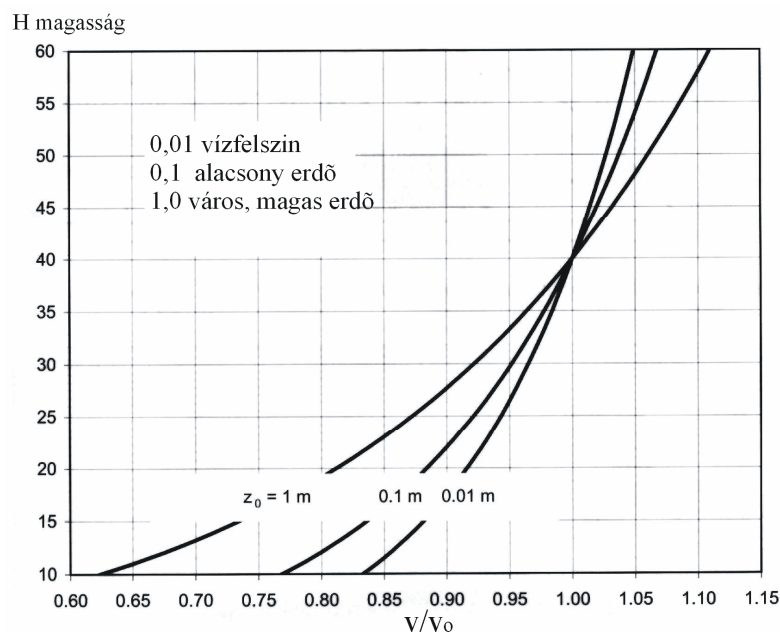
Emellett a helyi nehézségek miatt némely eredmények torzításokat tartalmaznak a szélárnyékok, vagy éppen a kialakuló szélsatornák sebességnövelő hatása miatt (számos mérőállomás található a településekben a háztetőkön).

A szélsébség és széliránymérőket mikroszámítógépek vezérlik, miközben elvégzik a nyers adatok statisztikai feldolgozását is, s perces, vagy órás átlagok formájában adják az eredményeket.

A szél munkavégző képességét leginkább a szél sebessége határozza meg, ezért fontos minél nagyobb pontossággal rögzíteni azt, hogy a helyi viszonyok alapján lehetőség legyen a felállítandó szélerőgép optimális helyének meghatározására.

A mintavételezés általában 1 – 10 másodpercenként történik. Minél nagyobb a mintavétel gyakorisága, annál precízebb eredmények várhatók.

Energiacélú szélméréseket legalább 40 m-es, vagy a fölötti magasságban kell végezni. A jelenleg telepítésre kerülő szélturbinák tengelymagassága 60 – 120 m. A tervezéshez szükséges reális kiinduló adatok megszerzésére alapvetően két lehetőség áll rendelkezésre. A 40 m-es minimális magasság azért is fontos mert a különféle felületek (nem túlságosan eltérő) esetén a sebességhányados (v/v_0) függvényében a függőleges irányú turbulencia értéke (z_0) azonos (3.5 ábra).

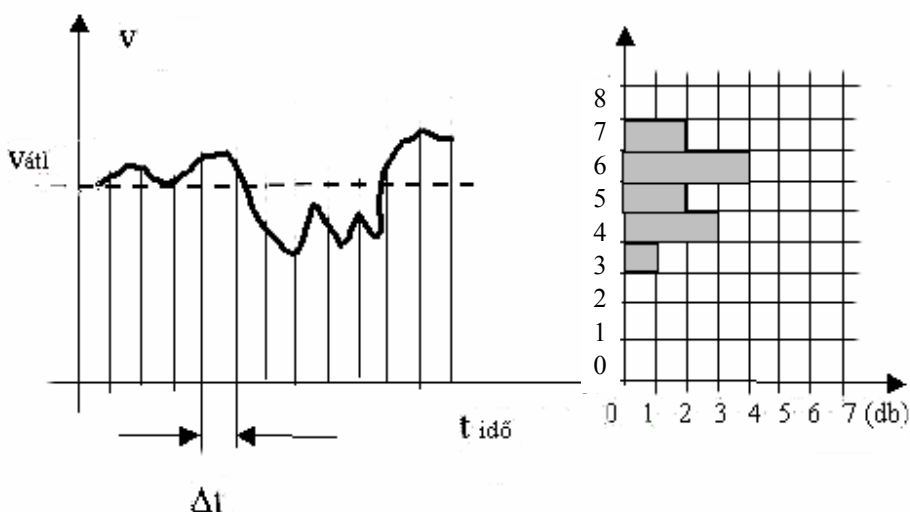


3.5 ábra Turbulencia a sebességhányados és a magasság függvényében
(Forrás: Gasch, 1991.)

3.3 A mérési eredmények elemzése

A mérési adatokat általában percenkénti gyakorisággal rögzítik. A nagyobb frekvenciájú mintavétel lehetőséget ad a turbulens viszonyok megismerésére. Az adatokat mindig minőségi ellenőrzés alá kell vetni, hogy a kirívó, nem reprezentatív adatokat kiszűrjessük. Az adathalmazból általában 10 perces átlagokat készítenek. A mérést egész éven át kell végezni, hogy a szezonális változások megmutatkozzanak.

Ha digitális mérőberendezésünk van, akkor a mérőberendezésen beállítjuk a mintavételi (mérési) időközöket (Δt), amellyel tulajdonképpen közelítjük a szélességi tényleges, szabálytalan függvényét(3.6 ábra). Nyilvánvaló, hogy minél kisebb Δt , közelítésünk annál pontosabb. A műszer a két mérési időpont közötti szélesség-átlagokat méri és ezeket az átlagértékeket **Hiba! A mezők szerkesztésével nem hozható létre objektumok.** tárolja vagy küldi a feldolgozó számítógépbe. A mérési időtartam alatt kapott adatmennyiség a mérési gyakoriságtól függ, a Δt időközök meghatározásánál a tárolókapacitást ezért szigorúan figyelembe kell venni, egyébként adatvesztésig következhet be a mérési ciklus végén.



3.6 ábra A mért adatok osztályba sorolása

Tehát van a t hosszúságú időtartamra vonatkozó $n=t/\Delta t$ számú szélességadatumunk, feladatunk a fajlagos szélpotenciál vagy a fajlagos szélteljesítmény meghatározása. Mint láttuk, a szél energiatartalma a szélesség harmadik hatványával arányos, ezért nem mindegy, hogyan számolunk.

Meteorológiai széladat-feldolgozás esetén az átlagos szélességet egyszerű átlagolással számítják:

$$v_a = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{v}_i}{n} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3.8)$$

Helytelen azonban energetikai számításokhoz ezt a módszert alkalmazni, mert így alábecsüljük a szélben rejlő energiát. Ezért a feldolgozásnál a szélesség-köbök átlagát kell kiszámítani és ennek alapján meghatározni a fajlagos szélteljesítményt:

$$v_a^3 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{v}_i)^3}{n} \quad [m^3 \cdot s^{-3}] \quad (3.9)$$

Bizonyításul, hogy

$$\left(\sum_{i=1}^n \bar{v}_i \right)^3 \ll \sum_{i=1}^n (\bar{v}_i)^3 \quad (3.10)$$

Nézzünk egy példát. Legyen egy 10 mérésből származó adatsorunk az 3.5 táblázat szerint, és számítsuk ki a két módszer alapján kapott fajlagos szélteljesítmény értékeket [Patay, 1997.]

3.5 táblázat Példa a fajlagos szélteljesítmény meghatározásához

I.	$\bar{v}_i [m \cdot s^{-1}]$	4	6	5	7	8	3	5	4	$\sum \bar{v}_i = 53$	$v_a = 5,3$	$v_{al.}^3 \cong 149$
II.	$\bar{v}_i^3 [m^3 \cdot s^{-3}]$	64	216	125	343	512	27	125	64	$\sum \bar{v}_i^3 = 1817$	-	$v_{all.}^3 \cong 182$

A két fajlagos szélteljesítmény viszonya:

$$k = \frac{P_{fI}}{P_{fII}} = \frac{v_{aI.}^3}{v_{aII.}^3} = \frac{149}{182} \cong 0,82, \quad (3.11)$$

azaz közel 20 %-al alábecsüljük a szél energiátartalmát, ha nem a helyes módszerrel számolunk.

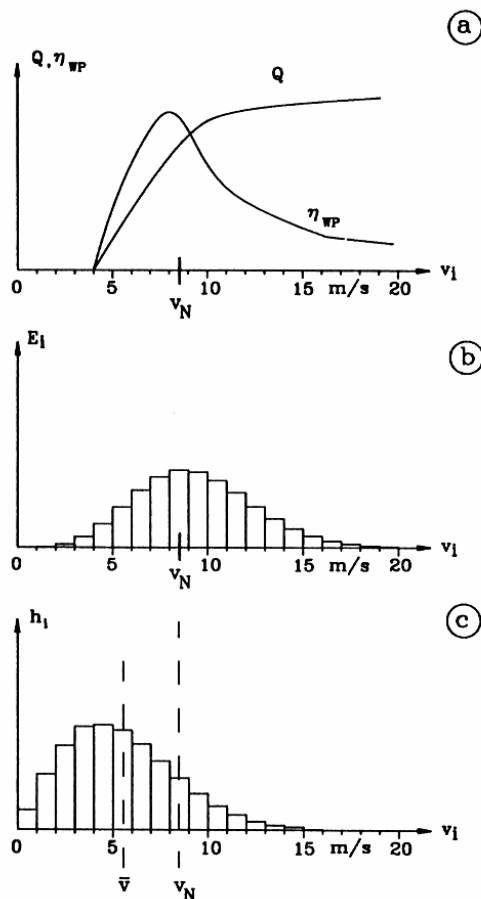
A méréssel felvett adatok pontossága kulcsfontosságú az energetikai előrejelzések szempontjából. Gondoljunk ismét arra, hogy a szél energiátartalma a szélesség harmadik hatványával arányos. Ezért a szélességmérésnél már kisebb hibák is hatványozottan jelentkeznek a szélpotenciál meghatározásában.

Tételezzük fel, hogy egy olyan szélmérővel dolgozunk, amelynek pontossága ± 5 %. Mérési adataink ezért szórnak, minél nagyobb szélesség-tartományban mé-

rünk, a mért szélességértékből számított szélpotenciál annál jobban eltér(het) a tényleges értéktől. Így a mérésnél egy viszonylag kis hiba, pl. a gazdaságosság megítélése során, teljesen téves következtetés levonását eredményezheti.

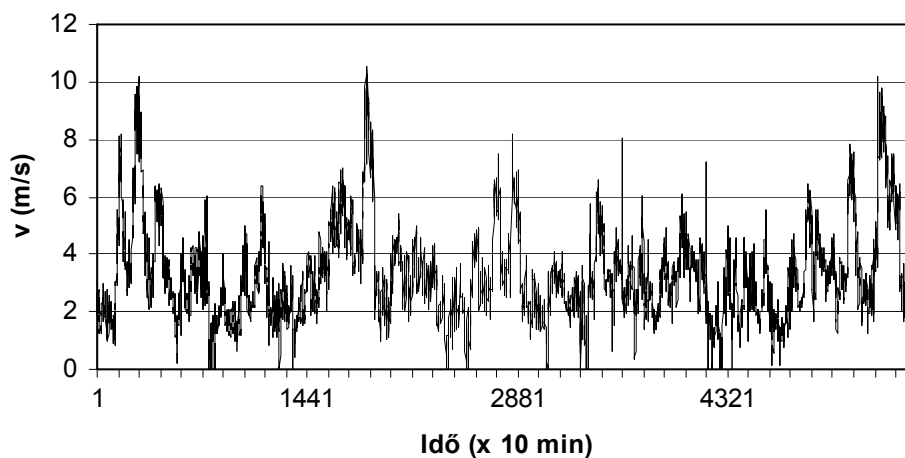
Az adatokat különféle szélesség-osztályokba válogatják szét szélirányonként, vagy összesítéseket készítenek. Az egyes osztályokba eső adatok számának, és az összes mérési adatok számának alapján gyakoriság-eloszlási diagrammokat lehet készíteni.

Az átlagolt és osztályozott mérési adatok az energia meghatározását segítik, de a hely meghatározása céljából fontos ismerni a rövid időtartamú szélesség- és szélirányváltozásokat is a berendezés kiválasztása, szélirány követési képessége, szerkezeti kialakítása miatt (3.7 ábra).



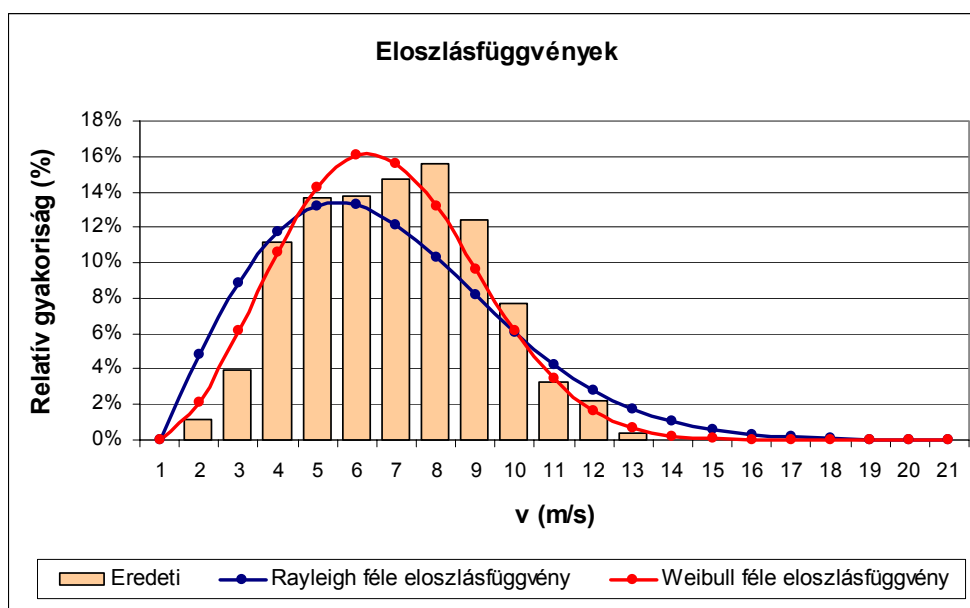
3.7 ábra A szélesség mérési eredmények (a) összefüggése a szélben rejlő energiával (b) és a generátorok teljesítményével, ill. hatásfokával (c), v_N - névleges szélesség, h_i – gyakoriság, \bar{v} – átlagos szélesség, E_l – energia tartalom (kW), Q – generátor teljesítmény, η_{WP} - hatásfok (Forrás: Gasch, 1991.)

A rövid periódusokat is megjelenítő mérések a helyi turbulenciákat tárják fel, azokat a szélökéseket, amelyek esetleg nem hasznosíthatók, de a berendezésekre túlzott igénybevételt jelentenek. Egy rövidebb időszak mérési diagramját szemlélteti a 3.8. ábra.



3.8 ábra 4 hetes időtartam átlagos szélességei 10 perces mérések átlagértékei alapján (15 m magasságban)

A széljárásra vonatkozó legfontosabb információk a szélesség eloszlási statisztikákból nyerhetők ki (3.9 ábra).



3.9 ábra Átlagsebességek relatív gyakoriságának ábrázolása

Ezekből az adatokból meghatározható az átlagos szélesség és a legvalószínűbb szélesség, így megállapítható a szélben rejlő teljesítmény (amely a szélesség köbével arányos) eloszlása.

Ezek az adatok hozzárendelhetők a kétparaméteres Weibull-eloszláshoz, amelynek a paraméterek, c és k meghatározására különféle technikák vannak használatban.

Szélgenerátoroknál a v_i = indulási, v_n = névleges és v_{max} = maximális szélességek hatása az átlagos teljesítményre, eltérése a P_{Gn} = névleges teljesítménytől:

$$P_{G, \text{át}} = P_{Gn} \left[\frac{e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_n}{c}\right)^k}}{\left(\frac{v_n}{c}\right)^k - \left(\frac{v_i}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_{max}}{c}\right)^k} \right] \quad (3.12)$$

A szélgenerátor teljesítménye a $P_G(v)$ értéke az egyes szélesség tartományokban a következő értékeket közelítheti:

$P_G=0$	$(v < v_i)$
$P_G=a+bv^k$	$(v_i < v < v_n)$
$P_G=P_{Gn}$	$(v_n < v < v_{max})$
$P_G=0$	$(v > v_{max})$

Itt az a és b együtthatók értékei, ha k a Weibull eloszlás alaktényezői.

A k és c paraméterek helyi szélviszonyokhoz kell megválasztani, kontinentális viszonyok között, pl.: $1,5 < k < 3$ (rendszerint 2) $c \approx 1,12 v_a$ (v_a = mért átlagos szélesség)

Az átlagos teljesítmény a K_F (lásd fentebbi képlet, 20 % fölött kontinentális viszonyok között elfogadható) kihasználási tényezővel és a berendezés hatásfokával is számolva:

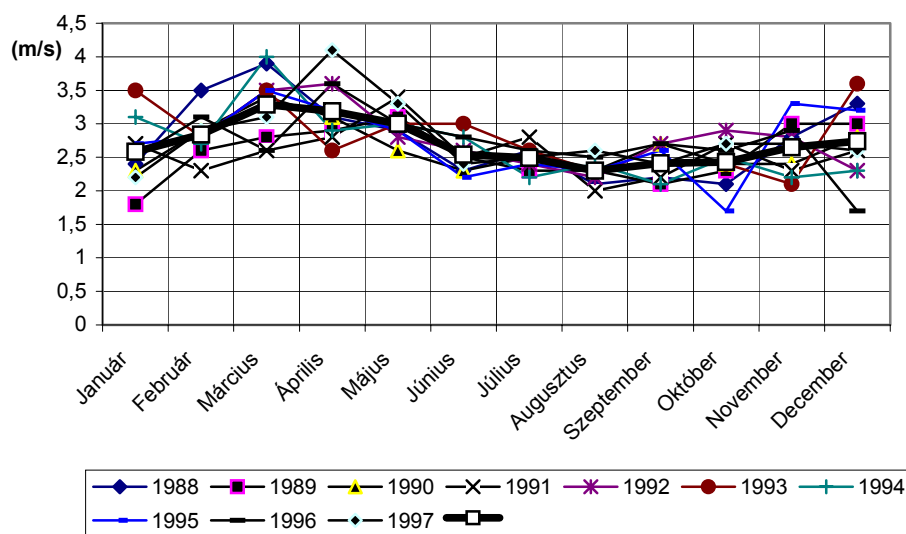
$$P_{G, \text{át}} = P_{Gn} K_F = \eta_e \frac{\rho}{2} A_2 v_n^3 K_F \quad (3.13)$$

Az erőmű éves energiatermelés

$$E = P_{G, \text{át}} t_{év} = K_F P_{Gn} 8760 \quad (3.14)$$

E kitételeket konkrét gépegységekre vonatkozóan igazolják a következő számítások is.

Fontos tudni, hogy a szélesség adatsor, mellyel dolgozunk reprezentatív-e, vagyis nem egy olyan évből származik amely kiugróan szeles, vagy éppen szélcsendes volt. Hogy biztosan megállapíthassuk ezt, legalább 10 évre vonatkozó adatokra van szükségünk.



3.10 ábra 10 év meteorológiai szélmérési adatainak havi átlagai – Debrecen -, a 10 év átlagának bejelölésével (Forrás: Tarr K. 2001)

A 3.10 ábrából látható, hogy az egyes évek havi átlagaiban 20-25 %-os eltérés is előfordul a 10 év átlagától.

Gyakran ez nem túl praktikus egy telephelyre vonatkozóan, sokkal inkább tűnhet előnyösnek egy másik, közeli mérőállomás adataival történő összehasonlítás, és egyfajta mérés-korrelációs-bebecslési (*Measure-Correlated-Predict - MCP*) eljárást alkalmazni, hogy a meglévő adatok kiterjeszthetők legyenek 10 éves időtartamra. Számos ilyen *MPC* eljárás ismert.

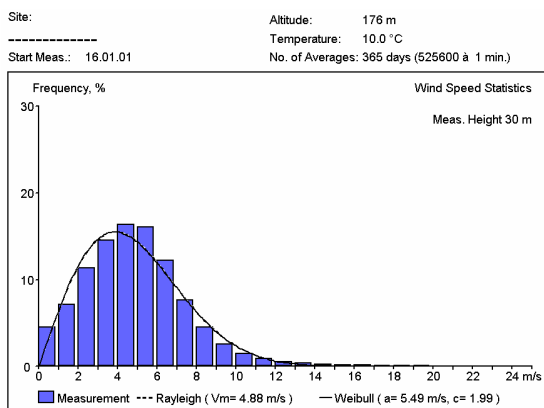
1. Hozzárendelt Weibull-paraméterek – A paramétereket a telephelyre, és a referencia mérőállomásra vonatkoztatva kell meghatározni, a mérési időszakra vonatkozóan viszonyítani kell ezeket egymáshoz, és végül korrekciókat kell végezni a többi adatra vonatkozóan.
2. A telephely és a referencia állomás közti szélesség-faktor számítása a mérési periódus alatt minden szélirány-tartományra vonatkozóan.
3. Egy folyamatos függvény illesztése a mérési periódusra vonatkozó adatokra, majd ennek alkalmazása a többi referencia-adatra.
4. A kiértékelés menetét egy konkrét magyarországi példán keresztül mutatjuk be (a helység megjelölése nélkül).

3.3.1 Éves mérés adatainak kiértékelés

A következőkben egy általános mérést és annak kiértékelését mutatom be. A mérés 15 és 30 m-es magasságokban folyt kanalas anemométerekkel, síkvidéki viszonyok között, mezőgazdasági területeken. A két mérési magassággal a szélprofil ellenőrizhető, a későbbi vetítési magasság miatt. A kiértékelés adatait itt a 30 m-es magasságban kapott értékekkel szerepeltetem (3.11-3.14 ábra).

Wind Speed Statistics 30.0 m

V, m/s	F(meas), %	F(ray), %	F(wei), %
0- 1:	4.46	3.24	3.32
1- 2:	7.09	9.11	9.23
2- 3:	11.28	13.32	13.40
3- 4:	14.49	15.32	15.34
4- 5:	16.29	15.15	15.12
5- 6:	15.97	13.34	13.27
6- 7:	12.17	10.64	10.57
7- 8:	7.64	7.75	7.70
8- 9:	4.46	5.20	5.16
9-10:	2.48	3.22	3.20
10-11:	1.44	1.85	1.84
11-12:	0.89	0.98	0.98
12-13:	0.53	0.49	0.49
13-14:	0.30	0.22	0.23
14-15:	0.19	0.10	0.10
15-16:	0.13	0.04	0.04
16-17:	0.09	0.01	0.01
17-18:	0.05	0.00	0.01
18-19:	0.03	0.00	0.00
19-20:	0.02	0.00	0.00
20-21:	0.00	0.00	0.00
21-22:	0.00	0.00	0.00
22-23:	0.00	0.00	0.00
23-24:	0.00	0.00	0.00
24-25:	0.00	0.00	0.00

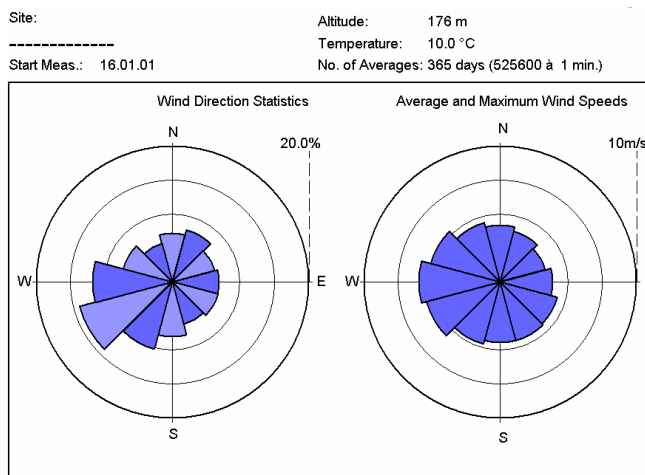


a)

b)

3.11 ábra 30 m magasságban az átlagos szélességek alakulása az év során a mérési adatokkal, valamint Rayleigh és Weibull eloszlási függvények szerint (a – táblázat, b – ábrázolva).

Sector, °	Frq, %	Avg, m/s	Max, m/s
345- 15:	7.3	4.2	0.0
15- 45:	8.0	3.9	0.0
45- 75:	6.5	3.5	0.0
75-105:	6.9	3.9	0.0
105-135:	7.1	4.3	0.0
135-165:	6.5	4.5	0.0
165-195:	8.1	4.5	0.0
195-225:	10.3	4.8	0.0
225-255:	14.1	5.6	0.0
255-285:	11.8	6.0	0.0
285-315:	7.5	5.3	0.0
315-345:	5.9	4.5	0.0

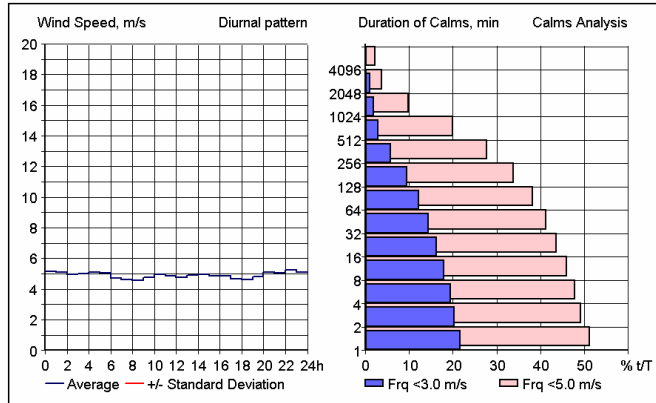


3.12 ábra Szélirányok %-os alakulása az év során (táblázat) illetve az átlagos szélességek a szélirányok %-os alakulása szerint az év során

Calms Analysis

Calms, min	t/T(<3.0), %	t/T(<5.0), %
≥ 1	21.7	51.2
≥ 2	20.4	49.3
≥ 4	19.4	47.9
≥ 8	17.9	46.1
≥ 16	16.2	43.7
≥ 32	14.3	41.2
≥ 64	12.1	38.3
≥ 128	9.5	33.8
≥ 256	5.7	27.7
≥ 512	2.9	20.1
≥ 1024	1.8	9.9
≥ 2048	0.9	3.8
≥ 4096	0.0	2.2
Average, min	12	21
Maximum, min	2205	5557

Site: ----- Altitude: 176 m
 Start Meas.: 16.01.01 Temperature: 10.0 °C
 No. of Averages: 365 days (525600 á 1 min.)



a)

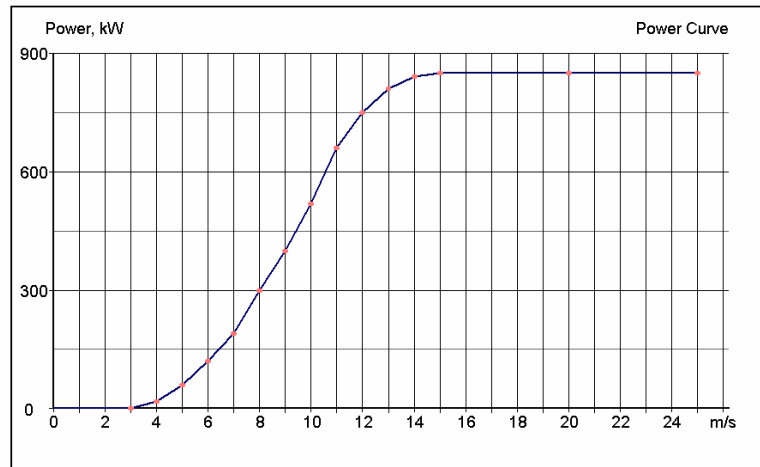
b)

3.13 ábra A szélesebbég analízis: a) - a napi órás átlagos szélesebbég eloszlás, b) a 3, ill. kisebb, valamint az 5, ill. kisebb szélesebbégek % aránya az év során.

V, m/s	Power, kW
0.00:	0.00
1.00:	0.00
2.00:	0.00
3.00:	0.00
4.00:	20.00
5.00:	60.00
6.00:	120.00
7.00:	190.00
8.00:	300.00
9.00:	400.00
10.00:	520.00
11.00:	660.00
12.00:	750.00
13.00:	810.00
14.00:	840.00
15.00:	850.00
16.00:	850.00
17.00:	850.00
18.00:	850.00
19.00:	850.00
20.00:	850.00
21.00:	850.00
22.00:	850.00
23.00:	850.00
24.00:	850.00

Wind Energy Converter:
Vestas V52

Catalog: WEC.CAT
 Hub Height: 60.0 m
 Control: PITCH



a)

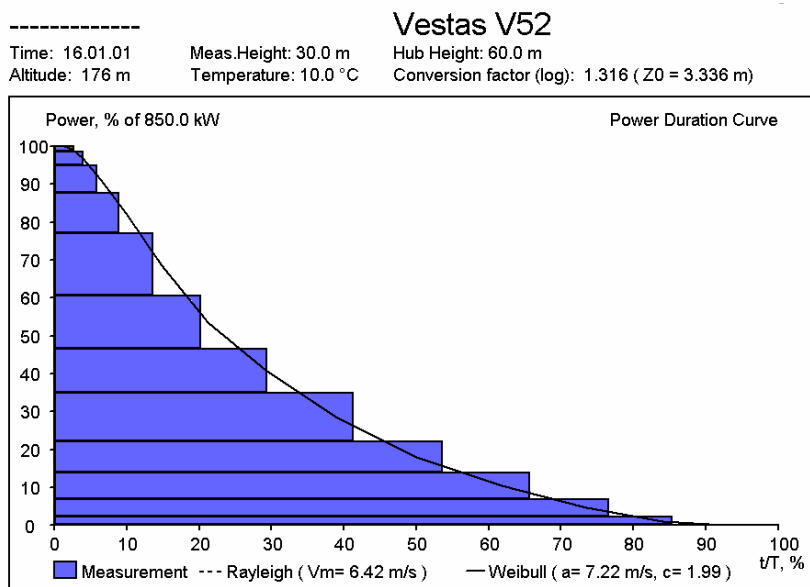
b)

3.14 ábra Példa a választott VESTAS 800 kW névleges teljesítményű Pitch rendszerű generátor teljesítmény jelleggörbéje a szélesebbég függvényében (a – táblázat, b – grafikon).

A 3.6 táblázat a teljesítményt és az energiatermelést és a gépkihhasználást mutatja 60 m magas tornyon, VESTAS 800 kW névleges teljesítményű Pitch rendszerű generátor esetén, a mérési adatokkal, valamint Rayleigh és Weibull eloszlási függvényekkel számítva.

3.6 táblázat A VESTAS 800 kW adatai alapján 60 m-es tornyon

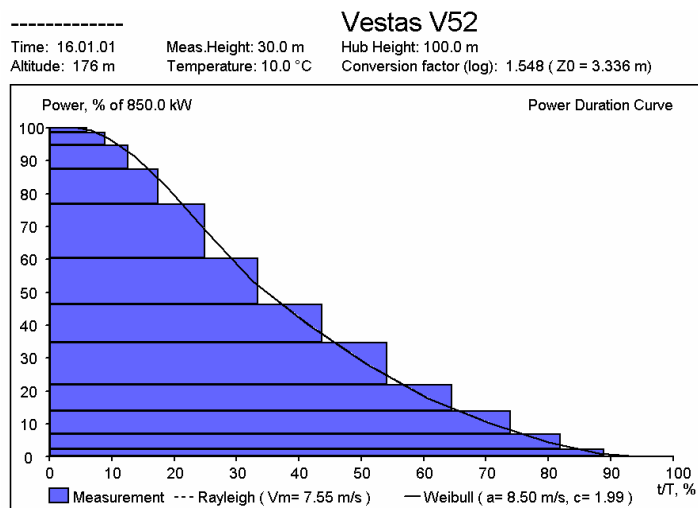
V, m/s	Power, kW	t/T(meas), %	t/T(ray), %	t/T(wei), %
0- 1:	0.00 - 0.00	100.00	100.00	100.00
1- 2:	0.00 - 0.00	96.61	98.11	98.06
2- 3:	0.00 - 0.00	91.85	92.66	92.53
3- 4:	0.00 - 19.79	85.28	84.24	84.03
4- 5:	19.79 - 59.38	76.58	73.72	73.45
5- 6:	59.38 - 118.75	65.56	62.10	61.82
6- 7:	118.75 - 188.02	53.54	50.36	50.09
7- 8:	188.02 - 296.88	41.26	39.31	39.08
8- 9:	296.88 - 395.83	29.43	29.54	29.36
9-10:	395.83 - 514.59	20.18	21.36	21.24
10-11:	514.59 - 654.64	13.65	14.87	14.80
11-12:	654.64 - 746.24	8.99	9.97	9.93
12-13:	746.24 - 807.28	5.84	6.43	6.42
13-14:	807.28 - 838.54	3.96	3.99	3.99
14-15:	838.54 - 849.48	2.74	2.39	2.39
15-16:	849.48 - 850.00	1.87	1.37	1.38
16-17:	850.00 - 850.00	1.25	0.76	0.77
17-18:	850.00 - 850.00	0.85	0.41	0.41
18-19:	850.00 - 850.00	0.60	0.21	0.21
19-20:	850.00 - 850.00	0.43	0.10	0.11
20-21:	850.00 - 850.00	0.29	0.05	0.05
21-22:	850.00 - 850.00	0.19	0.02	0.02
22-23:	850.00 - 850.00	0.12	0.01	0.01
23-24:	850.00 - 850.00	0.08	0.00	0.00
24-25:	850.00 - 850.00	0.04	0.00	0.00
25-26:	850.00 - 0.00	0.02	0.00	0.00
26-27:	0.00 - 0.00	0.00	0.00	0.00



3.15 ábra VESTAS 800 kW adatai alapján 60m-es tornyon

A 3.15 ábra az energiatermelést és a gépkihhasználást mutatja, valamint a gépkihhasználást 60 m magas tornyon, VESTAS 800 kW névleges teljesítményű Pitch rendszerű generátor esetén, a mérési adatokkal, valamint Rayleigh és Weibull eloszlási függvényekkel számítva, az átlagos szélsébségek 30 m-ről 100 m-re átszámítva.

A 3.16 ábra az energiatermelést és a gépkihhasználást, valamint a gépkihhasználást mutatja 100 m magas tornyon, VESTAS 800 kW névleges teljesítményű Pitch rendszerű generátor esetén, a mérési adatokkal, valamint Rayleigh és Weibull eloszlási függvényekkel számítva, az átlagos szélsébségek 30 m-ről 100 m-re átszámítva.



3.16 ábra VESTAS 800 kW adatai alapján 60m-es tornyon

3.7 táblázat Az energiatermelés és a gépkihhasználás összehasonlítása

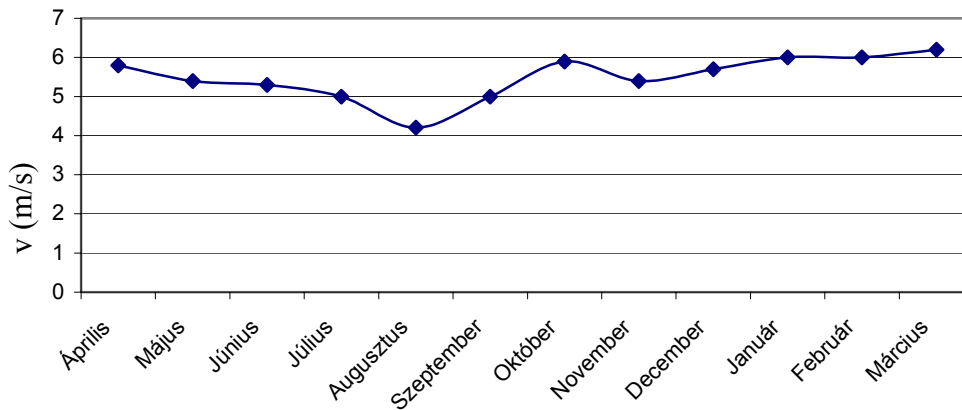
a) 60 m illetve b) 100m magas torony esetén.

A termelési növekmény: 735 400 kWh/év.

<p>Calculated from Measurement:</p> <p>Average Power: 222.3 kW</p> <p>Energy (meas.): 1947.0 MWh</p> <p>Capacity Factor: 26.1 %</p> <p>Calculated from Rayleigh Distribution:</p> <p>Average Power: 220.5 kW</p> <p>Energy (meas.): 1931.2 MWh</p> <p>Capacity Factor: 25.9 %</p> <p>Calculated from Weibull Distribution:</p> <p>Average Power: 219.3 kW</p> <p>Energy (meas.): 1921.5 MWh</p> <p>Capacity Factor: 25.8 %</p>	<p>Calculated from Measurement:</p> <p>Average Power: 306.2 kW</p> <p>Energy (meas.): 2682.4 MWh</p> <p>Capacity Factor: 36.0 %</p> <p>Calculated from Rayleigh Distribution:</p> <p>Average Power: 301.3 kW</p> <p>Energy (meas.): 2639.8 MWh</p> <p>Capacity Factor: 35.5 %</p> <p>Calculated from Weibull Distribution:</p> <p>Average Power: 299.8 kW</p> <p>Energy (meas.): 2626.5 MWh</p> <p>Capacity Factor: 35.3 %</p>
--	--

a)

b)



3.17 ábra Éves átlagos szélsebességek alakulása
(Kulcs 1999.)

Az adott mérési év havi szélsebesség átlagait össze kell hasonlítani a hosszabb távú függvényekkel (3.17 ábra). Jó korreláció estén a turbina várható éves energiatermelése várhatóan néhány százalékkal eltéréssel megegyezik a várható valós adatokkal. Természetesen az adatok különféle turbina típusokhoz is kipróbálhatók, hogy az optimális konfiguráció kerüljön kiválasztásra.

A szélérőgépeket energiatermelés céljából tehát az előzőek miatt célszerű minél magasabbra telepíteni. Már említésre került, hogy a szélmérő berendezéseket általában csak kisebb magasságban lehet telepíteni. Minden esetben fontos, hogy a sebességet két magasságban végezzük, s ezzel a szélprofil is ellenőrizhető, a kalkulációnak kisebb hibát követünk el. Már bemutattuk, hogy tapasztalati összefüggések alapján jó közelítéssel számítani tudjuk a szélsebességet – pontosabban annak valószínű értékét – tetszőleges magasságban egy mérési magasság szélsebesség értékéből is. Ha a h_1 magasságban mért (átlagos) szélsebesség v_1 , a h_2 magasságban valószínű érték:

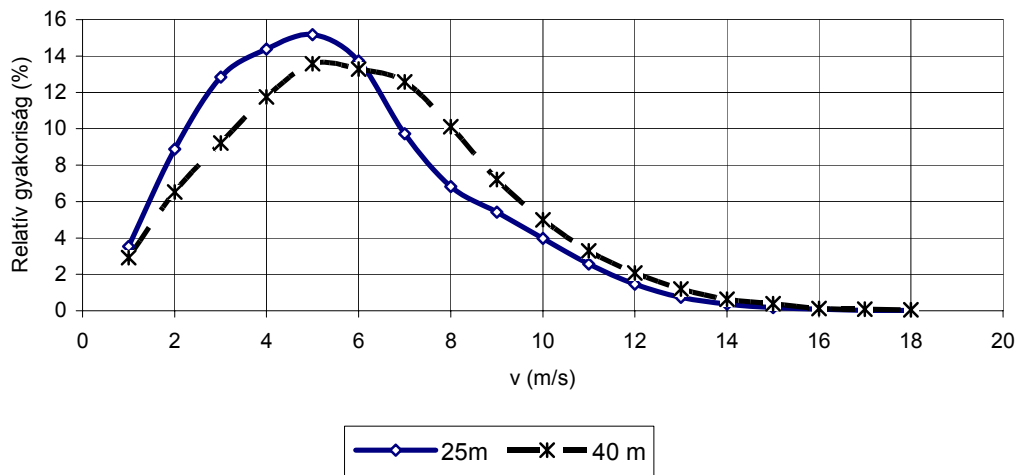
$$v_2 = v_1 \cdot \sqrt[5]{\frac{h_2}{h_1}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3.15)$$

Az előbbi összefüggést főként a mérnöki energiaszámításoknál használjuk. A szakirodalomban számos egyéb ajánlás is található, a meteorológiában például a már ismertetett logaritmus-függvényeket használják.

A kitevő értékének helyes megválasztására mutatom be a következő példát (3.8 táblázat). Ha a mérést csak egy ponton végeznénk el, a korrekciónál az 5-ös gyök-kitevőt választanák. Mivel a mérés két ponton folyt, a kitevőt ellenőrizni tudtuk (3.18 ábra).

3.8 táblázat A mérés eredményei

Szélesség - v (m/s)	Gyakoriság (%) - 25 m	Gyakoriság (%) - 40 m
1	3,54	2,91
2	8,88	6,53
3	12,84	9,21
4	14,38	11,74
5	15,18	13,57
6	13,74	13,27
7	9,73	12,57
8	6,83	10,11
9	5,41	7,21
10	3,98	5
11	2,56	3,28
12	1,46	2,08
13	0,73	1,19
14	0,37	0,63
15	0,17	0,39
16	0,08	0,12
17	0,02	0,08
18	0,02	0,05
átlag	5,55	4,95



3.18 ábra Eloszlási függvények a mérések alapján

3.9 táblázat A magassági korrekciós tényezők megválasztása okozta hiba

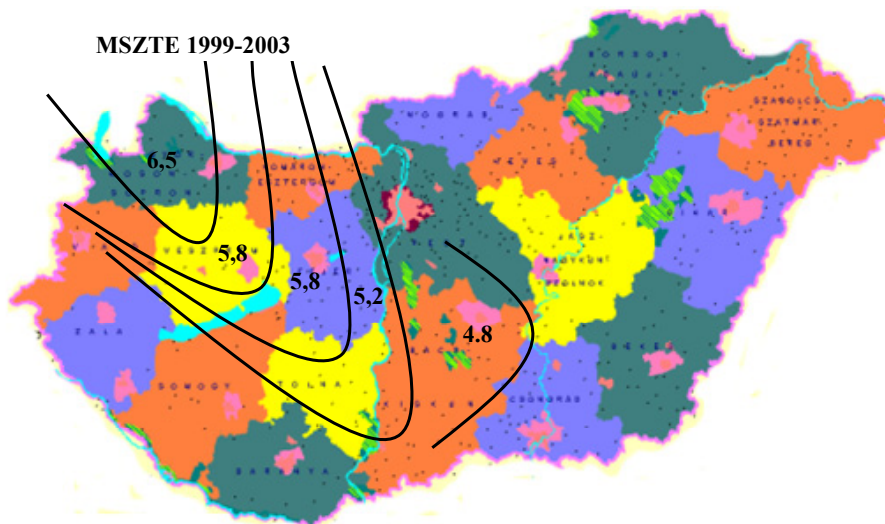
	Magasság		Korrekciós tényező	Kalkulációs hiba	Kihatása az eredményre
	25 m	50 m			
	vátl	vátl	α	kWh/év	Ft/év
Számított értékek	4,95	5,5498	0,165 (1/6)	-102	-1 828
	4,95	5,4544	0,14 (1/7)	-47 767	-859 801
	4,95	5,6861	0,2 (1/5)	70 898	1 276 171
Mért érték	4,95	5,55		0	0

A példából látható, hogy helyesen 6-os hatványkitevőt kellett volna választani, mivel az 5-ös a nyerhető energia felülkalkulálását eredményezi (3.9 táblázat).

3.10 táblázat A magyarországi szélesség-mérési eredmények
1988. évi mérések

Mérés helye	Mérési magasság (m)	V (m/s)	V ₃₀ (m/s)	V ₅₀ (m/s)
Lébénymiklós	41	6.6	6.3	6.8
Környe	30	6.3	6.3	6.7
Mór	26	5.5	5.6	6.0
Balatonszabadi	30	5.6	5.6	6.0
Gerjen	30	5.1	5.1	5.5
Gyöngyöshalász	32	5.9	5.8	6.2
Szentlőrincváta	32	4.5	4.5	4.8
Sándorfalva	41	5.0	4.8	5.2
Tornyospálca	34	4.5	4.5	4.8
Kondoros	50	5.3	4.9	5.3
Kulcs**	35	6.1	6.0	6.4
10 m magasságban végzett mérések és átszámítások(OMSZ mérések alapján)*				
Budapest	10	1.8	2.2	2.4
Debrecen	10	2.5	3.1	3.3
Keszthely	10	3.0	3.7	4.0
Szeged	10	2.7	3.4	3.7
Mosonmagyaróvár	10	2.9	3.6	3.9
Győr	10	2.8	3.5	3.8
Sopron	10	3.6	4.5	4.8

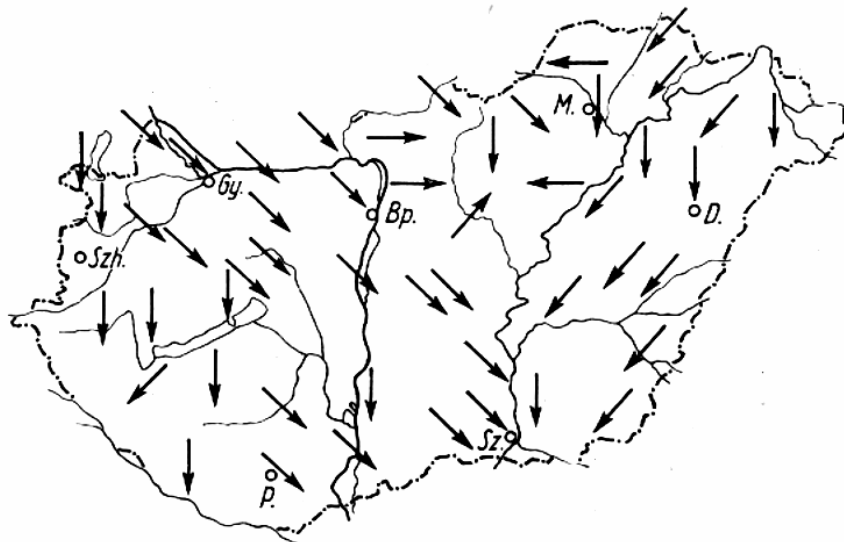
Megjegyzés: * A 10 m magasságban végzett szélmérések igen eltérőek, amint az, az átszámításokból ki is tűnik, összehasonlítva a nagyobb magasságokban végzett mérések eredményeivel; **2000. évi mérés (MSZTE)



3.19 ábra Szélsebességek alakulása 35-45 m magasságban (globális feltételezés ezekben a körzetekben végzett 22 mérési hely alapján)

A valószínűsíthetően alkalmas területek meghatározása után a ténylegesen megfelelő hely kiválasztása szükséges. Ehhez már több mérés elvégzése szükséges az adott helyen, hiszen megfelelő pontosságú és mennyiségű kiindulási adat hiányában mindenféle tervezési feladat eredménye kétségessé válik (3.10 táblázat).

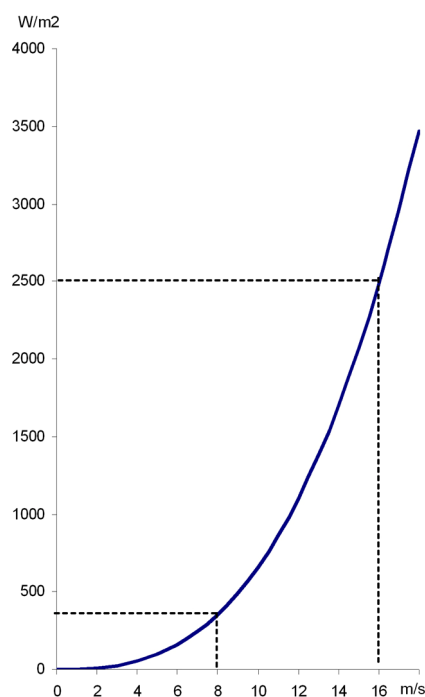
Az optimális telepítési hely kiválasztásához alapvetően kétféle adathalmazra van szükség. Egyrészt a potenciális területek pontos topográfiai adataira, illetve az azokra vonatkozó meteorológiai adatokra (3.19-3.20 ábra): főként az átlagos szélsebességekre és a hozzájuk tartozó gyakorisági értékekre.



3.20 ábra A fő szélirányok alakulása Magyarországon 10 év átlagában (Forrás: Kárpátok hatása az időjárásra, Akadémiai Kiadó)

3.4 Szélergia-potenciál meghatározása modellezéssel

Az előzőkben leírtak alapján láthatjuk, hogy egyes telephelyeken a jellemző széljárás vizsgálata igen hasznos információkat szolgáltat a tervező számára. Ha azonban egyidejűleg több telephelyre, vagy egy nagy használható területre vonatkozó elemzésre van szükség, pl kiterjedtebb szélrómú park, akkor a minden helyszínen történő mérésorozat helyett sokkal gyorsabb és kevésbé költséges eljárás, pl. a modellezés az előnyösebb. Vagyis nem kell minden turbina jövőbeli helyén méréseket végezni. Összetett területeken a szélesség jelentősen változhat az egyes turbinák között, és így a mérések alapján gyakran alul-, vagy túlbecsült energiahozamok adódhatnak az egész farmra vonatkozóan. Ekkor a nagyobb hiba elkerülése végett néhány kontrollmérés lehet indokolt. Ne feledjük, hogy kétszer akkora szélesség ~ 8 szoros fajlagos energiatermelés növekménynek felel meg (3.21 ábra). A modellezés egy újabb eszköz a tervező kezében [Tóth L. et al, 2003]



3.21 ábra A fajlagos szélergia a szélesség függvényében

3.4.1 Fizikai modellezés

A fizikai modellezés a turbina-telephely kismintájának szélcsatornába helyezésével, és a kialakuló szélesség mérésével lehetséges. A terület összetettségének mértéke jól meghatározható a telephely környékére vonatkozóan, illetve a felszín

egyenetlenségének mértéke a szélfelőli oldalon szintén meghatározható. Az áramlás különféle akadályok során áthaladva épül fel a szélcsatorna áramlási kép kialakító szakaszában. A turbulencia, és az atmoszféra struktúrája legalább a semleges állapotra vonatkozóan jól modellezhető különféle áramlásterelő elemek alkalmazásával.

A szélcsatornai mérések közvetlenül összehasonlíthatók a valódi mérési eredményekkel, amennyiben feltételezzük, hogy az áramlási feltételek azonosak voltak. Ezt úgy biztosíthatjuk, hogy különböző, dimenzió nélküli számok értékét, mint a Reynolds-, Peclat- és Froude-számot azonos szinten tartjuk. A gyakorlatban nem lehetséges egy időben az összes érték hasonló szinten tartása, de az áramlás típusának szempontjából a legfontosabbaknál mindenképpen törekedni kell rá. A legtöbb szélturbina tanulmányhoz a Reynold-szám a meghatározó.

A szélcsatornás modell-kísérletek részletes információkkal szolgálhatnak a légáramlás alakulásáról az összes lehetséges telepítési helyre, különféle magasságokra vonatkozóan. Az összetett áramlási képből, illetve a turbulenciából adódó problémák így idejekorán felismerhetők. Különböző telephelyeket lehet ilyen módon tesztelni az elhelyezés optimalizálása céljából (természetesen nem egyidőben, hogy a turbinák egymásra gyakorolt hatása ne okozzon zavart). A kísérletek időtartama inkább csak néhány hét, mint több hónap, de sajnos a szélcsatorna felállítása és a modellépítés eléggé költséges lehet. Az erősen összetett területek esetén a költségek különösen nagyokká válhatnak.

3.4.2 Numerikus modellezés

A nagyteljesítményű számítógépek megjelenése lehetővé tette, hogy matematikai modellek segítségével elemezzük az áramlást a leendő szélfarmokon. A numerikus modellek nagy előnye, hogy a számítások elvégezhetők a bármikor elérhető, alap meteorológiai adatok, vagy rövid, helyi mérési adatsorok alapján. Számos lehetőség kipróbálható, a helyi mérések időtartamának töredéke alatt. Ez különösen akkor nagyon praktikus, ha potenciális telephelyek egész sorozatából kell kiválasztani azt az egy-két helyet, melyeknél további vizsgálatok végzése indokolt. Ezek a matematikai modellek jelenleg nem pótolhatják a konkrét méréseket.

Mindegyik modellnek megvannak a maga korlátai. Néhány modell kimondottan alacsony felbontással (1-2 kilométeres), és különböző, a felszínre és az atmoszférára vonatkozó feltételezések mellett működik. A számos feltételezés többnyire elfogadható, amíg a modellt saját keretein belül használjuk. Így, ha egy modell nincs felkészítve a hőmérsékletváltozás hatásainak figyelembevételére, akkor azt érdemben nem lehet használni erősen felmelegedő, majd lehűlő területekre. A modellek nem működhetnek megbízhatóan ha a fizikai jelenségek matematikai leírása hibás, vagy éppen a felbontás mértéke nem megfelelő, esetleg egyéb olyan kezdeti feltételeket is figyelembe kellene venni, mely magával a vizsgált jelenséggel nincs szoros

összefüggésben. Ezekből kifolyólag a modellek használata nagy körültekintést igényel. Emellett azonban ez egy igen hatásos eszköz, melynek a jelentősége a számítástechnika fejlődésével párhuzamosan növekedni fog.

A numerikus modelleket alapvetően három kategóriába sorolhatjuk. Ezek a kategóriák: a primitív egyenlet-modellek, egyszerűsített fizikai modellek és az objektív elemző modellek.

A primitív egyenlet-modellek az atmoszféra folyamatainak, lehetőségekhez képest legjobb utánzására szolgálnak. A leíró egyenletek háromdimenziósak és az idővel változnak. A bemenő adatok és a peremfeltételek a meteorológiai mérések eredményeiből származtathatóak le.

Az egyszerű fizikai modellek szintén ezeket az egyenleteket oldják meg, de speciális feltételek mellett, melyek lehetővé teszik a probléma összetettségének leegyszerűsítését.

Az objektív elemző modellek sokkal egyszerűbbek és hatékonyabbak, az adatokat interpolálják az egész területre. A bemeneti adatok egy vagy több, a területen található mérőállomásról származnak. Az áramlást az anyagmegmaradás törvénye határozza meg, és a valós folyamatok számos egyszerűsítését tartalmazza.

Ezeknek a modelleknek az egyszerű PC-hez vagy akár a szuperszámítógépekhez kifejlesztett modelljei is elérhetőek, egy-egy feladat kiszámításához elég lehet néhány perc, de néha napokat vehet igénybe. Természetesen a felhasználni kívánt modell kiválasztása is igényel anyagi megfontolásokat. Végezetül a legelterjedtebb modellek bemutatása következik.

3.4.3 NOABL

A NOABL kód, melynek kifejlesztője a Science Applications Inc. Of La Jolla California, az objektív elemző modelleknek egy példája. Csak egy kevés atmoszferikus fizikát tartalmaz, inkább az áramlási kép alakulására helyez hangsúlyt a vizsgált területen. Ennek az alapját képezi az anyagmegmaradás törvénye. Leginkább összetett területekhez alkalmazható, ahol a szélsébség a közepestől az erős tartományig terjed. Ebből kifolyólag a domborzat az áramlást leginkább meghatározó tényező, ez okozhatja szélcsatornák kialakulását, vagy kényszerítheti felgyorsulásra a hegytetőknél.

A bemeneti adatok valamilyen formátumú digitalizált térképet tartalmaznak a vizsgált területről, valamint meteorológiai adatokat, egy vagy több ott található mérőállomásról. Annak igen nagy jelentősége van, hogy a mérési eredmények a vizsgált helyhez minél közelebről származzanak, mert csak így biztosítható a szinoptikus feltételek hasonlósága a két helyen. Az ott mért széljárás adatokat terjesztik ki az egész vizsgált területre. Amennyiben egynél több állomáson történt mérés, akkor a terület pontjaira ezeknek a mérési eredményeknek súlyozott átlagát veszik figyelembe. A távolabbi mérési pont eredményének kisebb a súlyszáma. A szélsébség

változását, függőleges irányban, a felszín egyenetlenségének mértéke határozza meg. A modell nem teszi lehetővé, hogy figyelembe vegyük a felszín egyenetlenségi fokának változásait.

A számításokat a területre gondolatban kiterített háló csomópontjaira kell elvégezni (sűrűbb háló = nagyobb felbontás). A felhasználó bemeneti paraméterként meghatározza az áramlás típusát, úgy, hogy a vizsgált terület domborzata felett, és körül „forrásokat” azonosít. A számításokat a modell a kiindulási adatok alapján a rácspontokra iteratív módszerrel végzi. Az áramlási képet főként horizontálisan vizsgálja, az áramlás módosításai is javarészt a horizontális szélesség változásával lehetségesek. Ez gyakorlatilag az atmoszféra stabil rétegződésének feltételezését teszi lehetővé a határreteg felett, ami a magashegyi területeken túlegyszerűsítést eredményez, hiszen ott a domborzat hatása a troposzféráig kiterjedhet.

A NOABL előnye, hogy viszonylag egyszerű számítási eljárásokat alkalmaz, így gyorsan fut. Hátránya a fizikai egyenletek egyszerűségében és az alacsony felbontásban van.

Egy angliai tanulmányban (Newton és Burch, 1983) a használt felbontás 1-2 km-es volt. Ez csak az egész területre vonatkozó becslésekhez lehet elegendő, de a területen belüli változások kimutatásához már nem, valamint néhány fontos topográfiai elem „kisimítása” miatt jelentős alulbecslésekhez vezethet.

A használata túlságosan lapos területeken nem javasolt, hiszen az alapja az, hogy a domborzat határozza meg az áramlást. Az angliai széleenergia potenciál felméréséhez az egész ország digitális domborzati térképével használták együtt.

Hátrányai ellenére jól alkalmas az elsődleges felmérések elvégzésére nagy területek esetén. Az angliai példa azt mutatja, hogy az eredmények elfogadhatóak, és azóta néhány fejlesztés is történt a modellben [Halliday, 1995]. Ezek a fejlesztések a felszíni egyenetlenségek kezelése és a felbontás javítása terén a legjelentősebbek.

3.4.4 WAsP

A WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) az Európai Szélatlasz megszerkesztéséhez került kifejlesztésre [Troen and Petersen, 1989]. Az egyes szélturbina telephelyek széljárás adatait más, referencia mérőállomások adatai alapján határozták meg. A referencia adatokat általában a meteorológiai állomások hosszú távú adatsorai jelentették.

Ezeket az adatokat gyakorlatilag megtisztították az adott mérési pontra jellemző speciális elemektől. A felszíni egyenetlenségek, domborzati és a szélárnyékoló objektumok hatását eltávolítják a referencia adatokból. Ez után kerül kiszámításra az adott területre a geosztrofikus szélessége az összes szélirány-szektorra. Ebből pedig a felszíni szél, tíz méteres magasságban, meghatározott felszíni egyenetlenségi viszonyok mellett. Ahhoz, hogy ez a megközelítési mód használható legyen, nagyon fontos a referencia hely és a vizsgált részek megfelelő közelsége. Így biztosítható, hogy a két terület szélklímája közel azonos legyen.

Ezek a széljárási adatok kerülnek felhasználásra a turbina helyén, a helyi felszíni egyenetlenség mértékének, domborzatnak és a szélárnyékoló hatásoknak a figyelembe vételével a szerkezet középmagasságában várható széljárás meghatározására.

A WAsP számítási eljárásainak sajátossága, hogy polárkoordinátákat használ, a középpontban a vizsgált helyszín van. Ennek eredményeképpen, a vizsgált hely felbontása igen jó, a csomópontok kb. 2 m-es távolságban vannak egymástól. Ez lehetővé teszi, hogy a hibák mértéke kisebb legyen. A program részben az atmoszféra fizikájának modelljével, részben a széljárás statisztikai leírásával dolgozik.

A fizikai modell a következőket tartalmazza:

- felszíni-réteg hasonlóság – a logaritmikus szabály érvényesülésének feltételezésével,
- geosztrofikus ellenállás törvény – a felszíni szél meghatározására, a Rossby-szám hasonlósága alapján,
- stabilitási korrekciók – lehetővé teszi a semleges stabilitástól való eltérést,
- felszíni egyenetlenség változási modell – lehetővé teszi a változások figyelembe vételét,
- árnyékolási modell – a helyi áramlást akadályozó tényezők figyelembevételére,
- domborzati modell – a domborzati elemek gyorsító hatásának modellezéséhez.

A széljárás statisztikai leírásához a referencia adatokból leszármaztatott Weibull-eloszlást használja fel. Ezt az eloszlást a nagyobb szélességekhez való illeszkedéshez alakították ki, hiszen az alacsonyabb szélességek esetén az energiatermelés is lényegesen alacsonyabb szintű, a kisebb hibák hatása elenyésző. A turbina középmagasságában levő szélesség eloszlást lehet illeszteni az egyes turbina jelleggörbékhez, és a várható teljesítmény valószínűségi görbéje számítható.

A program működésének ellenőrzését az Európai Szélatlasz munkálatai során elvégezték. Ekkor már ismert szélklímájú meteorológiai állomásokra végeztették el a becsléseket. Az eredmények általában elfogadhatóak voltak, de esetenként hibásak.

A hibák a következők miatt adódhattak:

- kalibrációs problémák a mérőműszereknél,
- a felszíni egyenetlenség mértéke túl-, vagy alulbecsült,
- az árnyékoló hatások túl-, vagy alulbecsültek,
- domborzati hatások.

Más ellenőrzéseket is elvégeztek, a turbinák középmagasságába elhelyezett mérőműszerekkel vizsgálták a Weibull-eloszlás érvényességét. Egyéb vizsgálatok folyamatban vannak napjainkban is, a már működő szélfarmok folyamatos eredményei alapján folyik a numerikus modellek tesztelése.

A WAsP alapvetően két fő részre bontható, elemzési és alkalmazási szakaszra.

Ezek a következő számítási blokkokat tartalmazzák:

- a szélmérési adatok (idősorok) elemzése,
- szélátlasz-adatok előállítása (a zavaró hatásoktól „megtisztított” idősorok),
- széljárás meghatározása (a telepítési helyre vonatkozóan, a mérési pont adatai alapján),
- a szélenergia potenciál meghatározása, valamint a turbina jelleggörbéjének függvényében az éves átlagos hozam számítása,
- szélfarmok hozamának meghatározása.

3.5 Magyarországi modellezések

A modellezés egyik helyszíne a Budapesttől ötvenkilenc kilométerre, délre lévő községben, Kulcson (Koordinátái: EOV-x: 640275, EOV-y: 189933) található Öreg Debella domb. A terület mezőgazdasági gyümölcsöskert. A tervezett építési helyszín tengerszint feletti magassága 168 m, átlagosan 25-40 méterrel magasabban, mint a környező területek [Tóth L. et al. 2003].

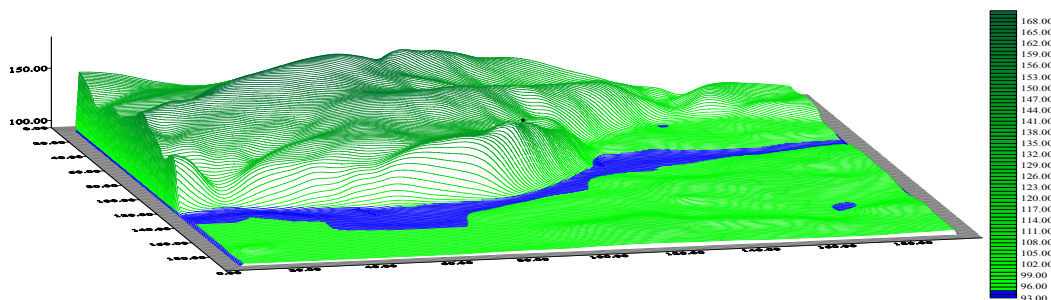
A modell alapvetően kétféle adathalmazt igényel, egyrészt a helyi széljárásra vonatkozó adatokat, átlagos szélsébségeket és szélirányokat, másrészt a terület domborzatára vonatkozókat.

A domborzati adatok digitális formában elérhetők több formátumban is. A szélméréséhez az Ammonit cég Windsiter 420-as jelű műszere került felhasználásra. Ez a készülék lehetőséget biztosított két anemométer és egy szélirányjelző által nyert adatok statisztikai feldolgozására. Ennek megfelelően a szélsébségmérések két magasságon történtek, 15 illetve 35 méteren, a széliránymérő 35 méteres magasságban lett elhelyezve. A szélmérési adatok feldolgozása megegyezett a korábbi ábrákon bemutatottakkal.

A vizsgált területen rendelkezésre álló szélenergia mértékének meghatározásához az Európai Szélátlasz kidolgozása során alkalmazott programot használtam fel, az előzőekben röviden ismertetett WAsP-ot.

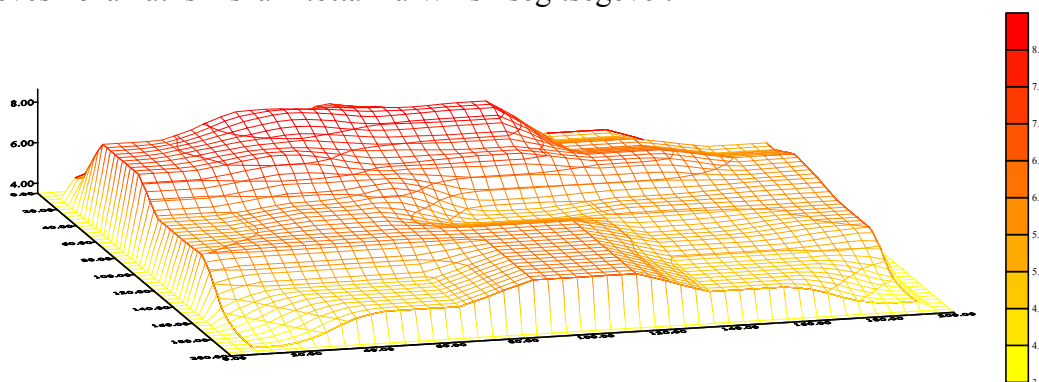
Az európai szélenergia-felméréseknél döntően ezt a modellt használják, és mára szinte nemzetközileg is elismert, szabványos eljárásként alkalmazható. Az így nyert eredmények összevethetőek a nyugat-európai országokban kapott eredményekkel.

A WAsP által kiszámított eredmények alapján a Surfer32 for Windows program segítségével készíthetők el a jól áttekinthető háromdimenziós térképek. Látható a kiindulási domborzati adatok szintvonalas, illetve térbeli rajza (3.22 ábra); a pontok, melyre a WAsP elvégezte a számításait, a nyers széljárási térkép; az izovent széljárási térkép; valamint annak térbeli rajza (3.23 ábra).



3.22 ábra Domborzati modell Kulcsnál a Dunaparton (m)

A terület széljárásának meghatározásán túl, négy különböző kategóriájú szélturbina éves hozamát is kiszámítottam a WAsP segítségével.



3.23 ábra Szélsébségviszony az adott térségben (m/s)

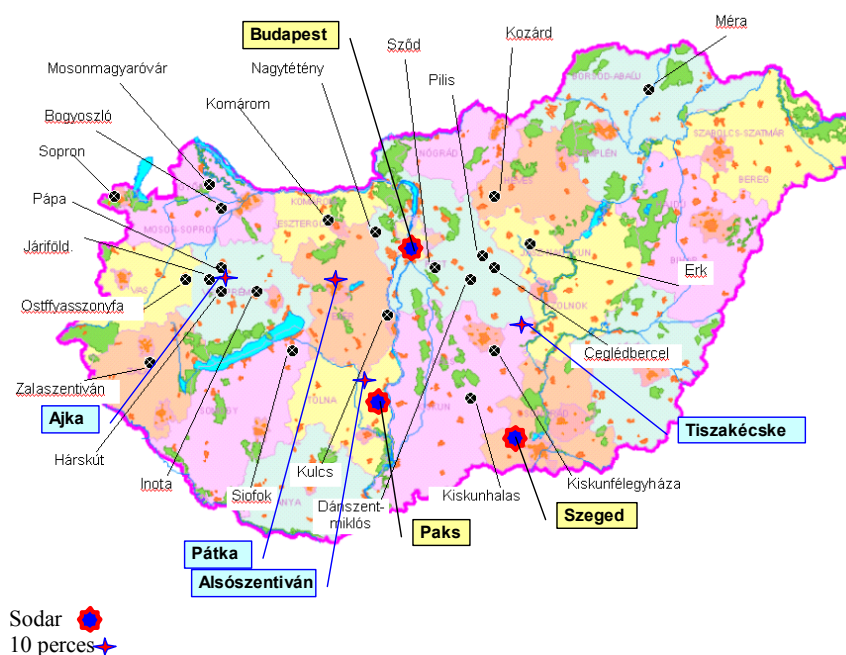
A mérési eredményekből kiszámított széljárási értékek alapján az Öreg Debella domb alkalmas szélgenerátorok telepítésére. Az eredmények azonban rámutatnak arra, hogy Kulcs környékén nem ennek a dombnak a legkedvezőbb a széljárása. Attól Ny-DNy irányba, körülbelül 4 km távolságba eső másik dombnak kedvezőbb, melynek magassága közel megegyezik a mérési hely magasságával, de kedvező alakja, és a környékének kevésbé összetett domborzata jelentős szélsébségbeli különbséget eredményez (a mérési hely kb. 6,4 m/s-os átlagos szélsébsége helyett 7,2 m/s-os átlag várható).

A példától elvonatkoztatva e modellszámítás a mérési pont körüli területekre pontosan számol, de a távolabbi területekre messzemenő következtetéseket nem szabad levonni. Ha kedvezőbbek az eredmények, akkor arra kell törekedni, hogy az egyébként optimális területre is felállítsunk egy mérőállomást. Amennyiben az ottani mérési eredmények is alátámasztják a számított eredmények helyességét, akkor a szél-erőmű felállítását azon a területen célszerű elvégezni.

4. EREDMÉNYEK

Elemző munkám során a szélprofilokkal, a szélgenerátor Magyarországra előnyös típusainak a generátorok magasságának meghatározásával foglalkoztam, ezek bizonyításához a lokális mérésekkel széles adatbázist hoztunk létre, amely azt a célt is szolgálja, hogy a meteorológiai mérések aktualizálásával létrejött globális szél-térképnek elvégezzük az ellenőrzését, e pontok közelében lévő meteorológiai állomások aktuális adatbázisa alapján.

4.1 A mérési helyek



4.1. ábra Mérés helyek

Az 4.1. ábrán azokat a mérőhelyeket szemléltettem, ahol az elmúlt 6 évben energia célú szélméréseket végeztünk. Az energetikai célú szélmérések két formáját valósítottuk meg. Az egyik a nagyobb időtartamokban gyűjtött és kiolvasott adatbázis, a másik a 10 perces mérési periódusok alapján átlagolt és figyelt jellemzőkből képződött adatbázis, amely teljes egészében megőrzésre került. A nagyobb intervallumokból származó adatbázisoknál a mérés alapja megegyezik a másik rendszerével, tehát 10 perces átlagokat képez az anemométerekhez kapcsolódó adatgyűjtő és kiértékelő egységek algoritmusai, viszont a 10 perces átlagokból napi vagy heti átlag

adatokat képez, amelyek alkalmasak azonnali további adatfeldolgozásra. A 10 perces mérések átlagai alapján képzett adatbázis, amint a táblázat is szemlélteti igen nagyszámú adatot tartalmaz - az évi adatszám 3 anemométerrel: $14 \times 144 \times 365 = 735\,840$ - (4.1 táblázat).

4.1. táblázat Az adatbázis gépi adattárolásának fejléce

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
hónap, nap, év, óra, perc, másodperc													
v (átlag) dm/s	v (max) dm/s	v (min) dm/s	σ_s	v (átlag) dm/s	v (max) dm/s	v (min) dm/s	σ_s	v (átlag) dm/s	v (max) dm/s	v (min) dm/s	σ_s	szélirány °-ban	σ_s
Anemométer 80 m magasságban				Anemométer 40 m magasságban				Anemométer 20 m magasságban				Szélirány 60 m	
36	38	34	0	24	27	20	1	24	27	20	1	257	0
38	41	35	1	26	29	21	1	26	29	21	1	260	0
42	43	40	1	25	28	22	1	25	28	22	1	259	5

σ_s = az adatok szórása (standard szórás) %-ban

Az adatok száma összefügg azzal, hogy a mérőállványon két vagy három magasságban folynak a mérések. A három anemométer különösen fontos a nagy eltérésekkel rendelkező domborzati viszonyok között. A mérési helyek néhány adatát a 4.2 táblázat tartalmazza, a mérési pontok GSM koordinátáinak bejelölésével. E koordináták alkalmasak arra, hogy a digitális domborzati térképeken az adott pontot megkeressük és a korrekciót ezekre a pontokra végezzük el.

A sikeres méréshez mindkét mérési összeállítás (2 ill. 3 mérési magasság) alkalmas, mivel gyűjti az adott időszakra jellemző:

- maximális,
- minimális,
- átlagos szélességi adatokat,
- szélirányokat és ezek
- szórásait.

Mindegyik mérési magasságban meghatározhatók a szélességek:

- átlagos értékei a 12 fő szélirányban,
- a diszkrét eloszlások,
- a Weibull és Rayleigh függvények,
- a Weibull k tényező,
- az adott helyszínre jellemző érdességi faktor (Z_0),
- a magassági korrekcióhoz szükséges ún. Hellmann tényező (α) minden irányból,
- a napi szélesség eloszlások heti átlagai,
- a heti szélcsendes időszakok aránya.

4.2. táblázat Energiacélú szélmérések helyei - a mérési magasságok és a GPS koordináták megadásával

Helység (ill. térségének) neve	A mérési magasságok	GPS (N)	GPS (E)
Ajka	25-40 m	4705106	1734800
Bogyoszló	20-35 m	4734295	1713244
Ceglédbercel	20-40-60 m	4714249	1942327
Ceglédbercel I.	15-40	4714249	1942327
Erk	20-45 m	4737687	2007433
Hárskút	15-35 m	4711397	1748087
Inota	15-30 m	4713242	1811301
Járföld	20-35 m	4716865	1732417
Kecskemét	30-65 m	4653594	1943951
Kiskunfélegyháza	35-60 m	4641730	1952364
Komárom	15-35 m	4740034	1805019
Kozárd	15-30 m	4754801	1934499
Kőröshegy	15-30 m	4649917	1754821
Kulcs	15-35 m	4703870	1854496
Méra	15-35 m	4821744	2107863
Nagytétényi fennsík	35-65 m	4725906	1856893
Ostffyasszonyfa	25-45 m	4718129	1703398
Pilis	25-50 m	4718034	1935145
Sopron	15-40 m	4741878	1634047
Sződ	20-40 m	4743909	1912302
Zalaszentiván	20-40 m	4654202	1654119
Béb	20-40 m	4720247	1734074
Dánszentmiklós	15-30 m	4712666	1931817
Kiskunhalas		4624624	1929417
Pátka	20-45 m	4716057	1826843
Tiszakécske	25-50 m	4656848	2003590

A Sodar-ral 3 mérési helyen végeztünk vizsgálatokat. A Sodar telepítését a meteorológiai szolgálat szakemberei végezték. Az első két méréssel célunk volt, hogy a Sodar megbízhatóságáról, vélt vagy valós hibájáról meggyőződjünk, de adott területekre adatbázist is létrehozzunk. A budapesti kontrollmérések azt igazolták, hogy a Sodar elfogadható szinten prezentálja a szükséges adatbázist, amely a szélerőművek várható energia termelésének kiszámításához szükséges és kisebb eltéréssel megegyezik az anemométeres mérésekkel. Mind két mérési eljárásnak megvan az előnye és a hátránya is.

A Sodar-os mérések előnye, hogy nagyobb magasságokban is kapunk adatokat, amely a kiegyenlítődési réteg megállapítását szolgálja. Hibája, hogy nagyobb magasságokban az adatbázisa egyre inkább megbízhatatlan.

Az anemométeres mérések előnye, hogy minden magasságra az elektromechanikus működési elv alapján megbízható adatbázist szolgáltat. Az anemométer típusától, mérési rendszerétől függően a változékony időszakokban azonban az adatbázis pozitív vagy negatív irányba eltérhet a tényleges értékektől, a szél eltérő dinamizmusa és az anemométer tehetetlenségi nyomatéka következtében, különösen akkor, ha ezek nem lettek helyesen beállítva a mintavételezés, rövid átlagolás időszakaihoz képest.

Az utóbbi különösen megmutatkozik a szélirányjelzőknél, melyek nagyon érzékenyen jeleznek a szélirányváltozásokra, de ezzel közel sem modellezik a későbbiekben a generátorok szélirány követési mechanizmusát, hiszen az 50-80 tonna tömegű lapát és generátor együttes csak nagyobb időintervallumban képes követni a változásokat.

Több éves mérési tapasztalatok alapján összefoglaltam a szélenergia méréseknél figyelembe veendő főbb tényezőket (4.3 táblázat). Ezek hatásai a végső energiatermelés prognózisára: 3,0 - 30,0 %

4.3 táblázat A méréseknél figyelembe veendő főbb tényezők

1	A mérési adatok kezelése, feldolgozása
2	A mérési hely kiválasztása (domborzat, felületi érdesség, függőleges áramlás, egyéb turbulenciát okozó tényezők)
3	A mintavétel gyakorisága, a mérés időtartama
4	A mérés magassága és az anemométerek száma
5	A mérési adatok átszámítása a megfelelő hely(e)re- és magasság(o)ra
6	Eltérések a többévi mérési eredményektől
7	A mérőegységek pontossága, hitelesítése, hitelessége
8	Az érzékelők helyzete (távolsága) a mérőoszlophoz viszonyítva

4.2 Szélesség, szélprofil

A meteorológiai állomások széladatait energetikai céllal is fel lehet dolgozni, hiszen a fajlagos széltejesítmény a szélesség köbével arányos. A szélesség magassággal való növekedése tehát igen fontos tényező a szélenergia hasznosításában. A meteorológiai állomásokon azonban a mérések szabályosan 10 m-en történnek, azaz először olyan formulákat kell keresnünk, amelyekkel a szélesség magassággal való változása leírható. A különböző szélprofil törvényekben szereplő paraméterek azonban hely-, idő-, sőt sebességfüggők. Egzakt formájukban tehát nem alkalmasak a magasabb szintek szélességeinek tényleges meghatározására, ezért több empirikus változatot dolgoztak ki.

A meteorológiai gyakorlatban abban az esetben, ha a szélességmérőt kényszerűségből az előírt 10 m-nél magasabbra vagy alacsonyabbra kell szerelni a

$$v_h = v_{10} [0.233 + 0.656 \lg(h + 4.75)] \quad (4.1)$$

összefüggés alapján végzik a magassági korrekciót, ahol v_h a $h \neq 10$ m, a v_{10} pedig a 10 m magasságban mért/számolt szélesség. A szarvasi toronymérések adatainak felhasználásával tesztelve a fenti összefüggést azt tapasztaljuk, hogy az adott magasságban számolt szélességek eloszlása a kisebb értékek felé tolódik, tehát a képlet alábecsül. Tehát a fenti összefüggés alapján számolva a 10 m-nél magasabb szinteken a valóságos értéknél mindig kevesebbet kapunk.

Szélenergetikai számításoknál azonban az ún. Hellmann-féle gyökkitevős összefüggésből származtatott

$$v_h = v_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (4.2)$$

képletet használják. Ennek egyik oka, hogy egyszerűbb, mint az (4.1) összefüggés és konkrét esetekben ugyanazt az eredményt adja. Ennél lényegesebb azonban, hogy a benne szereplő α kitevő a felszín érdességének, tagoltságának, tehát a domborzatnak és a légkör hőmérsékleti rétegződésének, végső soron a súrlódásnak a függvénye. Meghatározása szélesség mérések alapján történik, extrapolálni csak olyan területre lehet, amely igen hasonló a mérés környezetéhez.

Egyes szerzők szerint az $\alpha=0.2$ értékkel igen jó közelítést érhetünk el 250 m-ig. A meteorológiai tornyok és az energetikai szélmérések adatai alapján azonban α értékét a felszíni súrlódásnak megfelelően pontosítani lehetett: irodalmi adatok alapján értéke 0.14 (sima tenger felett) és 0.34 (érdes szárazföldi terület) között változik.

A továbbiakban elsőként az α kitevő értékére vonatkozó konzorciumon belül végzett kutatásaink eredményét ismertetem, legelőször a paksi toronymérések 2000. és 2001. évi 20, 50 és 120 m-es szélesség és szélirány adatai alapján. Ez az adatbázis a vizsgált évek 10 perces átlagértékeiből áll.

Az adatokból az α értékei háromféleképpen lettek származtatva (4.4 táblázat):

1. A különböző szinteken kiszámolt napi átlagos szélességek alapján meghatározott értékekből évi átlagot számoltunk. Az egyes szintek éves maximális, minimális és átlagos napi szélességét, valamint a napi szélességek szórását vizsgáltam a mérési és a (4.2) összefüggéssel becsült adatok alapján.
2. Minden egyes mérési időpontban meghatároztam az α értékét, ezekből először óránkénti és napi, majd éves átlagot képeztünk. Ez utóbbiak láthatók az 4.4 táblázat megfelelő oszlopában, a napi menet pedig a 4.8 ábrán. Utóbbi tulajdonképpen a levegő stabilitásától, egyensúlyi helyzetétől (egyben a szélességtől) való függést mutatja: a kitevő minimuma a legmelegebb (legnagyobb szélességű) időpont környékére esik, stabil rétegződés esetén (éjjel) viszont alig változik.
3. Meghatároztuk a kitevő egyes szélirányokhoz tartozó átlagos értékeit is. Látható, hogy az $75-105^\circ$ irányok közötti tartományban nincs nagy eltérés a különböző szintek esetében, a többi iránynál azonban 0.1-nél nagyobb eltérések is előfordulnak. Ezt, főként pedig az $105-195^\circ$ iránynál megfigyelhető törést a mérőtorony környezetében lévő objektumok, sőt maga a torony okozhatja.

Következtetések ezen vizsgálódások után:

- Valószínű, hogy a hozzáférhető irodalomban fellelhető értékek igen szűk intervallumot jelölnek ki az α számára.
- Nem követünk el nagy hibát, ha az α napi menetétől, azaz a hőmérsékleti rétegződéstől és a szélességtől való függésétől a számításoknál eltekintünk.
- A paksi meteorológiai torony és a Sodar pestlőrinci környezetének tagságbeli különbözősége jól tükröződik a kitevő átlagos értékeiben.
- Megkülönböztetett figyelemmel kell tanulmányozni a kitevő szélirány szerinti változását. Az egyértelmű zavaró hatások (pl. a torony szélárnyékolása) kiszűrése után ugyanis az adott irányban található különböző orográfia hatása marad, így az itt számított kitevő hasonló adottságú területekre extrapolálható.

4.4 táblázat Az α tényező alakulása

			A napi átlagsebességekből	Az időpontenkénti kit. napi átlagából	Irányok szerint
2000.	átlag	20→50	0.43	0.50	0.50
		20→120	0.44	0.47	0.46
		50→120	0.44	0.43	0.43
	szórás	20→50	0.10	0.15	
		20→120	0.09	0.11	
		50→120	0.12	0.14	
2001.	átlag	20→50	0.41	0.45	0.45
		20→120	0.43	0.45	0.44
		50→120	0.46	0.45	0.45
	szórás	20→50	0.10	0.12	
		20→120	0.09	0.10	
		50→120	0.12	0.13	

A táblázatban látható az adott pontra vonatkozó éves átlagos Hellmann tényezők is. Magyarországon a szélviszonyok az egyes területeken igen jelentős mértékben eltérnek, és kialakulásukat (az adott légköri helyzeten belül) a domborzati viszonyok befolyásolják, a magassági korrekciós tényező meghatározása igen lényeges, a későbbi energia célú számítások ellenőrzéséhez pedig döntő jelentőségű.

A mérések alapján összességében megállapítható volt, hogy hazai körülmények között 90-110 m-nél alacsonyabb generátor elhelyezések szinte sehol sem célravezető. Ettől alacsonyabbak lehetnek néhány „kitüntetett” növényekkel nem borított fennsíkon, de ezen fennsíkokon is a magasabb oszlopok a későbbiek során rövidebb megtérülési időt eredményeznek (az elvégzett kalkulációk alapján). A Hellmann tényező jelentősége akkor mutatkozik meg, ha a szélsébséget nagyobb magasságra vetítjük. E vetítésnél néhány % pontos eltérés is döntő jelentőségű lehet a későbbi energiatermelés prognosztizálásában.

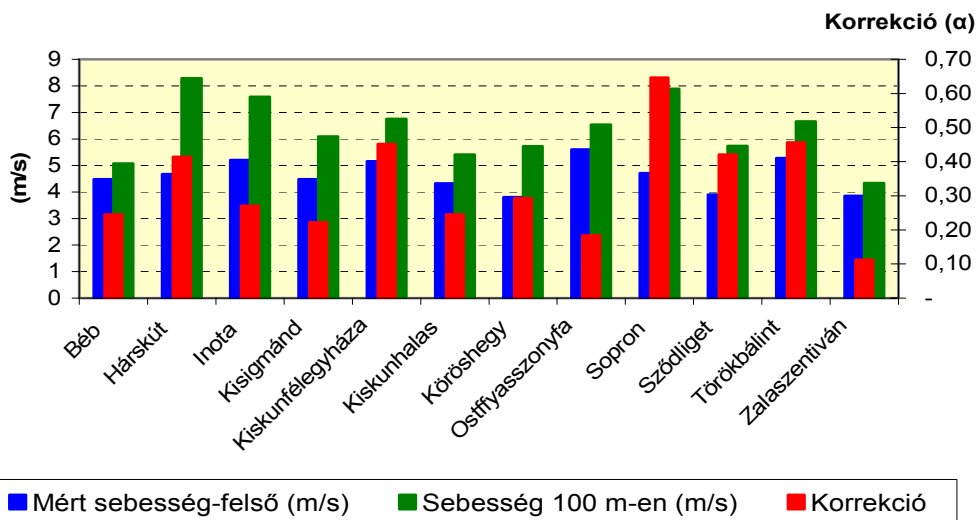
A kétféle magasságban végzett mérések alapján a magassági profil jó közelítéssel meghatározható. A több helyen végzett mérések összehasonlításai (4.5 táblázat) azt bizonyítják, hogy a magassági profil mérőszáma jelentős eltéréseket mutat, a mérési hely környezetétől függően.

4.5 táblázat Az éves szélmérési adatok néhány jellemző adata a mérési helyek szerint

Mérési hely	V1(m/s)	V2(m/s)	Zo	alfa	V65(m/s)
Béb	4,49	3,87	0,37	0,21	4,56
Bogyoszló	5,06	4,48	0,04	0,16	5,58
Ceglédbercel.	4,88	3,34	1,39	0,45	6,44
Ceglédbercell.	5,54	4,65		0,25	5,91
Dánszentmiklós	3,29	2,98	-	0,14	3,68
Erk	4,54	3,21	1,64	0,44	5,96
Hárskút	4,67	3,78	1,71	0,41	6,94
Inota	5,21	4,57	0,80	0,18	6,18
Bakonyjákó	4,92	4,31	0,09	0,16	5,42
Kiskunfélegyh.	5,17	4,04	1,10	0,91	6,01
Kiskunhalas	4,32	3,37	0,27	0,21	4,78
Kisigmánd	4,48	4,00	0,21	0,22	5,54
Kozárd	3,05	2,93	0,20	0,18	3,63
Köröshegy	3,81	3,28	0,64	0,29	5,05
Kules	5,29	3,34	1,26	0,54	7,41
Méra	5,03	4,52	0,01	0,16	5,67
Ostffyasszonyfa	5,28	4,49	0,89	0,28	5,85
Pilis	4,96	4,03	1,20	0,30	5,36
Sopron	4,71	2,72	1,17	0,93	6,65
Szódliget	3,09	2,62	-	0,24	3,48
Tiszakécske	5,37	4,58	-	0,23	5,69
Törökbálint	5,29	3,54		0,46	5,48
Zalaszentiván	3,85	3,52	0,09	0,18	4,57

Tizenkét helyen kapott mérés eredményeit mutatja a 4.2 ábra, ahol mind a felső mérési ponton kapott átlagos szélességek, mind az alfa korrekciós tényező és az ennek segítségével 100m-re kiszámított átlagos szélességek láthatóak.

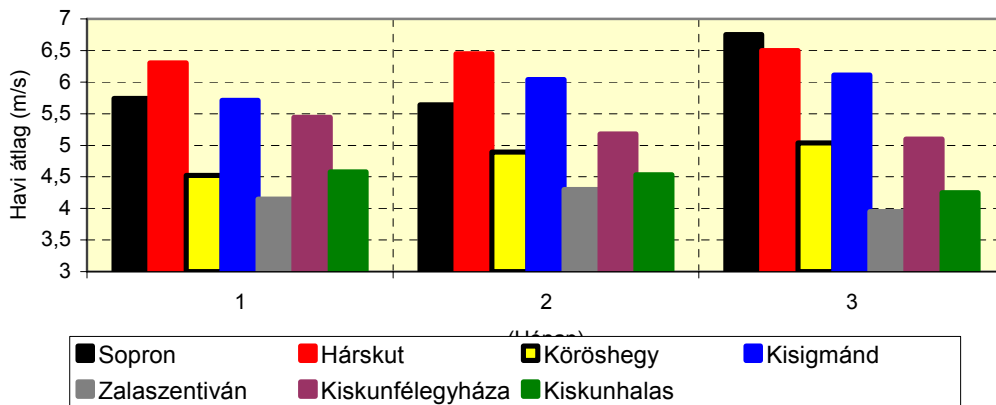
Szándékosan is végeztünk olyan méréseket amelyek semmiképpen sem tekinthetők optimális helyszínek (egyes esetekben ezt a mérés kivitelezhetőségének körülményei is indukálták). Egyértelműen kimutatható volt, hogy azokon a helyeken ahol a domborzatban jelentős változások voltak, az α nagyobb értéket mutatott, gyakran irreális 0,8 – 0,9 értéket is kaptunk.



4.2. ábra Példa az évi átlagos korrekciós tényezőkre, a mért és a számított szélességre

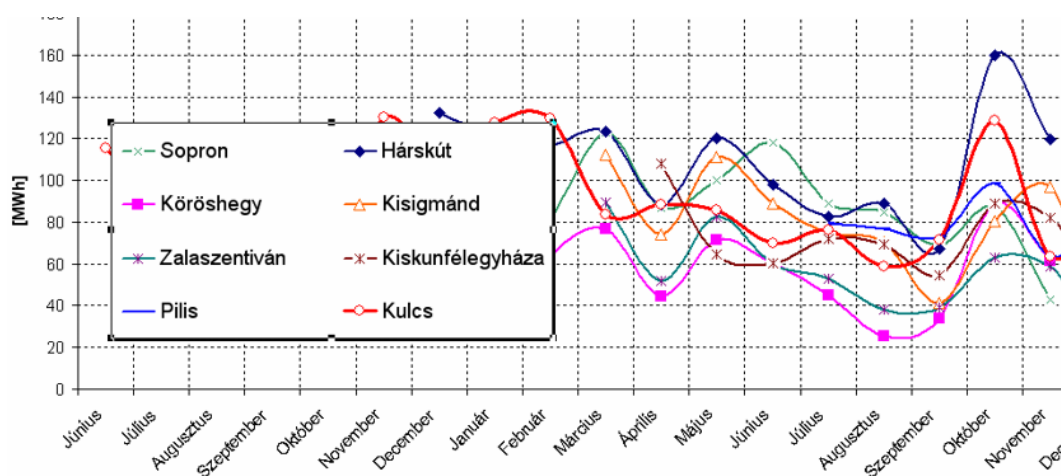
Hasonló volt a helyzet települések közelében végzett méréseknél (4.3 ábra), ha azok az uralkodó széliránnyal összevetve a település mögött helyezkedtek el, még akkor is, ha a tapasztalati számok alapján, ha az L/H viszonyában 15-20-as értéket is elértük.

Átlagos szélességek 2002 évben, 65 m magasságban
1-március, 2-április, 3-május



4.3. ábra Példa a mérések alapján számított szélességek havi átlagértékeire ugyanazon hónapokban az ország különböző pontjain

A mért értékek alapján a szélgenerátor gyártóktól kapott működési jelleggörbéket alapul véve ezen helyekre ki lehet számolni a várható éves energiatermelést (4.4 ábra).

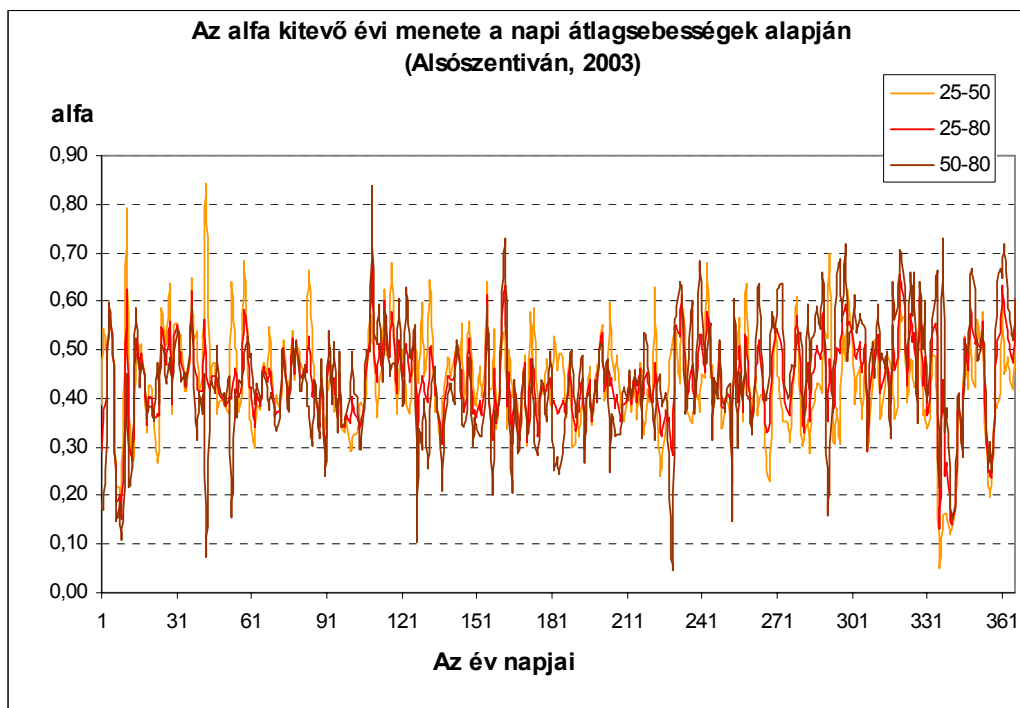


4.4 ábra Példa a mérések alapján számított energiatermelés havi átlagértékeire ugyanazon évben és hónapokban - azonos gépekkel számolva - az ország különböző pontjain

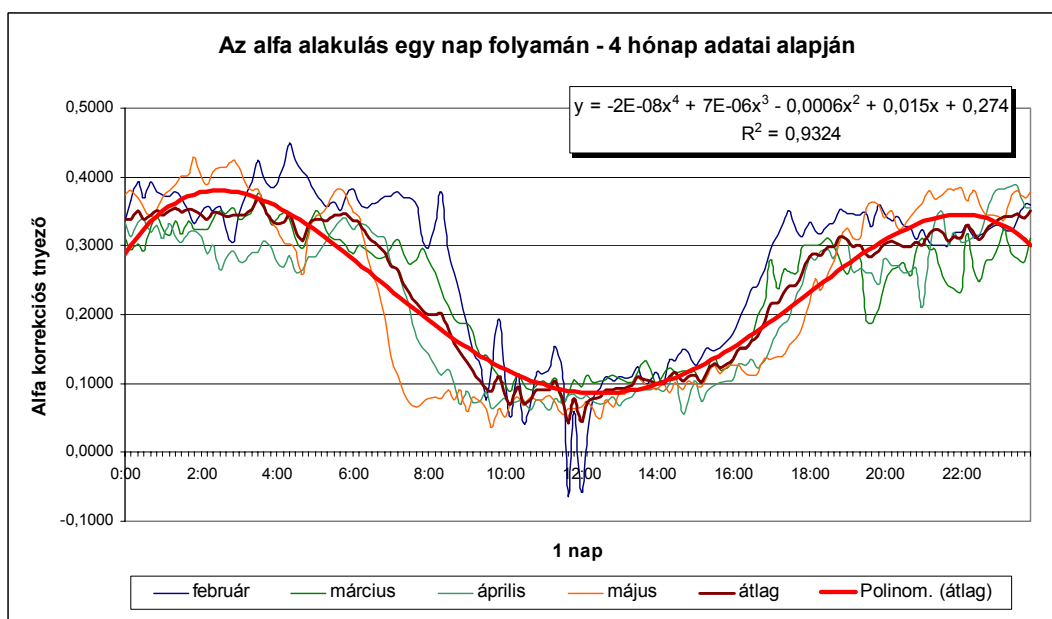
Általánosságban megállapítható, hogy sík vidéki viszonyok között éves viszonylatban az $\alpha = 0,2 - 0,25$ értékeivel célszerű számolni. Fákkel, egyéb tereptárgyakkal borított és egyenetlen felszínű telepeken $\alpha = 0,3-0,4$ lehet az irányadó. Amint említettem (kontinentális viszonyok között) a jelenlegi szélerőművek magassága - a gondola középmagasságában - 100-110 m. A 2-2,5 MW-os berendezéseknél a lapátkerék átmérő 90-95 m, vagyis a lapát csúcsa legfelsőbb helyzetben 150 m, alsó helyzetben pedig 50-60 m magasságban mozog. E két pont között igen jelentős a szélsébség eltérés, ezért az erőmű dinamikai szempontokból erősen kitett (lapát rezgésszáma, kihajlási amplitúdója, stb.).

Az elmúlt 4-5 év mérési tapasztalatai alapján a magassági korrekciókkal kapcsolatban igen jelentős információs bázissal rendelkezünk. Ezek szerint egyértelműen kimondható, hogy a nagyobb szélparkok létesítése előtt - az információs mérésekkel-, vagy a széltérképekről kapott adatbázisokon túlmenően - nem nélkülözhetők a nagyobb magasságú (60-80 m-ig), alapos, legalább 3 magasságra kiterjedő szélmérések. A gépek kiválasztásához elégséges adatbázist csak ezzel szolgáltatathatunk. A nagyobb magasságokban (150 m felett) a kiegyenlítődés számottevő, egymáshoz viszonyítva kisebbek a korrekciós tényezők.

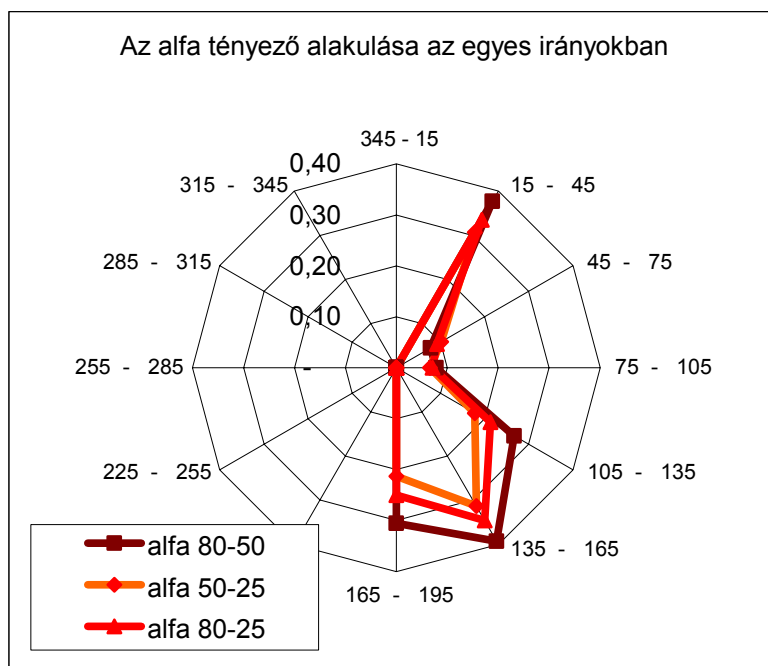
Vizsgálódásaim során bebizonyosodott, hogy az alfa tényező alapos vizsgálata elengedhetetlen a helykiválasztáshoz és a prognózishoz. Vizsgálni kell adott helyen mind az éves menetét (4.5 ábra), mind a napi változását (4.6 ábra) de elengedhetetlen az egyes szélirányokban is a kitevő vizsgálata (4.7 ábra)



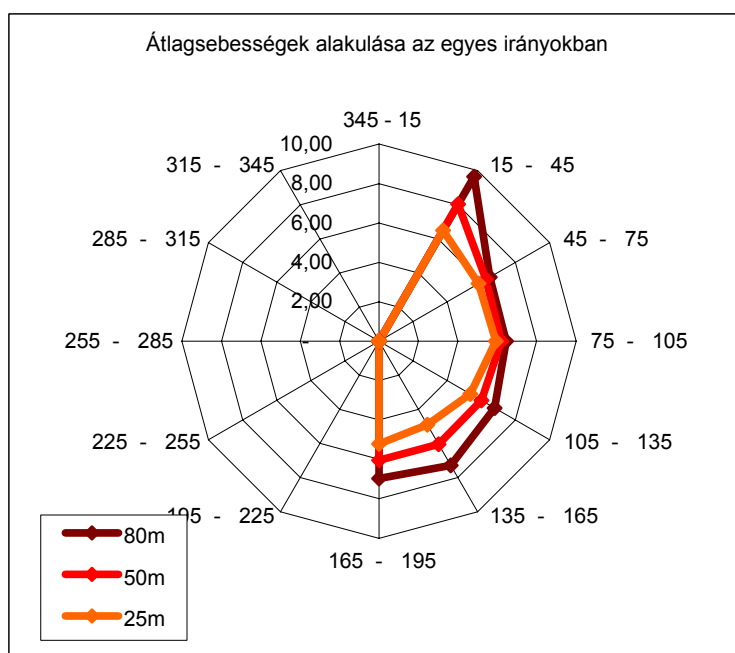
4.5. ábra Az α tényező alakulása egy év folyamán (Alsószentiván 2003.)



4.6 ábra Az alfa tényező alakulása egy nap folyamán, négy hónap adatait összegezve. Jól követhető a napszakonkénti változás, mely trend



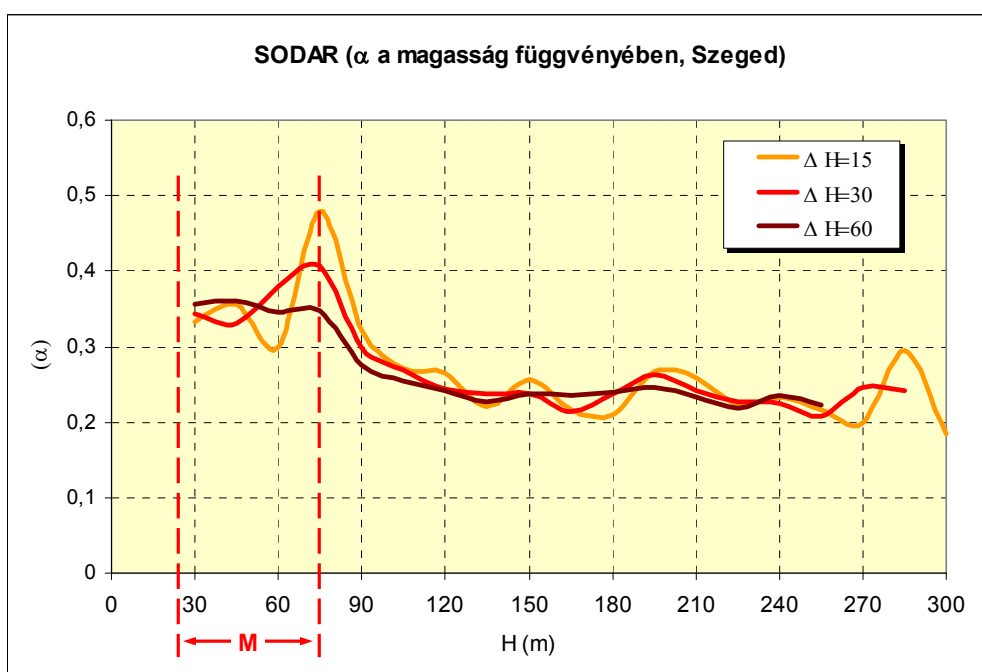
4.7 ábra Az α alakulása 24 óra időtartamban azonos mérőoszlop különféle magasságaiban a szélirányok szerint



4.8 ábra Az átlagos szélességek alakulása 24 óra időtartamban, azonos mérőoszlop eltérő magasságaiban a szélirányok szerint tipikusnak mondható.

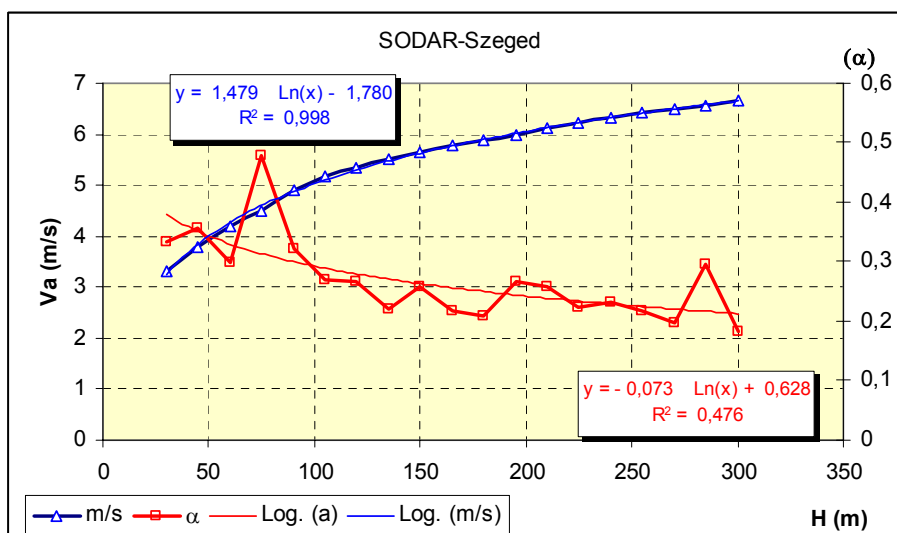
Nem elégséges csak az átlagos szélsébségeket nézni az egyes irányokból hiszen a korrekciós tényező vizsgálatával pontosabb képet kapunk az egyes irányokban az egyes szélprofilokra. A 4.7 és a 4.8 ábra ugyanazon a mérőtornyon ugyanazon időben kapott mérési eredményeket mutatják. Jól látható, hogy legkedvezőbb szél keleti irányból várható, bár ha csak a sebesség diagramot nézzük, ez abból nem derül ki.

A Sodar nagyobb magasságú és kisebb rétegelozslási mérései is igazolják a korrekció fentebbi megfogalmazhatóságát. Megerősítik, hogy a 25-80 m (ritkábban esetleg 90 – 100) magasságú anemométeres méréseknél (4.9. ábra: M) a 30, de inkább a 60 m magasságkülönbségű adatokkal számolunk a nagyobb magassági korrekcióknál.



4.9 ábra Sodar méréssel kapott korrekciós tényezők 15-30 és 60 m-es magasságkülönbségekkel végzett számítások alapján.

A Sodar mérés adta lehetőséget kihasználva, miáltal magasabb rétegekig is mérhetünk, igen pontos képet kaphatunk a helyi szélviszonyokról (4.10 ábra). Szeged környékén 300m magasságig végeztünk méréseket, melyek alapján a korrekciós tényező változását is fel tudtuk venni.



4.10 ábra 15 m-es rétegeknél végzett Sodar mérés magasság-átlagos szélesség diagramja (igen kedvező korrelációval), s a kapott korrekciós tényezők 15m-es magasságkülönbségekkel végzett számítás alapján.

A gyártók a szélgenerátorokat a kontinentális viszonyokhoz - a nagyszámú nyugat-európai telepítések következtében szerzett tapasztalatok alapján - jelentős mértékben alakították. A tengerpartokon, vagy sekély tengervizekben létesített berendezések oszlopai alacsonyabbak, hiszen mechanikai szilárdságuk is ezt követeli az igen szélsőséges szélességi viszonyok (az ezekből fakadó extrém terhelések) miatt. A „tökéletesen síknak” tekinthető tenger felület miatt a Hellmann tényező is 0,05-0,1 körüli értékű, ami annyit jelent, hogy az optimális szélesség kisebb magasságban már kialakul. A kontinentális viszonyok között a gazdaságos energiatermeléshez szükséges kellő mértékű és nyugodtabb szélességet csak nagyobb magasságban nyerhetjük. Itt viszont kisebb a valószínűsége, hogy extrém viszonyok alakuljanak ki, s emiatt „karcsúbb” magasabb tornyok is megfelelőek. Így a közelítőleg azonos technikával a kapacitásokra vetített fajlagos beruházásokat tekintve, fajlagosan azonos mennyiségű energia termelhető. Ha ehhez hozzászámítjuk a szállítástól adódó veszteségeket, akkor a helyi felhasználások előnye egyértelmű lehet.

4.3 A hazai helyzet értékelése a végzett mérések alapján

Az eddigi mérések alapján elmondható, hogy szélenergia szempontjából legelőnyösebb a kis-alföld térsége, beleértve a Komárom irányába elnyúló lankás dombvidéket, ahol kedvező turbulenciájú és közel egyirányú szelek jelentkeznek. Előnyösek a kis-alföld térségében a Kapuvártól délre eső területek, amelyek (hozávétőlegesen) Vasvár magasságáig nyúlnak, keletre pedig a Bakony lejtőin fejeződnek be.

A Bakonyban végzett méréseink kedvezőek, azonban ide szél erőművek csak egyedi elbírálások alapján telepíthetők a környezeti, a tájvédelmi korlátok, valamint a Natura 2000 területi elhelyezkedései miatt. Méréseink szerint Zala megye nem alkalmas. Kedvező mérési eredmények adódnak Fejér megye egyes részein az ún. Móri-árok környezetében és az M7-es autópályától délre eső területeken egészen Paksig.

Előnyösebb a gödöllői dombság déli nyúlványa, ahol a kedvező domborzat mind a nyugati mind a déli szelek felgyorsulását eredményezi, ezeken a dombokon, 170-180 m-es magasságokban a 100 m magas generátorok kellő kihasználtságot mutatnak.

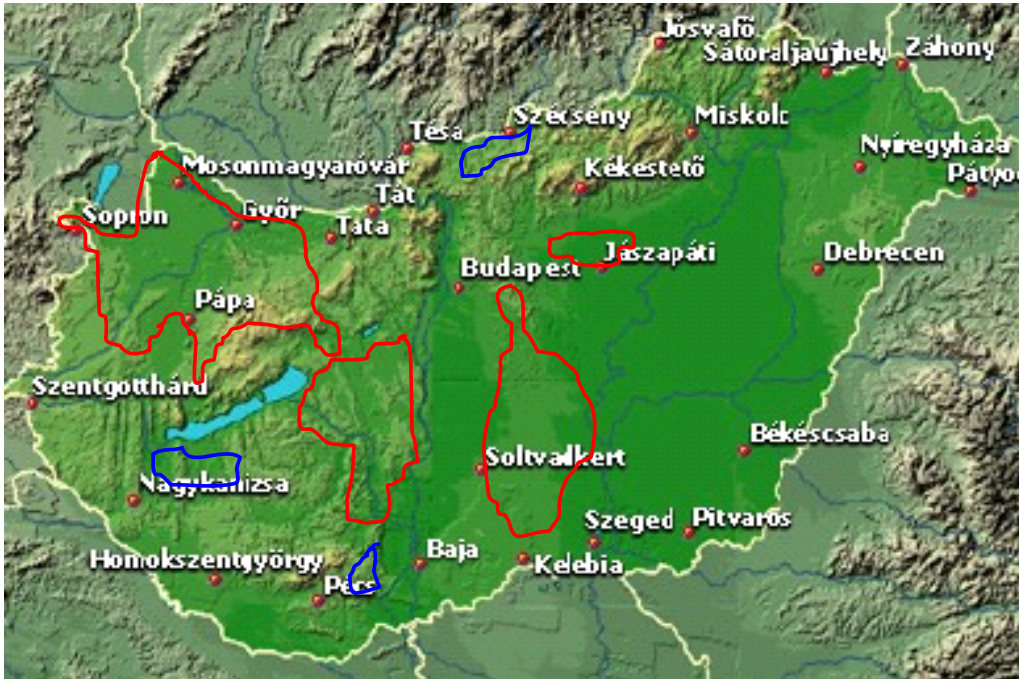
Az Alföld északi részén végzett mérések nagymértékben helyfüggők. A Mátrához közel eső területek, pl. Ecseg – Jobbágyi térségében végzett mérések szinte minden irányból teljes szélárnyékot mutatnak, s a helyzet mind a Mátra mind a Bükk térségére jellemző. A Mátrától délre eső 30-40 km távolságban már helyfüggően kedvező szélviszonyokat tapasztaltunk, ahol két jellemző áramlási irány van (Északnyugat és Kelet).

Az Alföld térségében végzett méréseink azt igazolták, hogy a Tisza-Duna közötti térség kevésbé alkalmas, egyes területek a „határ szinten” mozognak, ami annyit jelent, hogy a legkedvezőbb generátorokkal 100 m-es magasságban legfeljebb az évi 2100 max. kapacitású üzemóra (mint mérőszám, amikor a generátor teljes kapacitással működik) biztosítható. *Gazdaságosságilag ez a jelenlegi energiaárak és beruházási költségek figyelembe vételével jelenthető ki.*

Kecskeméten, Kiskunfélegyházán, Kiskunhalason végzett méréseink közül a kiskunfélegyháziak az előnyösebbek.

A Szegeden végzett Sodar mérések alapján e térségben gazdaságosan szél erőmű nem telepíthető, hiszen 100 m magasságban tapasztalható széljárás 20-30%-kal tér el a kis-alföldön tapasztalt értékektől. A Hernád völgyében, a tapasztalatok szerint az alkalmanként elég erős légmozgás ellenére az évi átlagos szélesség nem elégséges (eltekintve a kiváló adottságú helyektől), szél erőmű park gazdaságosan nem alakítható ki.

Nagyszámú mérés alapján a 4.11 ábrán bejelöltük globálisan a domborzat figyelembe vételével azokat a területeket, amelyekre szél erőművek energetikai célokból nagyobb valószínűséggel telepíthetők, és megfelelő energia kihozatalt biztosítanak. Természetesen ezeken a területeken is jelentős kritériumok vannak, környezetvédelmi, és energia átadási lehetőségek vonatkozásában.



4.11 Eddigi mérések alapján azon területek, melyek szélerőművek telepítésére energetikailag alkalmasnak tűnnek
Jelölés: piros-méréssel ellenőrzött, kék-számítás alapján

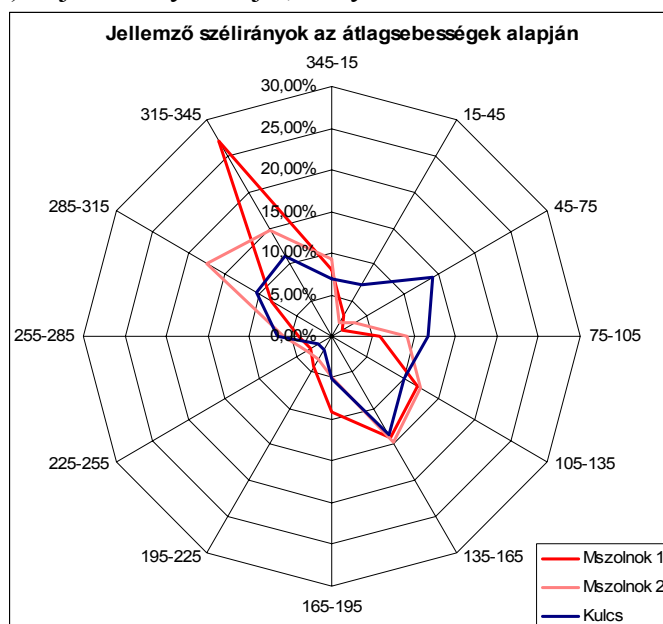
A méréseket követően minden alkalommal elvégeztük a várható energiatermelés meghatározását. Ekkor egy-egy, a legkorszerűbb követelményeknek megfelelő, kontinentális viszonyokra alkalmas szélgenerátor jelleggörbéjét illesztettük a kapott diszkrét szélesség eloszlásra, ill. Weibull és Rayleigh függvényekre. Ekkor az adott ponton kapott magassági korrekciós tényezőt használtuk.

Megállapítható volt, hogy az utóbbi 1-2 évben fejlesztett generátorok hatásfoka szárazföldi körülmények között 10-25%-kal kedvezőbb, vagyis e gépeket jobban alakították a szárazföldekre jellemző szélviszonyokhoz.

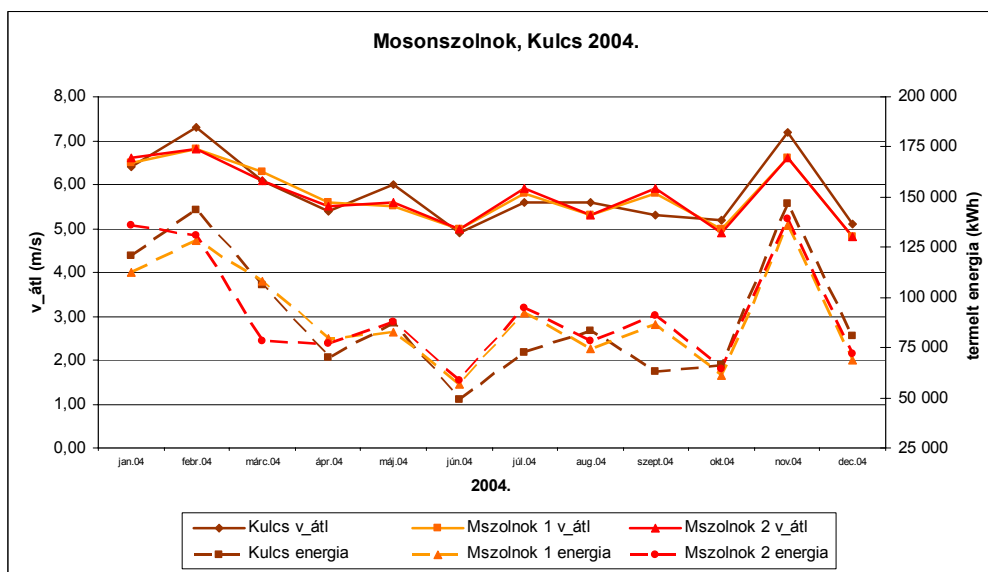
4.4 A hazai szélrőművek megfigyelésével szerzett tapasztalatok

Az elmúlt években részben a Szent István Egyetem kezdeményezésre Kulcson megvalósult az első Enercon 40 típusú berendezés, melyet további 4 egység követett a kis-alföld térségében.

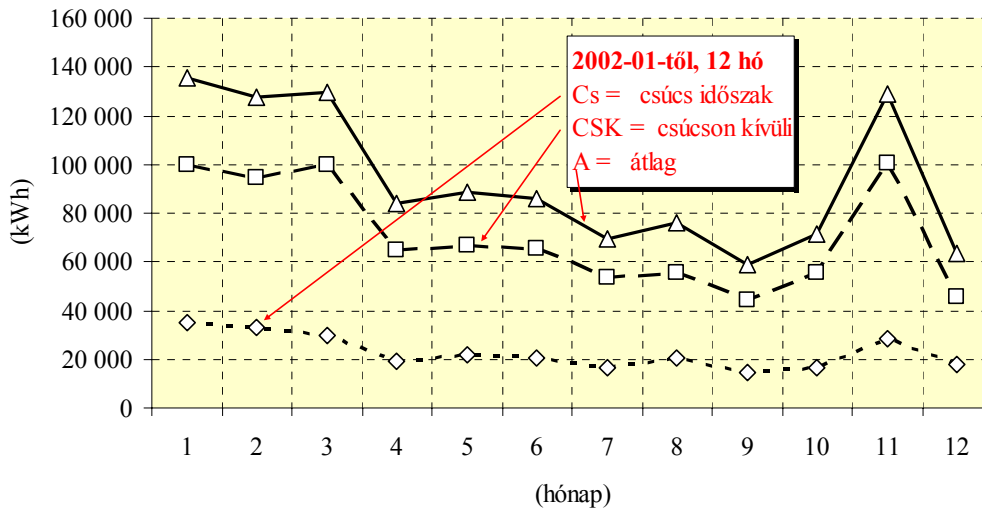
Összehasonlítottuk a két helyen teljesen azonos generátorokkal a jellemző szélirányokat (4.12 ábra), a termelt energiát, és annak jellemzőit (4.13-14 ábra). Megállapítható, hogy 2 generátor szolgáltatott teljesítménye nagymértékben függ a légköri frontok vonulásával járó szélsébség növekedésektől. Jól kimutathatók azok az időszakok (órák) teljesítmény szintjei, melyek a frontok vándorlási idejére utalnak.



4.12 ábra A jellemző szélirányok az átlagsebességek alapján a mosonszolnoki és a kulcsi szélerőművek esetén 1 hónapos időszakra (2004. április)
(Forrás: E.ON Hungária Rt.)

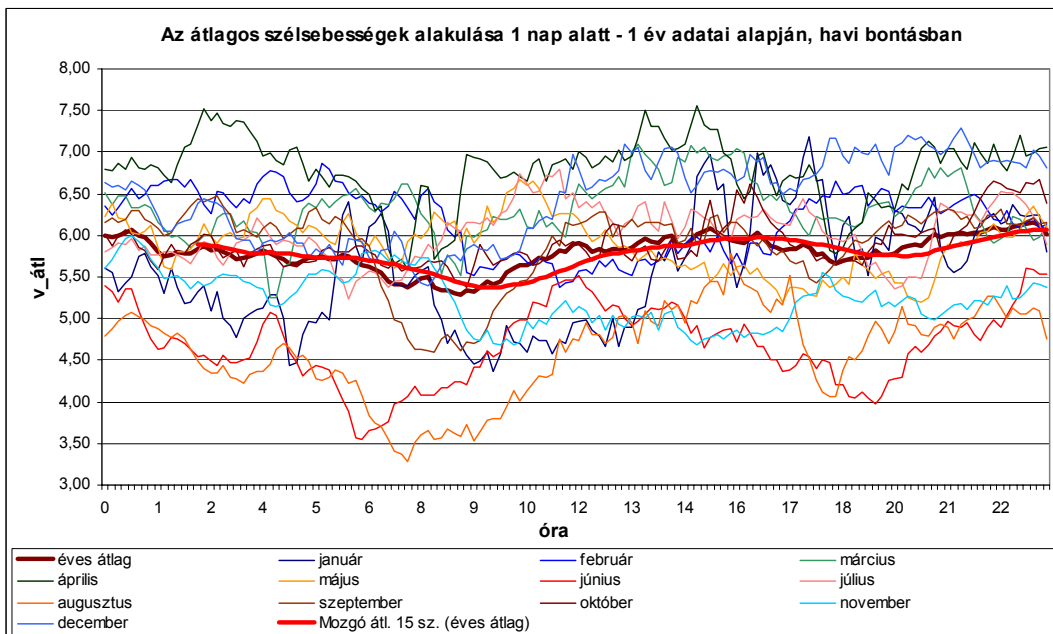


4.13 ábra A havi átlagos szélsébségek és a termelt energia alakulása a kulcsi és a mosonszolnoki erőművek esetén (Forrás: E.ON Hungária Rt.)

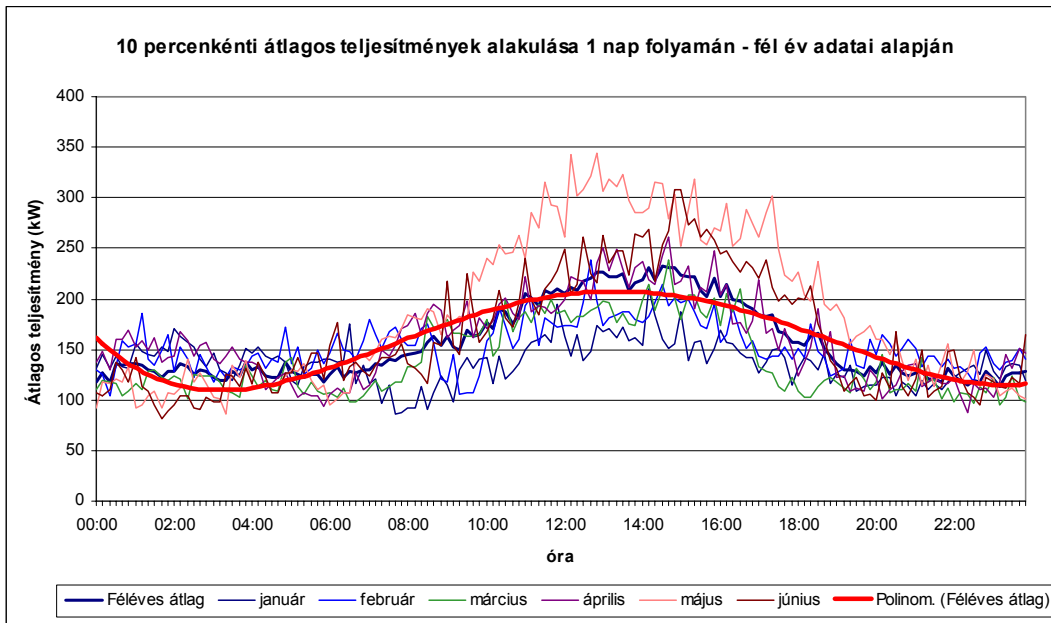


4.14 ábra Kulcsi erőműnél az energiatermelés alakulása az energiaárak szerinti fontos időszakokban és összesen (Forrás: EMSZET Kft.)

A több éves mérések alapján jól látható, hogy a jellemző energiatermelési időszakok a déli, kora délutáni időszakra esik (4.15 és 4.16.ábra).

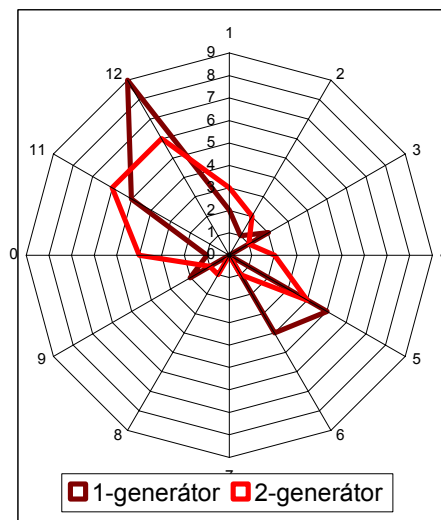


4.15 ábra A mosonszolnoki erőműveknél a 10 perces átlagsebességek alakulása 1 nap folyamán, egy éves adatok alapján (Forrás: E.ON Hungária Rt.)



4.16 ábra Kulcsi erőműnél a 10 perces átlagteljesítmény alakulása 1 nap folyamán, fél éves adatok alapján (Forrás: EMSZET Kft.)

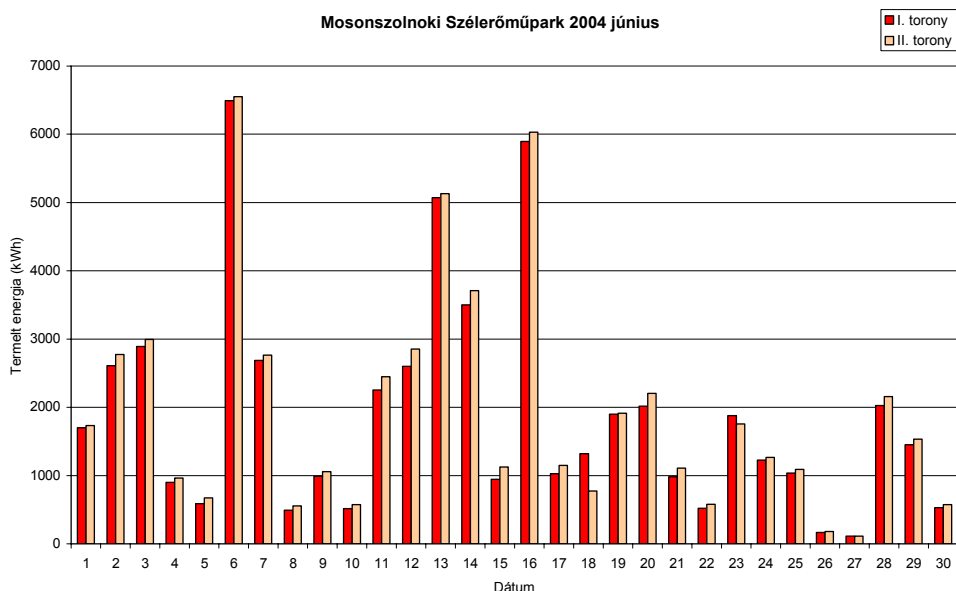
Kulcson a berendezés elhelyezkedése igen előnyös, nagyon kedvezően szolgáltat energiát mind az észak-nyugati, mind a dél-nyugati szelekből. Mosonmagyaróvár térségében az észak-nyugati áramlás a meghatározó az energiatermelés szempontjából (4.17 ábra). Számos esetben déli áramlások működtetik a berendezéseket, az ezekből nyert energia viszont nem számottevő.



4.17 ábra A mosonszolnoki Enercon E40 generátorok napi szélirányba állásának szektor diagramjai (Forrás: E.ON Hungária Rt.)

A végzett méréseinket és az alkalmazható kalkulációt ellenőriztük Bogyoszló térségében végzett méréseinkkel, az itteni mérések során kapott adatokból számított értékeket hasonlítottuk össze a Mosonszolonokon a tényleges energiatermeléssel, az Enercon E-40 típusú berendezésekkel, generátorokkal.

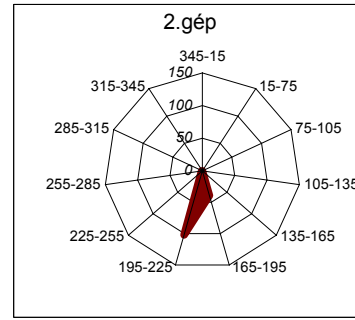
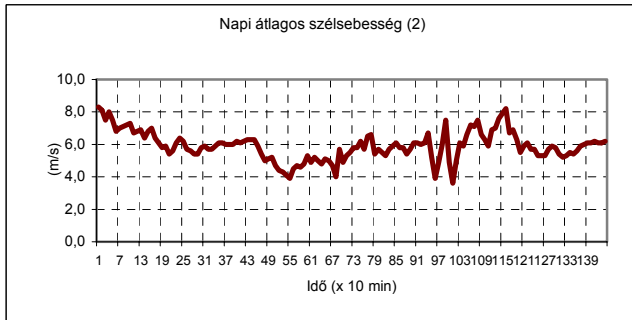
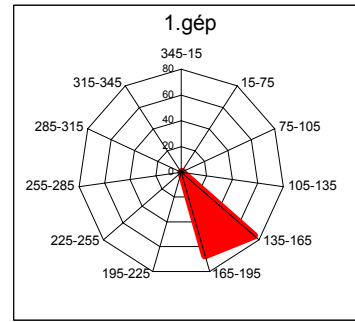
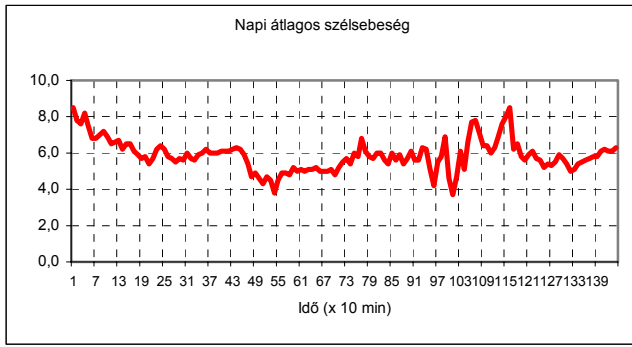
Mosonszolonokon a 2 gépet vizsgálva jól látható egy állandó eltérés a két gép között. Bár azonos típusúak és egymástól néhány száz méterre vannak, energiatermelésük nem azonos. Az erdősávhoz közelebb álló gép átlagosan minimálisan kevesebb energiát termel (4.18 ábra).



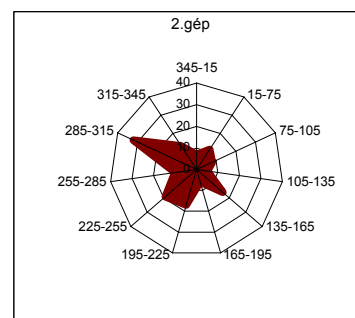
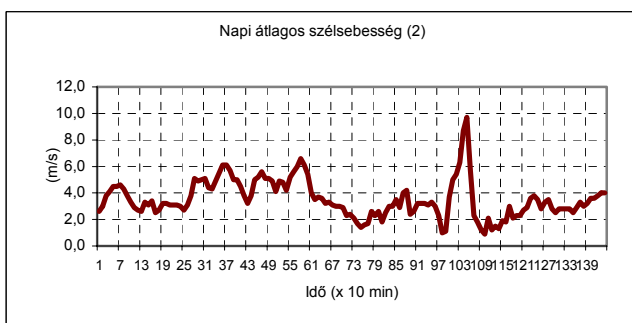
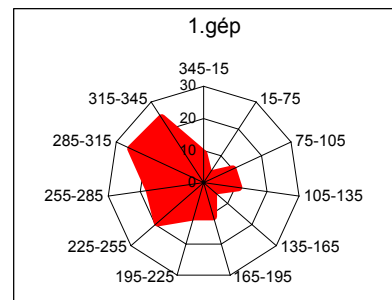
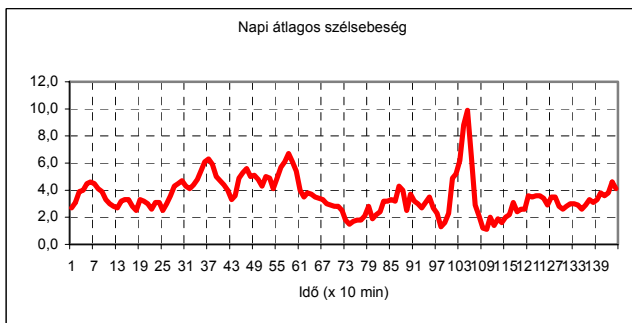
4.18 ábra A mosonszolonoki 2 szélgenerátor havi energiatermelés napi bontásban (2004. június) (Forrás: E.ON Hungária Rt.)

A két berendezés közötti különbség jól követhető a teljes év folyamán, a 400 m távolságban álló Enercon E40 típusú 1. és 2. generátoroknál az átlagos szélességek és a szélirányba állások alakulás mutatója 24 órás időszakokra a 4.19 és 4.20 ábra más és más hónapban.

Megállapítható, hogy a prognózis elfogadható biztonságú, azonban napi, de különösen órás értékekre nem vetíthető, itt jelentős 50-70%-os eltérések is adódnak. Ez annyit jelent, hogy 0,5 napos vagy órás előre jelezések nem készíthetők. A frontok változása alapján napi vagy kétnapi előrejelzések készíthetők, de az energiatermelés konkrét mennyiségére vonatkozóan nem.



4.19 ábra 2004.április (Forrás: E.ON Hungária Rt.)



4.20 ábra 2004.június (Forrás: E.ON Hungária Rt.)

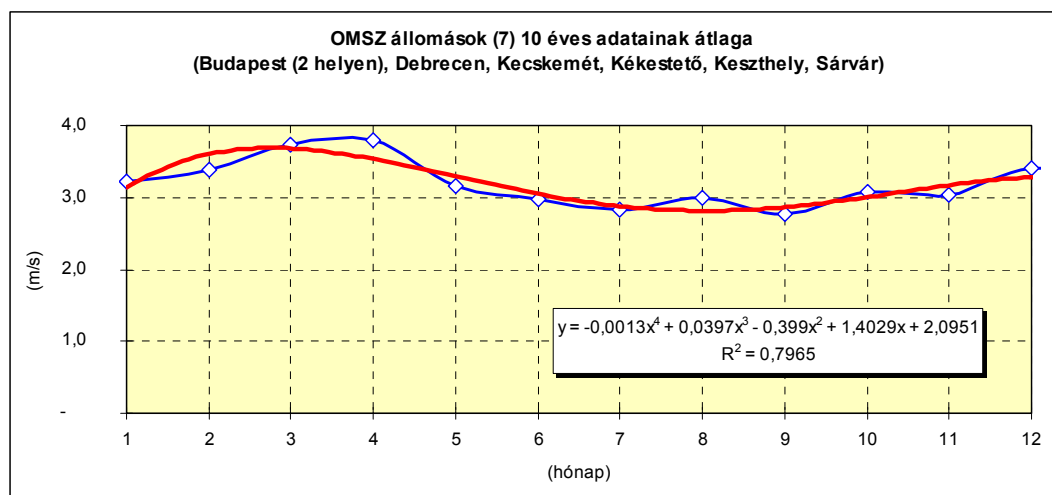
Megállapítható, hogy például amíg a rövid idejű *kalkuláció alapján* elfogadható érték adódik, addig a *tényleges* erőműveknél jelentéktelen a termelés. Ez feltételezésünk szerint abból fakad, hogy a generátorok csak hosszabb idő elteltével állnak a változó szélirányban a termelési optimumnak megfelelő főszélirányba. A prognózisok viszont ezeket a beállási, tehetetlenségi szakaszokat nem kalkulálják. Ugyanakkor a szélhőkésések következtében jelentkező energiatermelés változás a generátoroknál a tehetetlenségből fakadóan kevésbé érzékelhető, vagyis a nagy tehetetlenségnek kiegyenlítő szerepe van.

A korszerű berendezések néhány jellemzője a hazai viszonyokra:

- 90-110 m oszlopmagasság,
- $C_p = 0,49 - 0,53$ (teljesítménytényező),
- pontos (érzékeny) széliránykövetés,
- kis zajhatás,
- alacsony rotor fordulatszám.

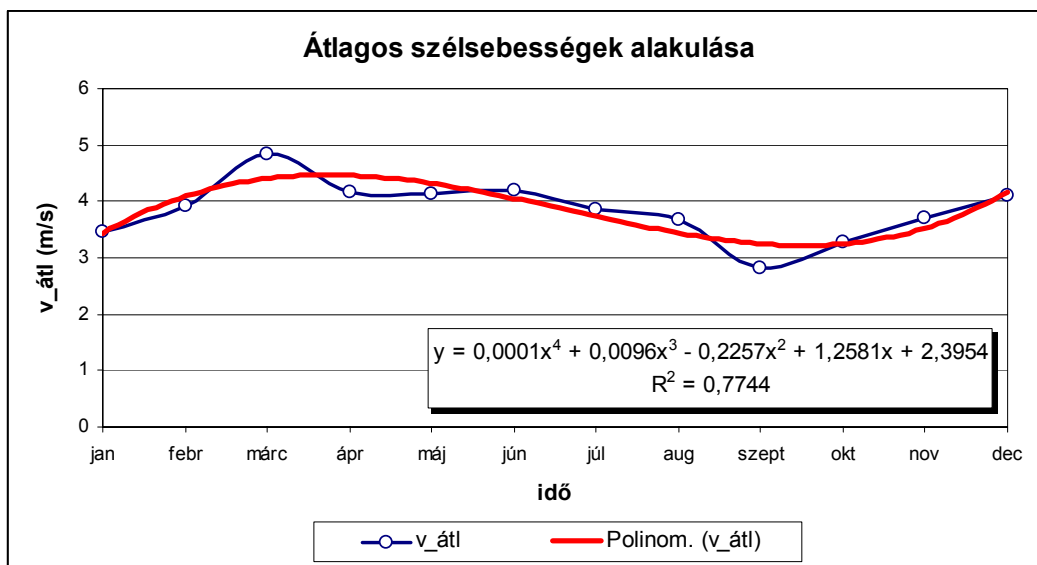
4.5 Hosszabb távú mérések elemzése, felhasználása

Az OMSZ hosszabb távú megfigyelései alapján megállapítható, hogy az éves szélsébség havi átlagainak éves alakulása közelítőleg egy negyedfokú polinom, ezt mutatja több helyen végzett tíz éves átlag eredményekből felrajzolt diagram (4.21 ábra), ahol viszonylag jó korreláció mutatkozik. E korreláció még szorosabb, ha ugyanazon mérési helyen felvett 10 éves átlag adatokat szemléljük.

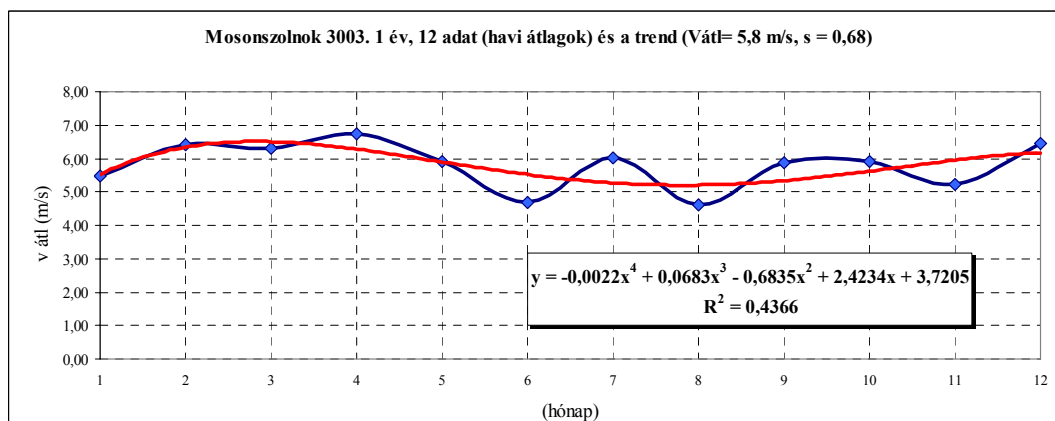


4.21 ábra 10 éves átlagértékek alapján a szélsébség változása az év folyamán az ország különböző helyein (Forrás: OMSZ, 2000.)

Az egy éves havi átlagok is jól megközelíthetőek a negyedfokú polinommal (4.22 ábra), azonban az egyes évekre jellemző nagyobb szórás miatt a korreláció kevésbé szoros (4.23 ábra), de a jelleg változatlanul azonos. Tehát az éves várható energia-termelések nagyobb intervallumokra előre jól számíthatók.



4.22 ábra Az átlagos szélesség alakulása Ostffyasszonyfán, 1 év mérései alapján



4.23 ábra A havi szélesség átlagok alakulása egy év folyamán Mosonszolnokon. (E-40 generátornál) (Forrás: E.ON Hungária Rt.)

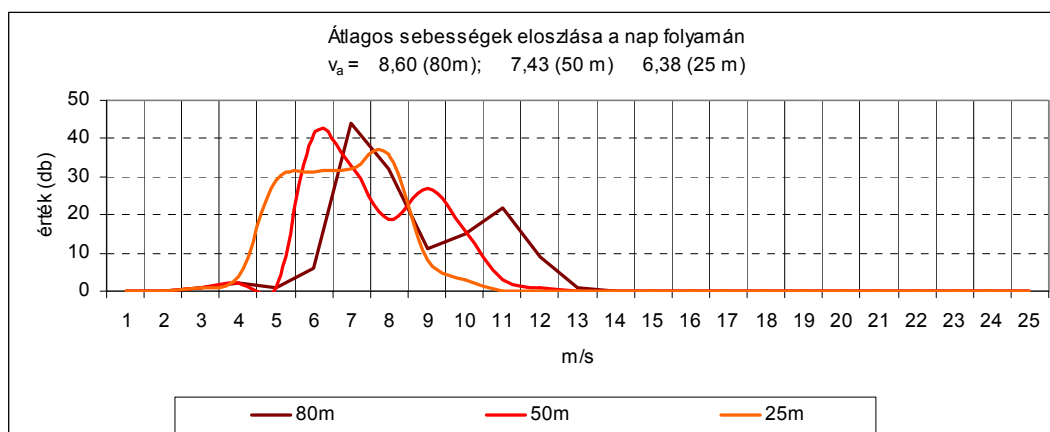
Természetesen egyes évek között jelentős eltérések adódhatnak. Minél rövidebb időtartamban végezzük a vizsgálatokat, annál nagyobb a bizonytalanság és nehezen fedezhetők fel trendek, a légállapot helyzetével kapcsolatban.

4.6 A szél jellemzése a generátorok szempontjából

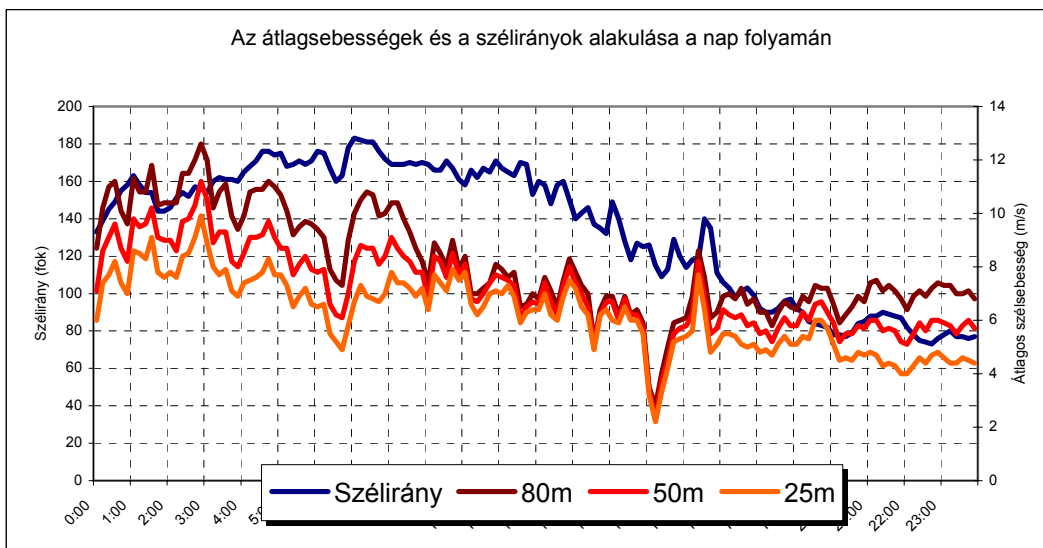
A generátorok által hasznosítható energia szempontjából alapvető szélességeket a szélirányok szerint is a felületi ellenállási törvény írja le, vagyis azt hogy a szél miképpen változik a magasság függvényében. Azonban az, hogy a domborzattól függően a szél hogyan változik a szabad atmoszféra felől a felszín felé, csak igen bonyolult és feltehetően változó összefüggéssel jellemezhető, amelyet a magassági korrekcióhoz hasonlóan a napszakok és az évszakok is befolyásolnak.

A szélirány változása jelentősen függ a felszíni szél nagyságától, az irány kis távolságon belül is több mint 10 fokot is képes változni. Ezek az összefüggések nemlineárisak, s lehetetlen a konkrét helyszíntől, az időponttól független használatuk. A legnagyobb változások a 2-10 m/s-os sávban található, ami a szélerőművek fő energiatermelési tartománya.

A 4.24 - 4.28 ábrákon Alsószentiván térségében felállított 80 m magas mérőtorony egy napján regisztrált adatokat dolgoztam fel. Látható, hogy jelentős eltérések és szabálytalanságok vannak a szélesség eloszlásban (4.24 ábra), de a nap során is szabálytalan, nem követhető trendek alakulnak ki, mind a szélességek, mind a szélirányok vonatkozásában (4.25 ábra). Ezek természetesnek is tekinthetők.

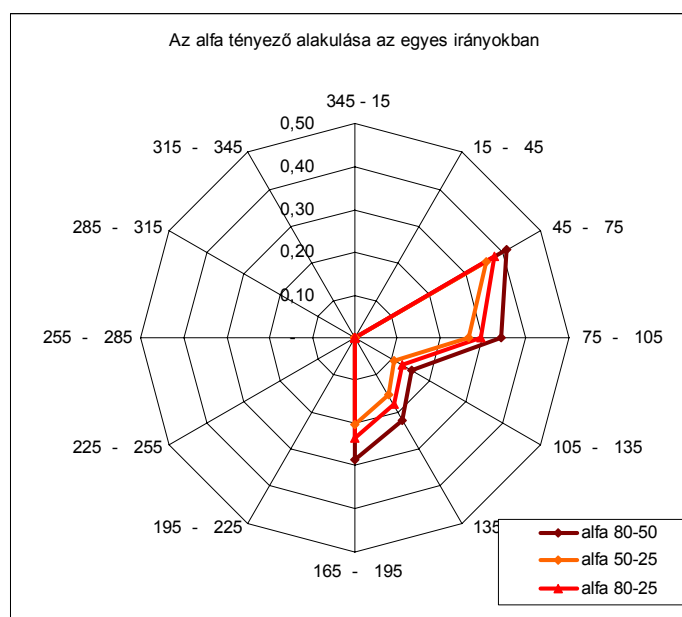


4.24 ábra A szélességek diszkrét eloszlása különböző magasságokban 24 órás mérés során 10 perces átlagok alapján (Alsószentiván)

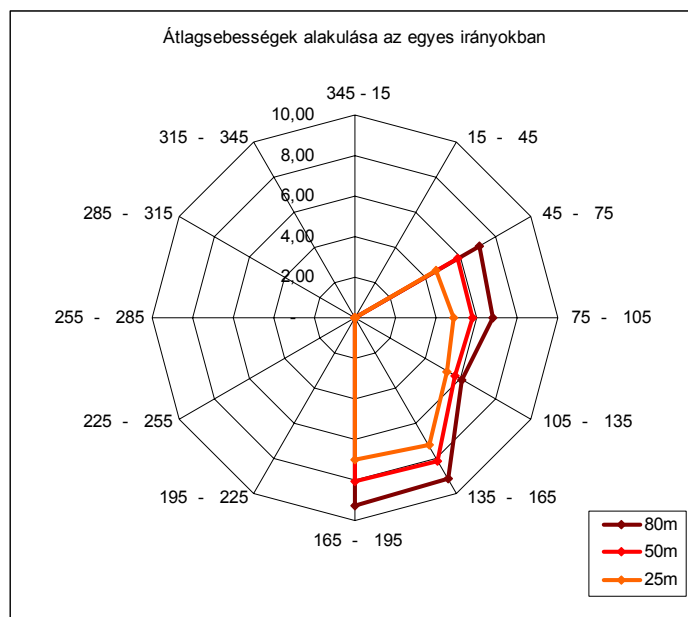


4.25 ábra A szélesebességek és szélirány alakulása különféle magasságokban a nap során (Alsószentiván)

Ha az átlag sebességeket vizsgáljuk az egyes szélirányokban, akkor a magassági korrekcióhoz hasonlóan (4.26 ábra) mindegyik szélirányban a magassággal növekvő szélesebesség értékek adódnak (4.27 ábra).

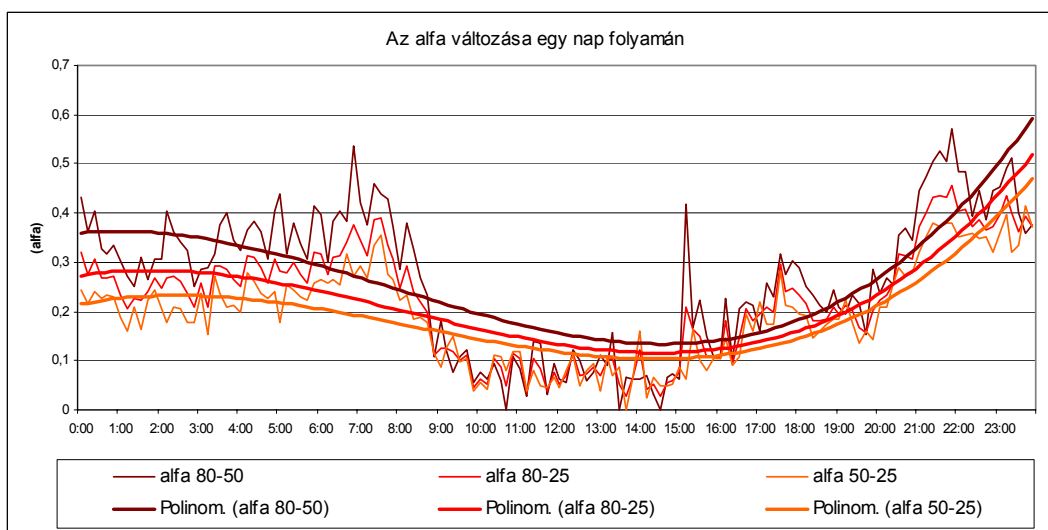


4.26 ábra Az alfa tényező alakulása az előző ábrának megfelelő mérési időpontban különféle magasságokban (Alsószentiván)



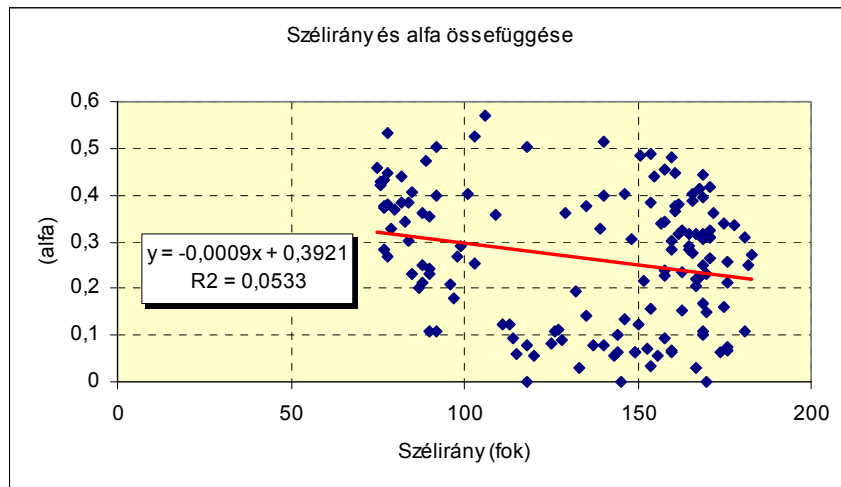
4.27 ábra Az átlag sebességek alakulása különféle magasságokban az egyes szélirány szektorokban (12 szektor) (Alsószentiván)

Az alfa tényező alakulása azonban ehhez az alakzathoz már csak a szektorok elhelyezkedésében hasonlít. Egyáltalán nem fedezhető fel tendencia. Az alfa alakulása a nap során az összesített értékekhez hasonló. A déli órákra mindegyik magasságban csökken az alfa (4.28).

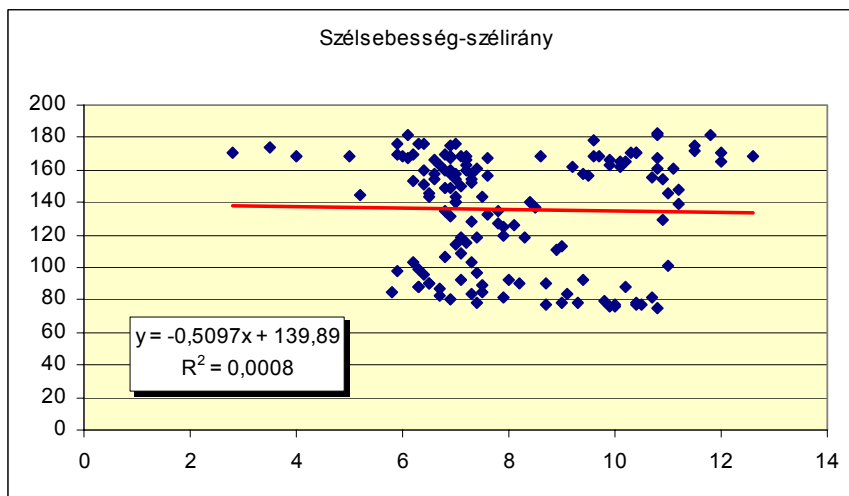


4.28 ábra A szélesség és a szélirány alakulása a 24 óra során 10 perces mérések átlagai szerint. Az illesztett polinomok berajzolásával a trend szemléltetése céljából (Alsószentiván)

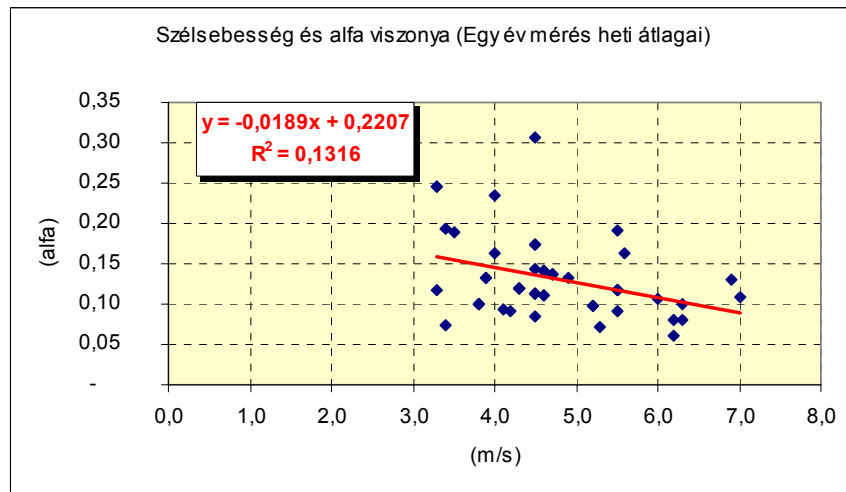
Ugyanakkor a napi szélirányok és az alfa tényezők között nincs összefüggés. Hasonlóan nem tapasztalható összefüggés a szélesség és a szélirányok között, de a szélesség és az alfa tényező között sem. (4.29-4.31 ábrák)



4.29 ábra A szélirány és az alfa összefüggése a napi 144 mérési átlag alapján (összefüggés nem állapítható meg)

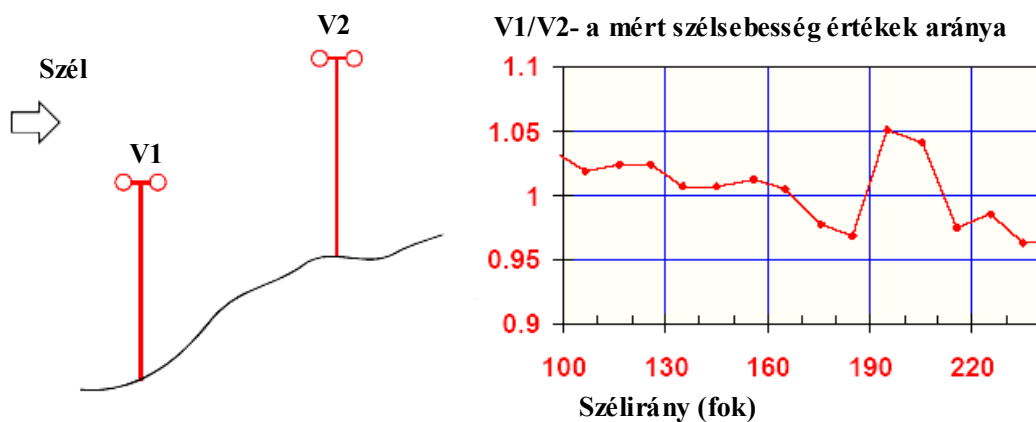


4.30 ábra A szélesség és szélirány alakulása 144 mérési átlag alapján statisztikai összefüggés nincs.



4.31 ábra Szélsebesség és az alfa viszonya egy év mérései alapján a heti átlag eredményeknek megfelelően (Bogyoszló, összefüggés nem állapítható meg)

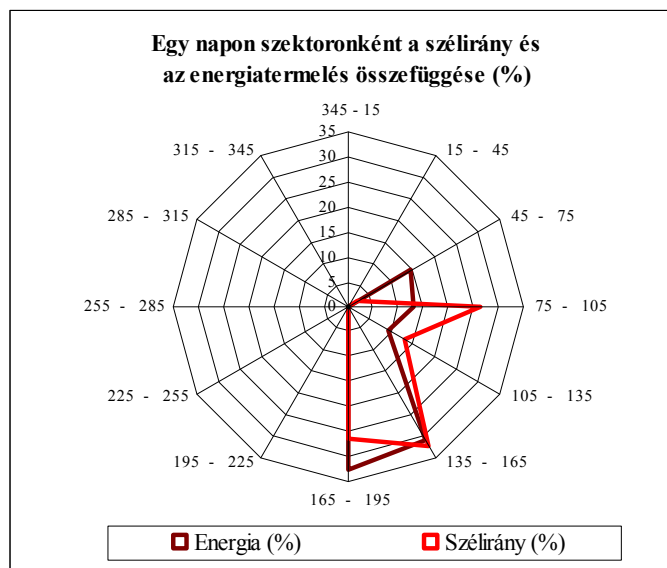
Ugyanakkor a domborzati viszonyokkal kapcsolatos méréseink azt igazolják, hogy domboldalon ugyanazon magasságban végzett méréseknél a két mérési ponton a szélsebesség hányadosa mind pozitív, mind negatív irányú eltérést mutat, mellyel feltétlenül számolni kell akkor, ha változó felszíni domborzati viszonyok mellett végzünk szélpark telepítést (4.32 ábra).



4.32 ábra A két magasságban domboldalon mért szélsebességek viszonya különböző szélirányokban

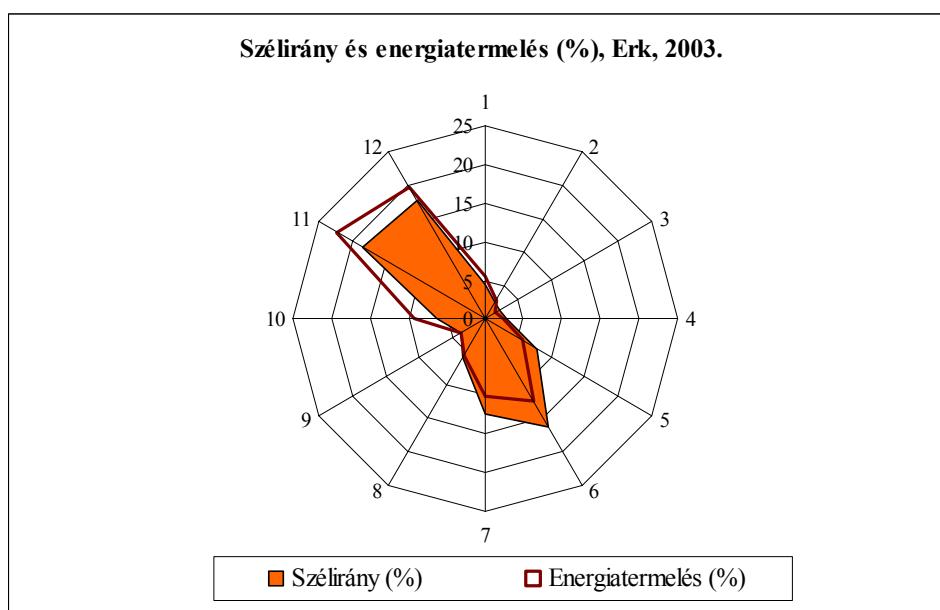
Az 4.32 ábra is jól szemlélteti, hogy az eltérő szélirányok lejtős területen a magasság függvényében jelentős mértékben megváltoztatják az áramlási viszonyokat.

Egy szektoron belül a szélirány és az energiatermelés összefüggése már inkább megállapítható (4.33 ábra). Nem feltétlenül azon szélirányban jelentkeznek a legnagyobb energiatermelések, ahol legnagyobb mértékű a szélirány előfordulása.

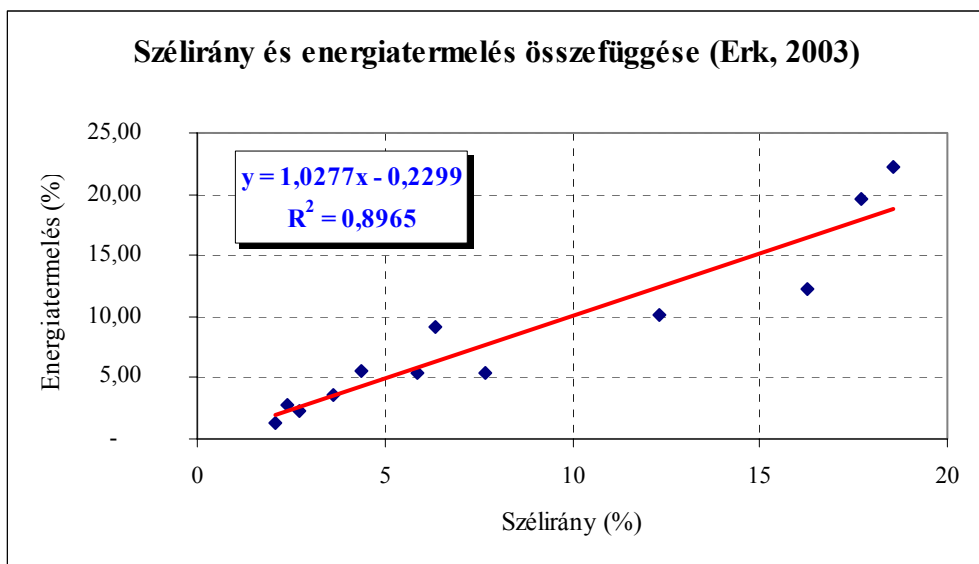


4.33 ábra Szélirány és az energiatermelés megjelenítése szektorok szerint.

Gyengébb trend is felfedezhető éves vonatkozásban az Erk térségében végzett szélmérések során. A szélirány és energiatermelés alakulásának kördiagramja jól szemlélteti a szélirány és a fő energiatermelő irányok egybeesését (4.34 ábra).



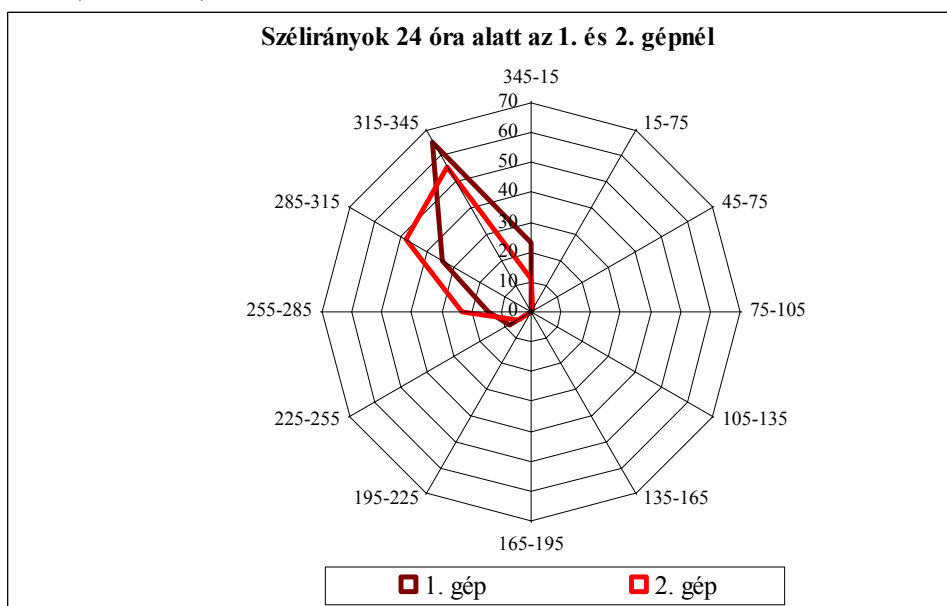
4.34 ábra A szélirány és az energiatermelés alakulása egy éves adatbázis alapján.



4.35 ábra A 4.34 ábrának megfelelő szélirány és energiatermelés összefüggése statisztikailag biztosított.

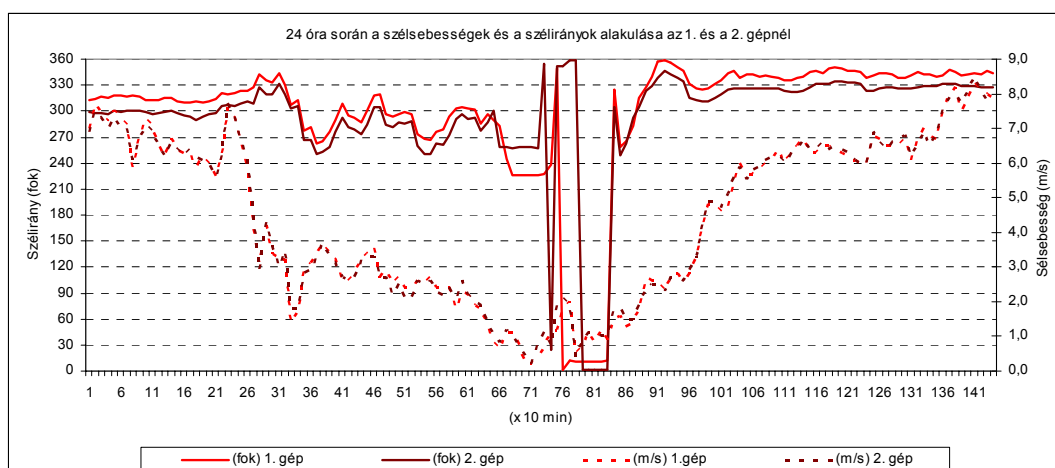
Egész éves vonatkozásban e trend már statisztikailag biztosítottnak tekinthető, $R^2 \approx 0,9$ érték adódik 4.35 ábra.

A mosonszolnoki gépeknél a 2 gép egymástól ugyancsak 3-400 m távolságban van, a szélirány mind éves mind rövidebb időtartam vonatkozásában is jelentős eltéréseket mutat (4.36 ábra).



4.36 ábra A Mosonszolnokon működő generátoroknál 24 óra alatt a szélirányok eltérése szektorok szerint (Forrás: E.ON Hungária Rt.)

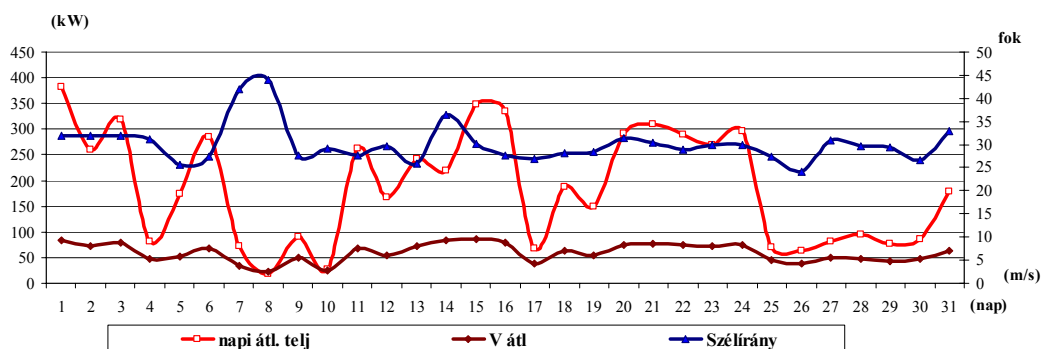
Jól megfigyelhető, hogy a nap során 10 perces átlag értékek alapján is eltérés tapasztalható a szélirányban de a szélességben is (4.37 ábra).



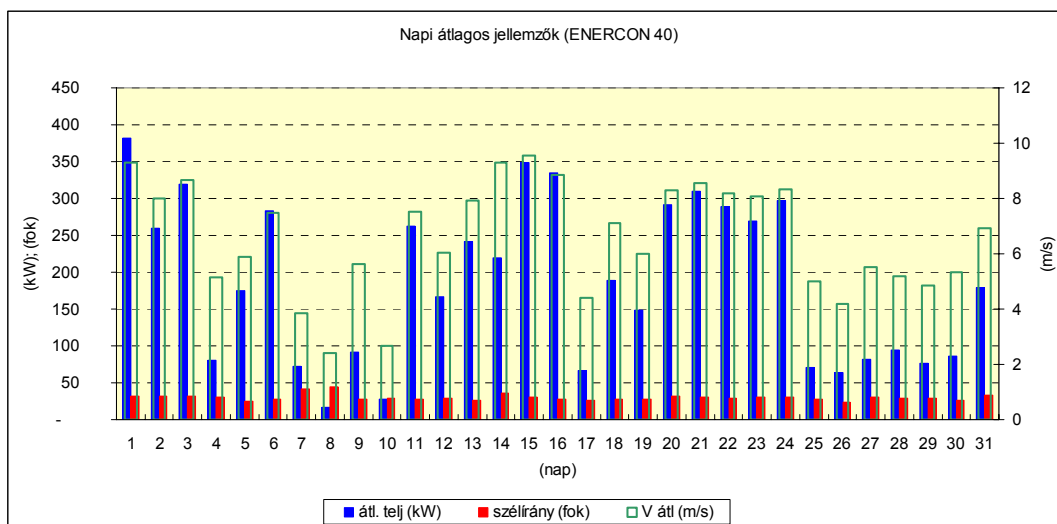
4.37 ábra Szélirányok és szélességek alakulása (Forrás: E.ON Hungária Rt.)

A 4.37 ábrán a szélirányok és a szélesség alakulása látható egy adott napon. A középső szakaszon látható jelentős eltérés csak vizuális problémát jelent, mivel a változás valóságosan néhány fokot jelent csupán.

A havi energiatermelés napi átlagértékei alapján az a következtetés vonható le, hogy a jelentős szélirányváltozásokat mutató napokon az átlagos szélirányhoz képest is jelentősebb energiatermelés visszaesés tapasztalható, feltehető, hogy a szélirányváltozást a gondola nem képes kellő intenzitással követni és ez energiavesztésben jelentkezik (4.38 ábra). Látható, hogy a nagyobb szélirányváltozások együtt járnak szélesség csökkenéssel, és az energia minimumok is erre az időszakra esnek (4.38 és 4.39 ábra).

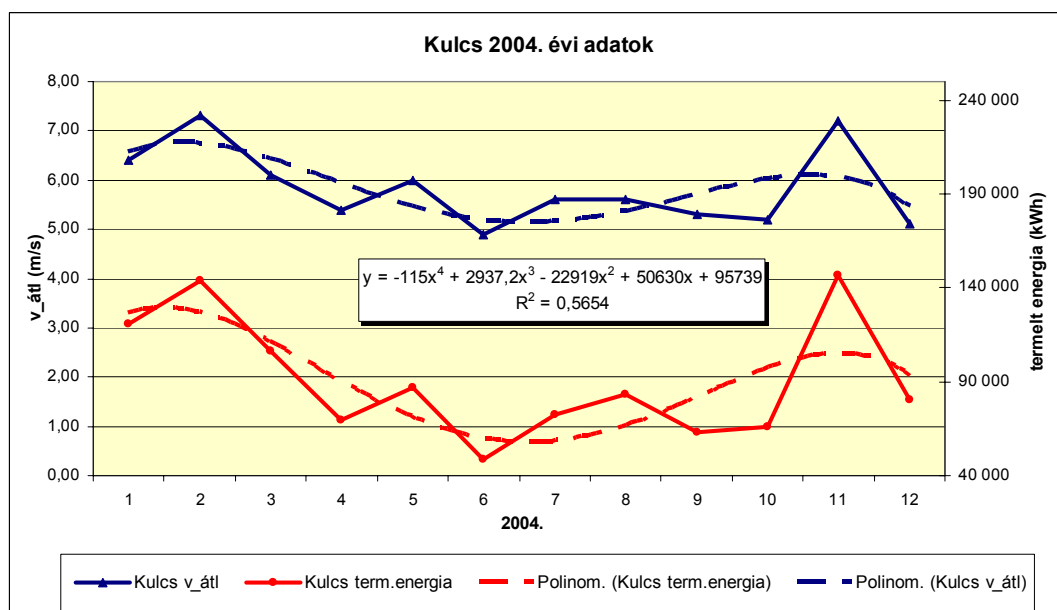


4.38 ábra A havi energiatermelés az átlagos szélesség és a szélirány változás alakulása a mosonszolnoki I. erőműnél egy hónap során a napi átlagok figyelembevételével (Forrás: E.ON Hungária Rt.)



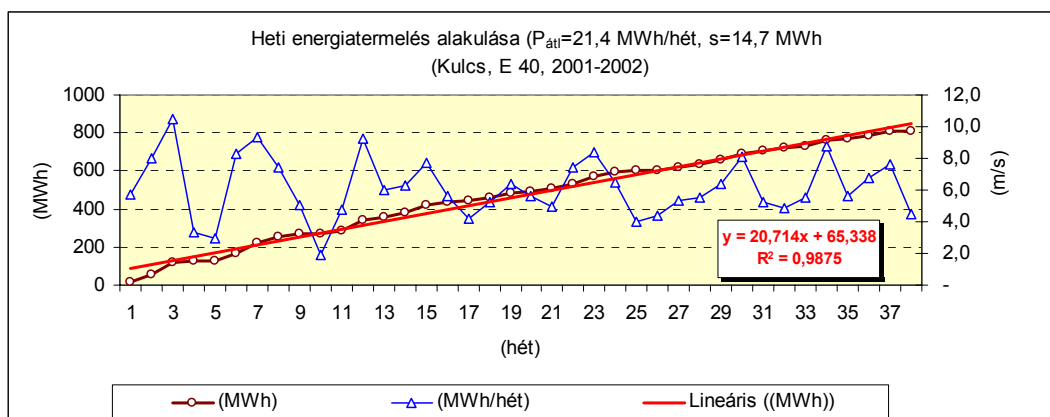
4.39 ábra A mosonszolnoki I. erőműnél a napi átlagos szélirány, átlagos szélesség és átlagos óránkénti teljesítmény alakulása egy hónap során. (Forrás: E.ON Hungária Rt.)

Ha a havi átlagos energiatermelések és szélességek viszonyát vizsgáljuk, ott az eltérés kevésbé tendenciózus, de mind az átlagos szélességek, mind az energiatermelés éves vonatkozásban fellelhető a negyedfokú polinom, mely egy év vonatkozásában sem mutat tendenciabeli különbséget. Havi vonatkozásban az átlagos szélességet és a termelt energiát a 4.40 ábra jól szemlélteti.



4.40 ábra Kulcsi erőműnél a szélességek és az energiatermelés alakulása a 2004. év során. (Forrás: EMSZET Kft.)

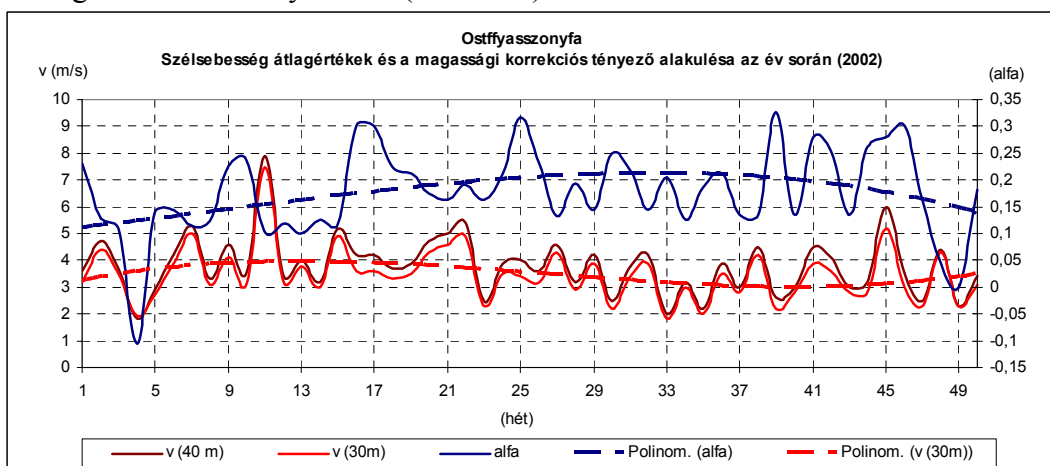
A kulcsi E40-es berendezést több éven keresztül is figyelemmel kísértem, megállapítható, hogy az energiatermelésben heti összegezések alapján szoros trend alakul ki, vagyis az energiatermelés becslése kellő biztonságu, természetesen az egyes évek közötti eltérések figyelembe vételével (4.41 ábra).



4.41 ábra A kulcsi szélérőműnél az energiatermelés alakulása 2001-2002. év egyes szakaszaiban (Forrás: EMSZET Kft.)

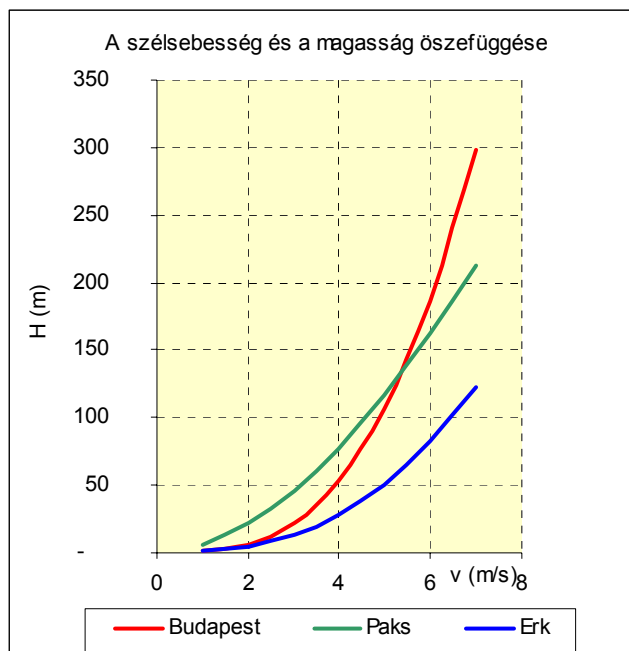
Az összegzett energiatermelés jó korrelációt mutat, amely más gépeknél is alkalmas lehet a várható energiatermelés becslésére.

Az energiatermelés becslésénél a korrekciós tényezővel feltétlenül számolni kell mind átlagosan, mind szélirányok szerint. Az Ostffyasszonyfán végzett közel 3 éves mérési eredményeknél ugyancsak megállapítható, a negyedfokú polinom szerinti éves szélesség trend, miközben az alfa tényező csúcsértéke a nyári hónapokra az alacsonyabb szélességű időszakokra esik. Hasonló tendencia figyelhető meg más mérési helyeken is (4.42 ábra).



4.42 ábra Mérési adatok Ostffyasszonyfán

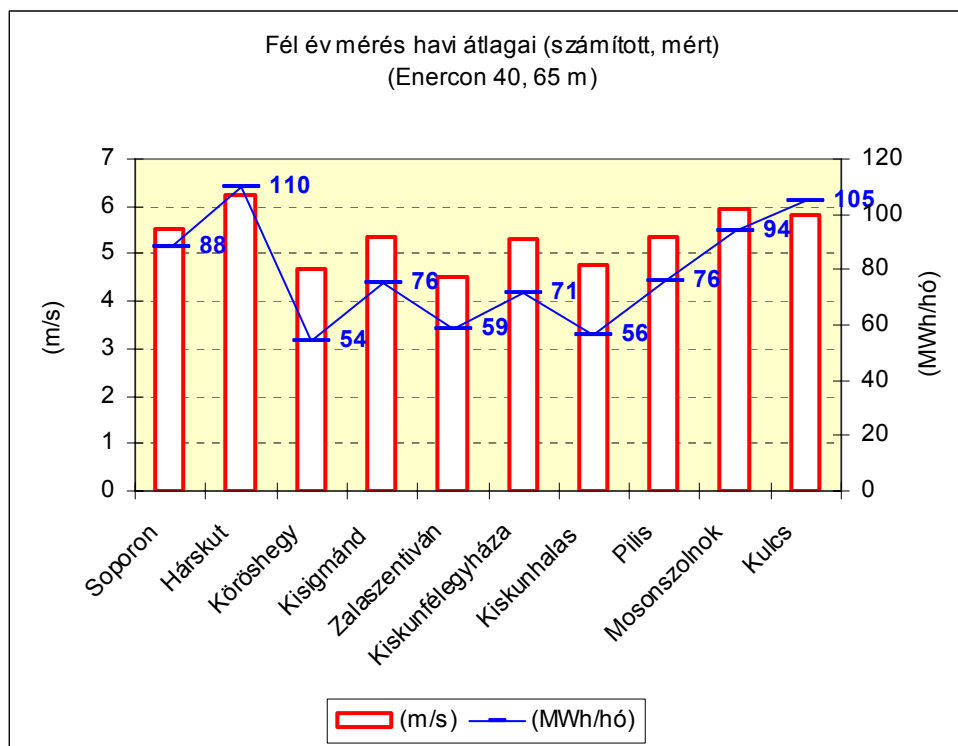
Igen jelentős magasságok szerinti szélesség átlagérték adódik a környezethatására, így 3 mérési helyet szemléltet a 4.43 ábra, melyből megállapítható, hogy a kellő energiatermeléshez szükséges 6m/s-os szélesség Erk térségében már 80, Paks térségében 180, és Budapest térségében 120 m magasságban adódik. Ez a beruházásoknál jelentős eltérést okozhat, a nagyobb oszlop magasság igénye miatt.



4.43 ábra A szélesség változása a magasság függvényében három eltérő helyen. Annak szemléltetése céljából, hogy a környezet milyen hatással bír a magasság növekedésével bekövetkező változásra (OMSZ).

A 4.44 ábrán különféle helyeken mért féléves mérési eredmények alakulása a szélesség vonatkozásában az adott helyeken mért magassági korrekciós tényezővel, a szélesség 65 m-re átszámítva, továbbá a kalkulált energiatermelés az adott helyeken havi átlagra vetítve.

Az ország különböző helyein végzett mérések alapján végzett kalkulációk is azt igazolják, hogy azokon a helyeken ahol az energiatermelés elfogadható értékű, ott a 65 m magasságban mért szélességnek az 5-5,3 m/s értéket meg kell haladnia. Alkalmatlannak bizonyult pl. ábra szerint Kőröshegy, Zalaszentiván, Kiskunhalas térsége. A végzett nagy számú mérés alapján kijelenthető, hogy Magyarországon minimálisan 100 m magas oszlopokon célszerű a generátorokat elhelyezni, mivel ezekben a magasságokban a jelenlegi Enercon gépeknél lévő 60-65 m magassággal szemben 50-70%-kal több energia nyerhető, amely a gépek kihasználási tényezőjénél is jól megmutatkozik.



4.44 ábra Több helyen folytatott mérések adatai

Viszonylag egyszerű összefüggésekkel lehet szélesebbésségből az energiatermelésre vonatkozóan előrejelzéseket tenni, ha az irányváltozásokat (s annak jellemzőit) elhanyagoljuk. A gyakorlati ellenőrzések azt mutatják, hogy az irányváltozásokat, amelyekre a légköri stabilitás mellett a domborzat bír legnagyobb hatással megkülönböztetett gondtal kell kezelni. Nagyobb biztonságú kalkulációhoz (megbízhatóságához) elegendő számú adat kell az adott területre vonatkozóan (szélesebbésségek-, szélirányok változására és az atmoszféra stabilitására). A gyakorlati ellenőrző megfigyelések is ezeket bizonyítják, miszerint (Mosonszolnok: kWh/nap = 2-5%) jelentéktelen környezeti eltérések is számottevő energianyeresi változásokat okoznak.

Magyarországon a szélerőmű parkok telepítéséhez az igen változó felszíni sűrűlódás és tagolt felszín miatt gondos előzetes helyszíni mérési és elemzési munka szükséges. Amint pontosítjuk a telepítési helyszínét, a domborzati ellenállási törvényt és a meghatározott szélprofilokat, valamint a mérés során szerzett további részletes információt felhasználva, a WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) segítségével az egyes telepítési pontok környezetére a várható energiatermelések jó közelítéssel prognosztizálhatók, természetesen a gépek kölcsönhatását is figyelembe véve. A nem modellezett hatások (eltérések) számításba vételéhez (a hasonló helyszínekre vonatkozó tapasztalatok mellett), a kimeneti statisztikai modell (MOS – Model Output Statistics) szolgálhat.

4.7 Új tudományos eredmények

1. A helyi (földrajzi koordinátákkal meghatározott) energia célú szélméréssel és a meteorológiai szolgálat (térségben mért) hagyományos klimatológiai (több éves) adatainak megfelelő célú feldolgozása révén – a vonatkozó időszakra jellemző szél átlagos energia tartalomtól függően - a szélerőművekkel várható villamos energiatermelés (a generátorjellemzők ismeretében) Magyarországon is kellő pontossággal (3-7%) prognosztizálható. Elemzésem szerint az év során a várható átlagos szélesebesség értékeit és az éves energiatermelést (heti, vagy havi adatsorokból), mind a prognózisokban, mind a működő erőművekben negyedik fokú polinomok jól leírják. ($R^2 > 0,6$).
2. Adott helyszínrre, nagyobb magasságokra (100-150 m) az átlagos szélesebesség, ill. a szélprofil számításához, a Hellmann összefüggés α tényezőjének meghatározása szükséges, de csak akkor használható fel, ha a mérési pont közvetlen környezetében zavartalanok az áramlási viszonyok. Magyarországon a kedvező szélpotenciált mutató területeken az α tényező értéke 25-60 m magassági tartományok között 0,2-0,5-re adódik. Éves mérési adatokból számított α tényező értékére a topográfiai és a felületi érdességi viszonyok meghatározóbbak, mint az adott terület légköri szélklímája (az α tényező értékében a helyi érdességtől függően 20-70 %-os az eltérés). A magyarországi topográfiai és felületi sűrűlódási viszonyok alapján a kiegyenlítődség átlagosan 50 m felszín feletti magasságban következik be, s ezért a beruházásokat megalapozó szélmérések csak ennél nagyobb magasságban (felső anemométer) szolgáltatnak kellő pontosságú eredményt a prognózisok készítéséhez.
3. Az energetikai szélmérések alapján az átlagos szélesebességekkel meghatározott szélprofil legnagyobb eltérése a napszakok változása folyamán adódik, a déli órákban a legkisebb az α tényező értéke ($\alpha \approx 0,0 - 0,1$), s ekkor a leginkább kiegyenlített az áramlás. Az éjszakai órákban az α tényező értéke a magasság függvényében jelentősen növekszik (2-3 szoros érték, éves átlagban), s kevésbé kiegyenlített az áramlat. Az általam vizsgált tartományban (25-85m), napközben a magasabban lévő a nagyobb-, s az alacsonyabban lévő kisebb sebességi tartományok az 50-60m magasságban lévő kiegyenlítődségi zónához „húzódnak”. Vagyis napközben –főként 13.00-16.00 óra között – egymáshoz közelednek, az áramlatok egyenletesebbek, az éjszakai órákban (főként 22.00-02.00 óra között) a sebességtartomány kitágul. Jelenleg Magyarországon üzemelő, vízszintes tengelyű szélerőművekkel, éves átlagban, a déli órákban várható nagyobb energiatermelés. Ezt a hazai szélerőműveknél végzett energetikai mérések igazolták. A korlátozott

magasságú anemométeres méréseinkből levont következtetést, 30-150 m magasságok között, az akusztikus SODAR mérések részben igazolták.

4. A több helyen végzett méréseim szerint (SZIE konzorciumi munkacsoporttal együttműködve) magyarországi viszonyok között (felület, szélklíma) a szélerőművektől kedvező eredményt csak 100 m fölötti generátor magasságban várható. Az országnak több területe van, ahol a szélpotenciál gazdagságos energiatermelést tesz lehetővé, vagyis a $H > 100$ m gondola magasságban, a $v_a > 6,0$ m/s.
5. A nagyobb változatosságot mutató orográfiai területeken a későbbi szélpark modellezések alapját szolgáló szélmérési adatbázist, csak nagyobb magasságokban, több ponton elhelyezett anemométerek (min. 3 db, 50-90 m magassági tartományban) szolgáltatnak. Az éves várható energiatermelés kalkulációjához az α tényező magassági változását az összes mért szélirányra vetítve átlagosan, de szélirányonként (szektoronkénti) is számítani kell, mivel a szélirány és az energiatermelés között statisztikailag biztos összefüggést van.
6. Önmagában a szélirányok és az α tényező, valamint a szélesebességek nagysága és a szélirányok között nincs statisztikailag biztosított összefüggés. A szélesebességek átlagértékének szórása az átlag növekedésével nagyobb. Az α tényező értéke az év során is folyamatosan változik, legmagasabb értéket nyáron az általában alacsonyabb szélesebességekkel rendelkező időszakokban ér el, tehát ekkor kiegyenlítettebb széljárásról beszélhetünk.
7. Az ország több területe is alkalmas szélerőművek telepítésére. Ezt bizonyítják a SZIE GEK konzorciumhoz kapcsolódó több térségre kiterjedt mérései, s ezen mérések, valamint az OMSZ méréseinek egybevetésével készül magyarországi széltérkép is. E prognózist alátámasztja a Kulcsón és Mosonszolnokon működő szélerőművek jellemzőinek elemzése is, miszerint a két topográfiaileg eltérő és egymástól távolabb eső, de teljesen azonos műszaki paraméterrel rendelkező erőműnél az energiatermelés éves szinten azonos (Eltérés < 4%).

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A disszertációban leírtak és a tézisek alapján kimondható, hogy a szélenergia hasznosítására Magyarország egyes területein komoly lehetőségek nyílnak, melyek nagyban hozzásegítenek bennünket, hogy 2010-re elérjük a Kiotói szerződésben rögzített megújuló energiaforrásból előállított villamos energia termelés 3,6%-os rész-arányát.

A szélgenerátorok telepítésére alkalmas hely kiválasztásához egyik legfontosabb szempont a hosszú távú szélpotenciál prognózis, melyhez elengedhetetlen a disszertációmban is részletezett mérések elvégzése és a kapott adatok elemzése. A legalább 1 éves mérés illetve az elemző munka hiányában nem lehet pontos képet kapni a helyi szélviszonyokról, a várható energiatermelésről, nem lehet garantálni a megfelelő géptípus kiválasztását.

A hosszú távú mérések és elemzések lehetővé teszik a helyi éves széljárás feltérképezését. A mérések és megfigyelések bizonyítják, hogy az átvonuló frontok hatása országos szinten nézve is követhető, kimutatható. Ezek ismeretében az éves várható energiatermelés hazai viszonyok között is jó közelítéssel prognosztizálható. Ezt a már meglévő hazai szélgenerátorok előre jelzett és megtermelt energia adatai is alátámasztják. Ennek tükrében javasolt az együttműködés az OMSZ már meglévő és üzemelő szélmérő hálózatával, ami folyamatos információt szolgáltat a frontok vonulásáról.

Kutatásaim bebizonyították, hogy a szélviszonyok feltérképezésénél, a szélből kinyerhető energia prognózisánál nagyobb hangsúlyt kell kapjon az ún. Hellmann (α) tényező vizsgálata. A teljes körű felmérés során a szélsébség magasságtól illetve az egyes szélirányoktól való összefüggése kimutatható, mely alapvető információ ad a hely alkalmasságáról illetve a megfelelő gép kiválasztásához.

A mérési módszereket a hazai viszonyoknak megfelelően alakítottuk ki, a kapott eredmények a magyarországi széljárás sajátosságait tükrözik. A kutatásaink módszereit és eredményeit az Országos Meteorológiai Szolgálattal közös konzorcium keretén belül elkészítendő hazai széltérképnél is alkalmazni fogjuk.

A mérések során alkalmazott mérőállványok gyártását és telepítését hazai vállalkozók is el tudják végezni, ezen területen nem vagyunk a külföldi szélgenerátor gyártó cégekre utalva.

Disszertációmban ajánlást tettem a hazai viszonyok között gazdaságosabban üzemeltethető ún. Pitch rendszerű géptípusok alkalmazására, mivel ezek kisebb szél-tartományban is termelnek energiát, de villamos energiát nem vesznek fel a hálózatból. Védelmi rendszerük kialakításából adódóan extrém időjárási viszonyok között is kisebb a sérülés veszélye.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Mint bevezetőmben a téma jelentőségének megfogalmazásánál írtam a szélenergia mint alternatív energiaforrás alkalmazása ma már nem csak környezeti hanem egyre jobban gazdasági kérdéssé is válik. Véleményem szerint a téma aktualitása ma már nem kérdéses.

A disszertáció témája a több éves és több helyen végzett szélmérések adatainak számítógépes elemzésén keresztül:

- a hazai szélviszonyok jellemzése,
- az alkalmazott mérések és adatfeldolgozás módszerének bemutatása,
- szélenergia hazai kihasználásának létjogosultságának alátámasztása,
- ajánlás a hazai viszonyok között legalkalmasabb szélerőmű típusokra.

Az irodalmi áttekintésben összefoglaltam a számos külföldi és a szerencsére egyre bővebb hazai szakirodalmat, melyet tanulmányaim és kutatásaim során felhasználtam.

Az ország számos pontján, egymástól teljesen eltérő domborzati helyeken folytattunk méréseket. Mind a meglévő meteorológiai állomások illetve már üzemelő szélerőművek, mind újonnan felállított mérőállványokon elhelyezett mérők adatait kielemeztük. A mérések során használtunk teleszkópos, illetve részegységekből összeszerelhető tornyokat illetve rácsos állványokat. Méréseket végeztük egy, kettő illetve három magasságban is. A disszertációban összefoglalt módszereket és eredményeket számos mérés tapasztalatai és adatai alapján írtam le.

A mérések kiértékelését a saját magam által írt programok (makrók) segítségével végeztem el, az adatok összehasonlításához és megjelenítéséhez a mérőberendezésekhez kapott célszoftvert használtam segítségül.

A kapott eredményeket számos helyen végzett és több évig folytatott mérések adatainak feldolgozásából kaptam. Mint kiderül, a pontos prognózishoz alapvetően szükséges mind a jól megválasztott hely és a jól kiépített mérőhely, mind pedig az adatok megfelelő módon történő kiértékelése. A hazai szakirodalomban a kiértékelés módszereire nem találtam leírást, a külföldi szakirodalom pedig nem fogalmaz egyöntetűen. Így a módszerek kialakításában saját tapasztalatainkra és kreativitásunkra voltunk hagyatkozva.

A kutatásaim során bebizonyosodott, hogy a helyi szélviszonyok megismeréséhez, és a szélből kinyerhető energia minél pontosabb előrejelzéséhez nagy figyelmet kell szentelni az ún. Hellmann (α) tényező vizsgálatára. A szélesebb magasság-

tól illetve az egyes szélirányoktól való függvénye alapvető információt ad a hely alkalmasságáról illetve a megfelelő gép kiválasztásához.

Bebizonyosodott az, hogy a hosszú távú szélklíma adatok, de legalább az egy éves célorientált mérések elengedhetetlenek a helyi szélviszonyok megismeréséhez.

Az is bizonyítottnak látszik, hogy a helyi szélviszonyok éves ismerete és az országos széljárás figyelése pontos energetikai prognózist tesz lehetővé. Így javasolt az együttműködés a már meglévő Országos Meteorológia Szolgálat szélmérő hálózatával.

Az érintett témában még sok a felderítetlen terület, a megjelent szakirodalom nem ad minden kérdésre egyértelmű választ, több helyen ellentmondásos vélemények fogalmazódnak meg. Éppen ezért látom fontosnak a jövőben is e témakörben a kutatások folytatását, hiszen - ahogy a bevezetőben is írtam - a téma egyre nagyobb hangsúlyt kap a mindennapi életünkben.

7. MELLÉKLETEK

7.1 Irodalomjegyzék

1. Antal E. – Jeney Cs. – Urbán L. (1980): Meteorológiai műszertan, Gödöllő pp. 65-69.
2. Balogh E. – Homola V. (1997): A szélerőművek jövője, Energiagazdálkodás XXXVIII. évf. 1997. 11. szám
3. Barótfi I. (szerk.) (1994): Energiafelhasználói kézikönyv, Környezet – technika Szolgáltató Kft., Bp. pp. 927-933.
4. Bartholy J. - Radics K.: A szélerőenergiahasznosítás lehetőségei a Kárpát-medencében KLTE Meteorológiai Füzetek, 14. 1999.
5. Bitó J. - Sinka J.: Jövők kulcsa az energia, Kossuth Könyvkiadó, Budapest 1973.
6. Blahó M. - Grüber J.: Folyadékok mechanikája, Tankönyvkiadó, Budapest, 1971.
7. Bohoczky F: Megújuló energiaforrások és az energiapolitika, Magyar Szélerőenergia Társaság Kiadványai. No. 1. 2001. 5-8 p
8. Cets-Enery Engineering Board 1991 Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor, Materials Technology, National Academy Press; ISBN 0309044790
9. Chadwick H.: Meteorology for Wind Power Generation, De Monfort University
10. Clark, R. N. - Schneider, A. D.: Irrigation pumping with wind energy, Transactions of ASAE. 1980. 850-853p.
11. Czelnai R. (1980): A meteorológia eszközei és módszerei (kézirat), Bp. pp. 115-120.
12. Davenport W.: Rationale for determining design wind velocities. ASCE, 1960.
13. David A. 1994.: Wind Turbine Technology : Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, Amer Society of Mechanical Engineers; ISBN: 0791812057
14. Dévényi – Gulyás (1988): Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában, Tankönyvkiadó, Bp. pp. 137.
15. Dobesch, H. - Tran, H. V.: Objective interpretation of wind measurements MSZTE Konferencia előadásai, Gödöllő, 2001. 16-20p
16. European Comission, Directorate - General Science, Research and Development: European wind turbine standards. Bruxelles : EC, 1996.
17. European Communities 1996. Non-Nuclear Energy-Joule II European Wind Turbine Standards Project, ISBN: 9282779483
18. European Wind Energy Association (EWEA): Wind Energy, The Facts. Brussels: European Communities, 1999.
19. Gasch, R.: Windkraftanlagen. B.G. Teubner Stuttgart, 1991.

20. GKM – PYLON Kft. Dr. Unk Jánosné: A megújuló energiahordozó-felhasználás növelésének költségei, Budapest 2004.
21. Heier, S.: Windkraftanlagen im Netzbetrieb. Stuttgart: B.G. Teubner, 1994.
22. Hunyár M. – Tar K. – Tóth P.: Magyarország szélenergia potenciálja, Energiagazdálkodás 45. évf. 2004. 6. szám
23. Hütte: A mérnöki tudományok kézikönyve. Budapest: Springer, 1993.
24. Johansson T.B. et.al.: Renewable Energy. Sources for Fuels and Electricity Island Press. Washington, 1994.
25. Johnson G. L.: Wind Energy Systems. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1985.
26. Kacz K. - Neményi M.: 2000.Megújuló energiaforrások Agrárműszaki Kiskönyvtár 1. Mg. Szaktudás Kiadó, Bp.
27. Kassai F. (témafelelős) - ETE (1989): Irányelvek szélmotorok tervezéséhez, MTESZ Házinyomda, Bp. pp. 6, 16-19.
28. Ledács Kis A.: A szélenergia hasznosítása, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1963.
29. Lysen E. H. (1982): Introduction to Wind Energy, S.W.D. Amersfoort pp. 16-51.
30. Melzer, C.: Wind measurement for energy prognosis, MSZTE Konferencia előadásai, Gödöllő, 2001. 21-27p
31. Mortensen, N. G. et. al : Wind Atlas Analysis and Application Program Risr National Laboratory, Roskilde, 1993.
32. Murakami S.: Computational wind engineering I. Amsterdam: Elsevier Science, 1993.
33. New Energy: Installed wind power capacity. Bundesverband Windenergie, 2000/3.
34. Nordex: Borsig Energy katalógus, 1999.
35. Palotás L.: Mérnöki kézikönyv. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1984.
36. Patay I.: A szélenergia alkalmazási lehetőségei drénezett területeken Tessedik S. Tiszántúli Tudományos Napok kiadványa, Szarvas, 1984. 28-34p.
37. Patay I.: A szélenergiahasznosítás lehetőségei és korlátai MTA AMB Tanácskozás kiadványa, Gödöllő, 1992.
38. Patay I.: Alternatív energiagazdálkodás - lehetőségek és korlátok Szolnoki Tudományos Közlemények, 1998. 24-28.p
39. Patay I.: Lassújárású szélmotorok üzemi jellemzői, Járművek, Mg. Gépek, 1985. 3. 89-96p.
40. Patay I.: Összefüggések a szélmotorok és szélgenerátorok telepítésének tervezéséhez. Gödöllő: Mezőgazdasági Technika, 1997.
41. Petersen E. L.: Wind Power Meteorology, Wind Energy 1, 2-22 (1998)
42. S. Heier, 1998: Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley & Sons;
43. Sassy L.: Áramlástan mérés. Gödöllő: Egyetemi Nyomda, 1993.
44. Sembery P. – Tóth L.: Hagyományos és megújuló energiák, Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 2004. 327-398p.

45. Smith, D. R.: Optimum rotor diameter for horizontal axis wind turbines Wind Engineering, 1982. No. 6. 12-18p.
46. Stelczer B.: Szélerőmű telepítése és áramszolgáltatói hálózatba integrálása MSZTE Konferencia kiadványa, Gödöllő, 2001. 48-53p.
47. Sutherland H. J., Kelley N. D.: Fatigue damage estimate comparisons for northern European and U.S. wind farm loading environments. Washington, D.C.: Proceedings of WindPower 95, 1995.
48. Szász G. – Tőkei L. (szerk.): Meteorológia mezőgazdáknak, kertészeknek, erdészeknek, Mezőgazda Kiadó pp. 108-110.
49. Szlivka F.: Áramlástan. Gödöllő: Egyetemi Nyomda, 1999.
50. Tar K.: Kísérlet a szélenergia statisztikai becslésére MSZTE Konferencia előadásai, Gödöllő, 2001. 28-34p
51. Tóth G. - Horváth G. - Tóth L.: Energetikai célú szélmerés és széltérkép készítés MSZTE Konferencia előadásai, Gödöllő, 2001. 6-10p
52. Tóth L. – Horváth G.: Alternatív energia, Szélmotorok, szélgenerátorok, Szaktudás Kiadó Ház, Budapest 2003.
53. Tóth L. - Horváth G. - Tóth G.: A szélenergia hasznosítása I-II Mezőgazdasági Technika melléklete, 1998.
54. Tóth L. Honti V.: Környezetkímélő energiaforrás a szélmotor. Budapest: Mezőgazdasági Könyvkiadó Vállalat, 1987.
55. Tóth L.– Horváth G. – Tóth G. – Berencsi B. (2000.): A hazai energia célú széltérkép elkészítésének feltételei, SZIE GMK AEET, Gödöllő
56. Tóth P.: A szélenergia hasznosítás hatása a környezet-, az éghajlat-, a természet és a tájvédelemre. Magyar Szélenergia Tudományos Egyesület, Nemzetközi szélenergia Konferencia, Gödöllő 2001.
57. Tóth P.: A Magyar Szélenergia Társaság Legfontosabb Célkitűzései és Cselekvési Programja. 4. Hírlevél 2003. dec.
58. Troen – Petersen: (1989): European Wind Atlas, Risoe National Lab., Denmark pp. 30-33., 56-58.
59. Wootton - Scruton: Aerodynamic stability. The modern design of wind sensitive structure. London: CIRIA, 1971.

7.2 Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

Idegen nyelvű folyóiratban megjelent lektorált cikkek:

1. Tóth L., Horváth G., **Tóth G.**: The use of wind energy in Hungary. Hungarian Agricultural Engineering, 1998/11.
2. Horváth G., Tóth L., **Tóth G.**: A computer aided frequency analysis of a wind turbine. Hungarian Agricultural Engineering, 1999/12.
3. Horváth G., **Tóth G.**, Tóth L.: Wind energy analysis in Hungary, Hungarian Agricultural Research, Vol. 11, No 4., 2000.
4. Tóth, L. – Horváth, G. – **Tóth, G.** – Schrempf, N. – Fogarasi, L. (2003): Domestic Experiences of Operating Wind Generators, Hungarian Agricultural Engineering N° 16/2003, 63-65p.

Idegen nyelvű konferencia kiadványokban megjelent lektorált cikkek:

5. Horváth G., **Tóth G.**, Tóth L.: Available wind energy estimation and its application in Hungary. PhD hallgatók II. Nemzetközi Konferenciája, Miskolci Egyetem, 1999.
6. Horváth G., **Tóth G.**, Tóth L.: Windenergieprojekte und Probleme bei ihrer Verwirklichung in Ungarn. Wind Energie Symposium, St. Pölten, 1999.
7. Horváth G., Tóth L., Szlivka F., **Tóth G.**: Computer aided site planning of the first Hungarian wind turbine installation. II. Országos Gépészeti Konferencia, BME, 2000. május 25-26.
8. Horváth G., Tóth L., **Tóth G.**, Stelczer B.: A feasibility study for wind turbine installation in Hungary. Deutsche Windenergiekonferenz, Deutsches Windenergie-Institut, Wilmelshaven, 2000. június 7-8.

Magyar nyelvű folyóiratban megjelent cikkek:

9. Tóth L., Horváth G., **Tóth G.**: A szélenergia hasznosítása I. Mezőgazdasági Technika 1998. 2. szám

10. Tóth L., Horváth G., **Tóth G.**: A szélenergia hasznosítása II. Mezőgazdasági Technika 1998. 7. Szám
11. Fogarassy Cs., **Tóth G.**: Magyarország biomassza potenciálja napjainkban Mezőgazdasági Technika XXXIX.évfolyam
12. Tóth L. – Schrempf N. – **Tóth G.** (2004): A megújuló energiaforrások hasznosítása az EU elvárások tükrében, Mezőgazdasági Technika, XLV. évf. 7. szám, 23-26. p.
13. Tóth L. – Schrempf N. – **Tóth G.** (2004): A szélenergiát hasznosító berendezések, Áram és Technológia, III. évf. 3. szám, 37-40. p.
14. Tóth L. – Schrempf N. – **Tóth G.** (2004): A szél jellemzése, várható energiatermelés, Áram és Technológia, III. évf. 4. szám, 34-37. p.
15. Tóth L. – Schrempf N. – **Tóth G.** (2004): A villamos szélenergia gépek működése, Áram és Technológia, III. évf. 5-6. szám, 32-36. p.
16. Tóth L. – Schrempf N. – **Tóth G.** (2004): A szélenergia környezeti hatásai, Áram és Technológia, III. évf. 7-8. szám, 23-27. p.

Magyar nyelvű konferencia kiadványokban megjelent cikkek:

17. **Tóth G.**: Szélgenerátorok Magyarországi alkalmazhatóságának vizsgálata, Tudományos Diákköri Konferencia, 1998.
18. **Tóth G.**: Szélgenerátorok Magyarországi alkalmazhatóságának vizsgálata, VI. Országos Felsőoktatási Környezettudományi Diákkonferencián, 1998.
19. Fogarassy Cs., **Tóth G.**: Hazánk biomassza potenciáljának főbb tételei 1997-ben, Gödöllői Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, 1998.
20. Fogarassy Cs., **Tóth G.**: Biomassza 2000-Hu, Nemzetközi Környezetvédelmi Szakmai Diákkonferencia Mezőtúr, 1998.
21. Horváth G., **Tóth G.**, Tóth L.: Szélenergia létezésének magyarországi feltételei. XXIII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, GATE, Gödöllő, 1999. január 19-20.

22. Horváth G., **Tóth G.**, Tóth L.: Szélerőművek létrehozásának magyarországi feltételei. V. Ifjúsági Fórum, PATE, Keszthely, 1999. március 11.
23. Horváth G., Tóth L., **Tóth G.**: Szélgenerátor telepítésének lehetőségei Magyarországon. Agrárinformatika '99, DATE, Debrecen, 1999. augusztus 26.
24. Horváth G., Tóth L., **Tóth G.**: A szélgenerátor oszlop dinamikai elemzése végeselem módszerrel. XXIV. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, SZIE, Gödöllő, 2000. január 18-19.
25. Horváth G., **Tóth G.**, Tóth L.: A hazai energia célú széltérkép elkészítésének feltételei. XXIV. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, SZIE, Gödöllő, 2000. január 18-19.
26. Horváth G., **Tóth G.**, Tóth L.: A szélgenerátor oszlop dinamikai elemzése számítógépes áramlástanai modellezéssel. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 2000. március 24-25
27. Tóth L. – Schrempf N. – **Tóth G.** (2004): Szélmérés, széltérkép, tervezés-gyakorlat, II. ENER expo Nemzetközi Energetikai Szakkiállítás és Konferencia, Debrecen, 28-30 p.
28. Tóth L. – Schrempf N. – **Tóth G.** (2004): A szélenergia hasznosítása és a mezőgazdaság, IV. Alföldi Tudományos Tájégzdálkodási Napok, Mezőtúr, 21-22. p., CD
29. **Tóth G.** – Schrempf N. – Tóth L. (2005): Energiaprognózisok ellenőrzése üzemi tapasztalatokkal, MTA AMB, K+F Tanácskozás Nr. 29 Gödöllő, (megjelenés alatt)

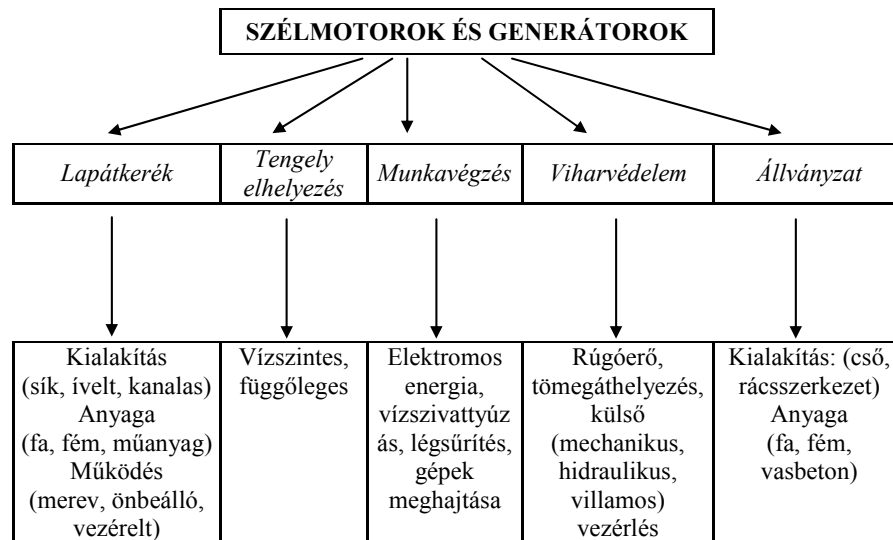
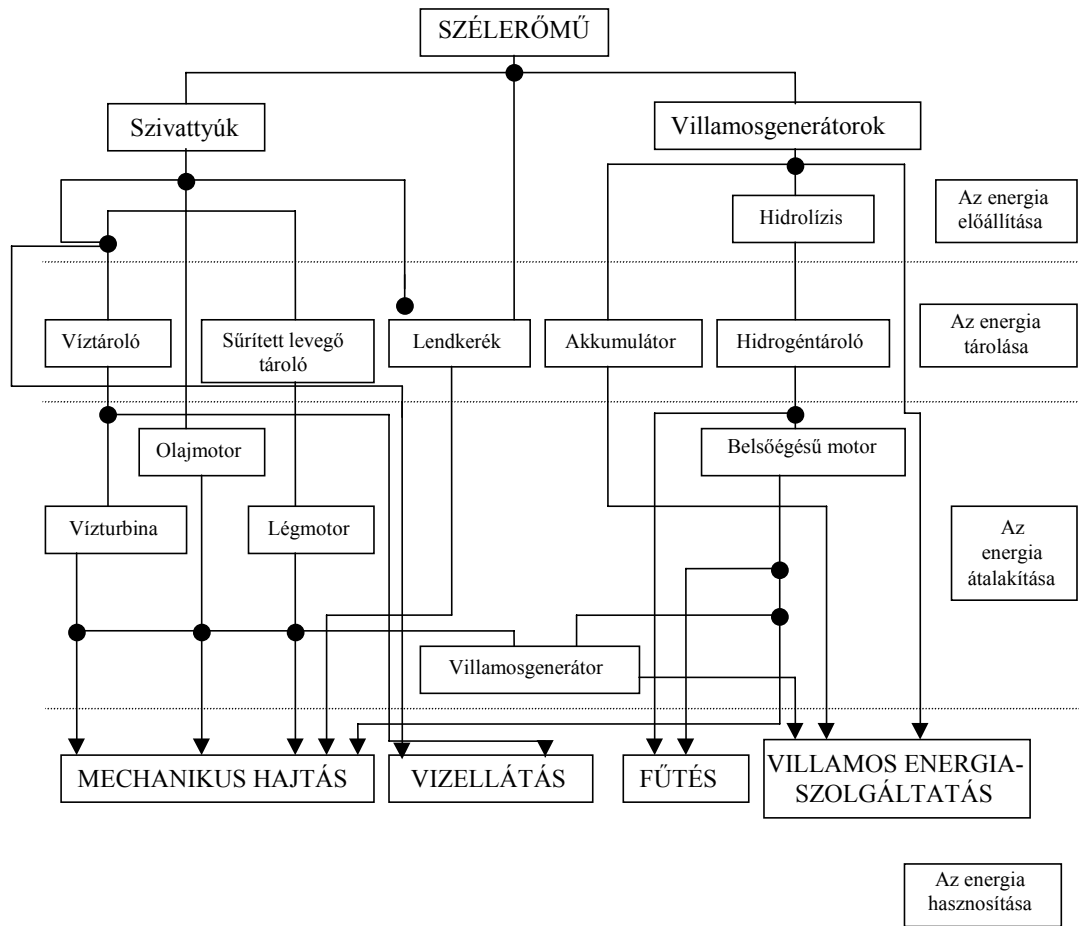
Poszterek

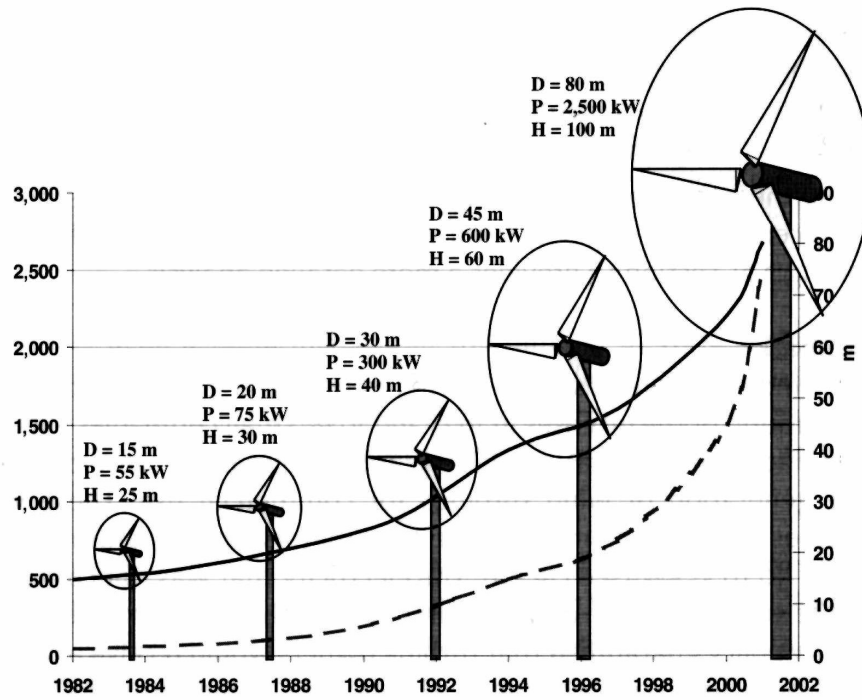
30. Tóth L. – Horváth G. – **Tóth G.** – Schrempf N. (2003): Szélerőművek létesítése Magyarországon; MTA AMB, K+F Tanácskozás Nr. 27 Gödöllő, 3. kötet 166-171. p. 245. p.
31. Tóth L. – Szlivka F. – Balló B. – **Tóth G.** – Schrempf N. (2004): Szélsebességmérők kalibrálására alkalmas szélcsatorna fejlesztése; MTA AMB, K+F Tanácskozás Nr. 28 Gödöllő, 4. kötet 417-421 p.

32. Szlivka F. – Keszthelyi I. – Tóth L. – **Tóth G.** – Schrempf N. (2004): Axiális ventilátor mérésére alkalmas mérőberendezés fejlesztése a Szent István Egyetemen, MTA AMB, K+F Tanácskozás Nr. 28 Gödöllő, 4. kötet 422-426. p.
33. **Tóth G.** – Schrempf N. – Tóth L. (2005): A szélenergia prognosztizálása, üzemi tapasztalatok, MTA AMB, K + F Tanácskozása Nr. 29 Gödöllő,

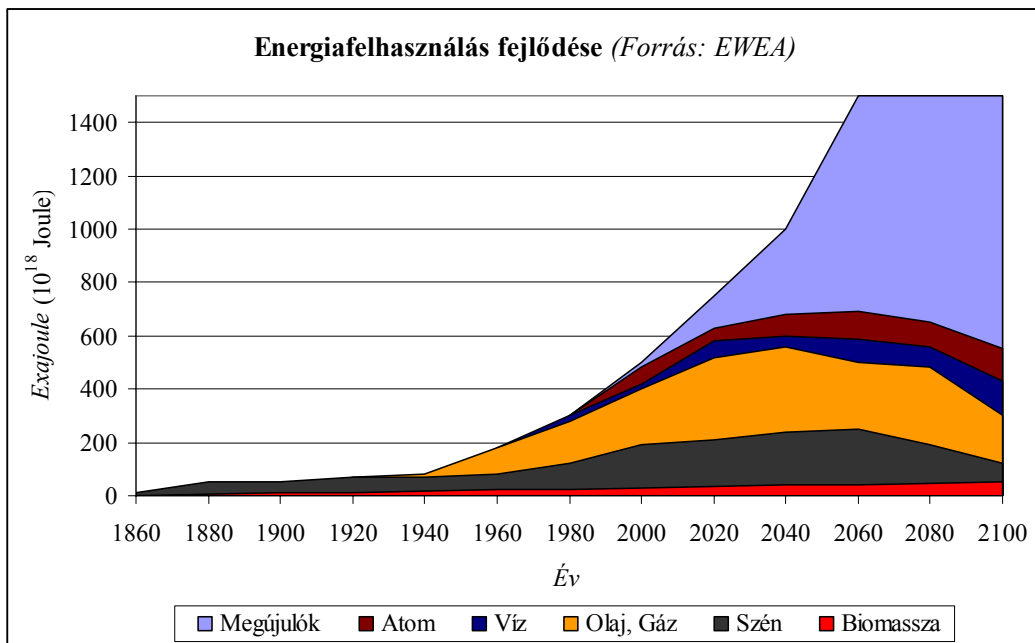
Magyar nyelvű könyv/jegyzet, -részlet

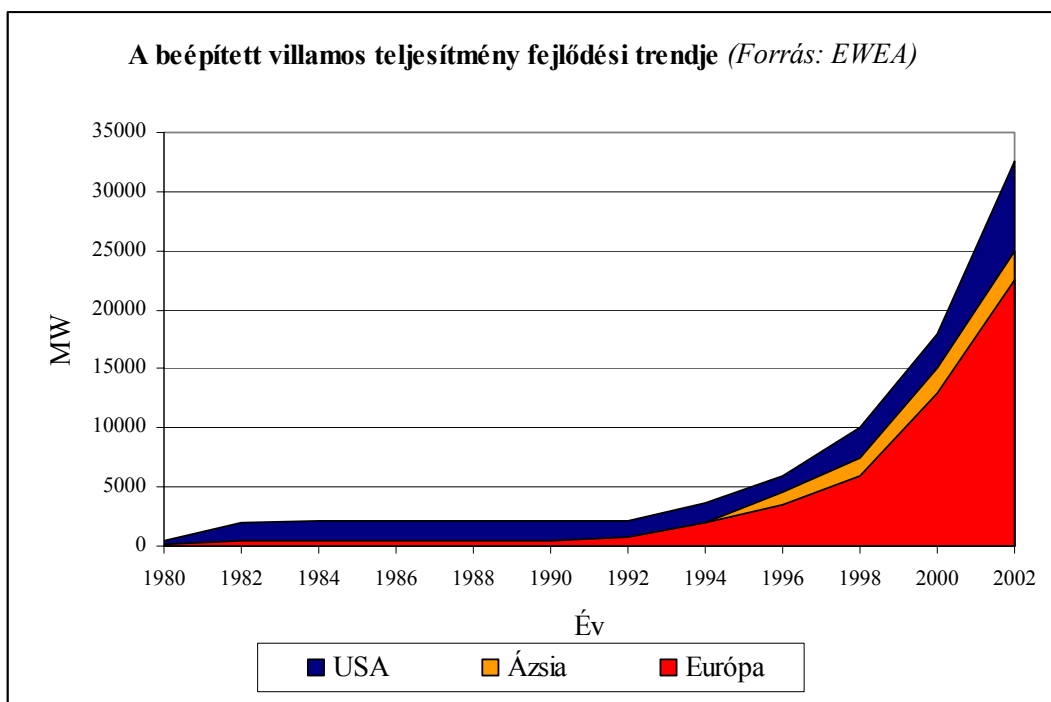
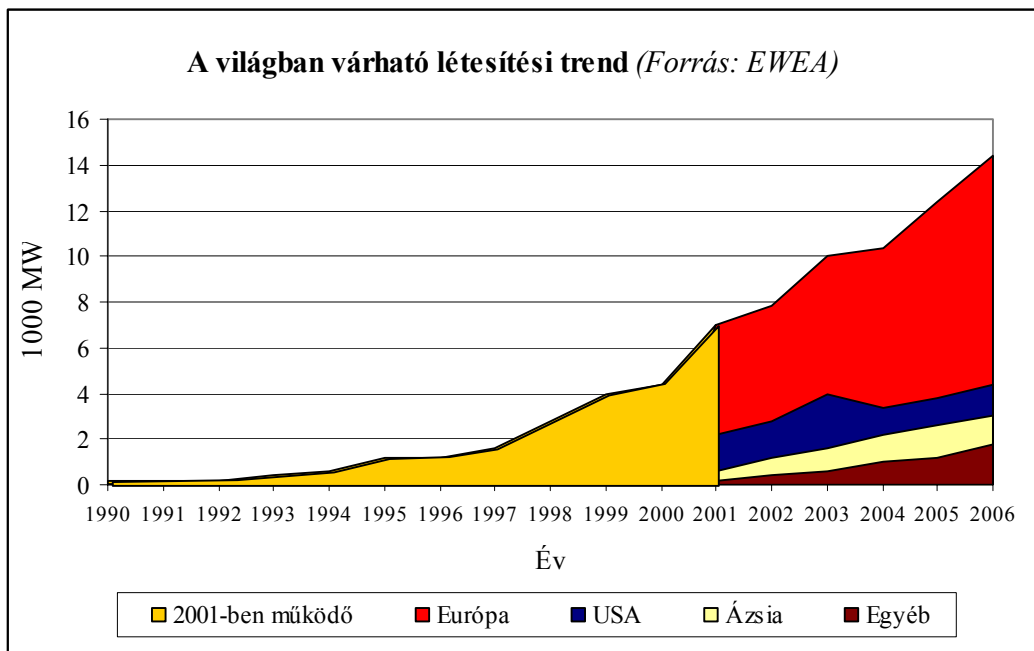
34. Sembery P., Tóth L., Horváth G., **Tóth G.**: Magyarország széltérképének elkészítéséhez megalapozó mérések és kutatások., Jelentés, Földművelési és Vidékfejlesztési Minisztérium, Országos Területfejlesztési Központ, Témaszám: OKFP/83/1999.
35. Tóth L. – Horváth G. (2003): Alternatív energia, Szélmotorok, szélgenerátorok, Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 93-124. p., 281-321. p.





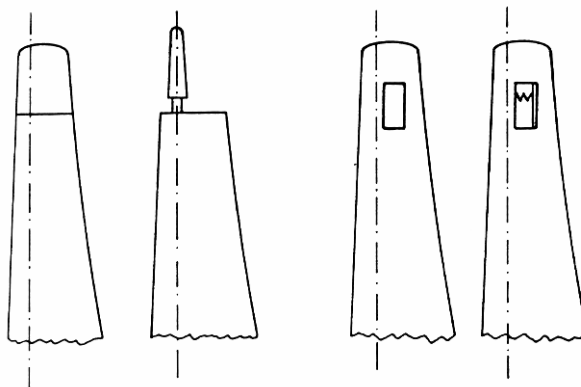
A szélgenerátorok fejlődése, méretnövekedés alakulása 1982-től 2002-ig a magasság (H), a lapátátmérő (D) és a teljesítmény (P) vonatkozásában



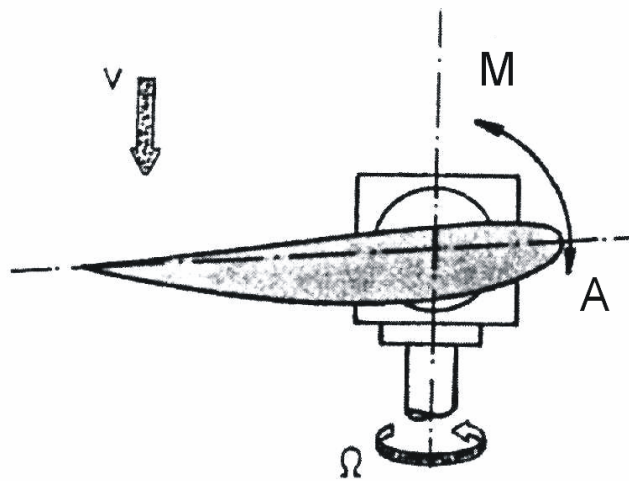




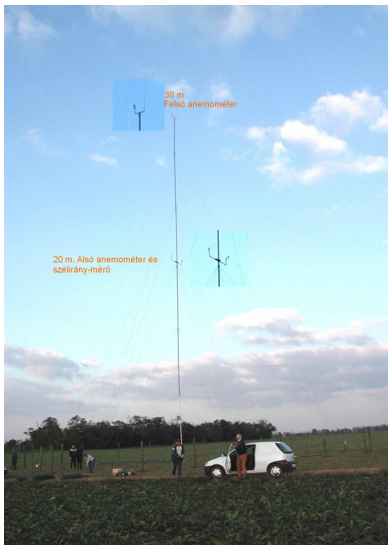
Lapátprofilok a sugár (hossz) mentén



Aerodinamikus fék a lapátvégeken és a lapátok oldalán



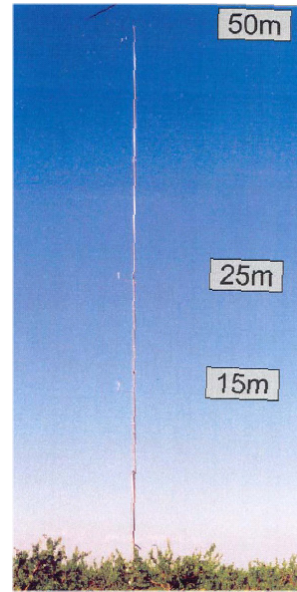
Pitch mechanizmus (elvi működés)



a) Csorna



b) Siófok



c) Ceglédbercel



d) Erk



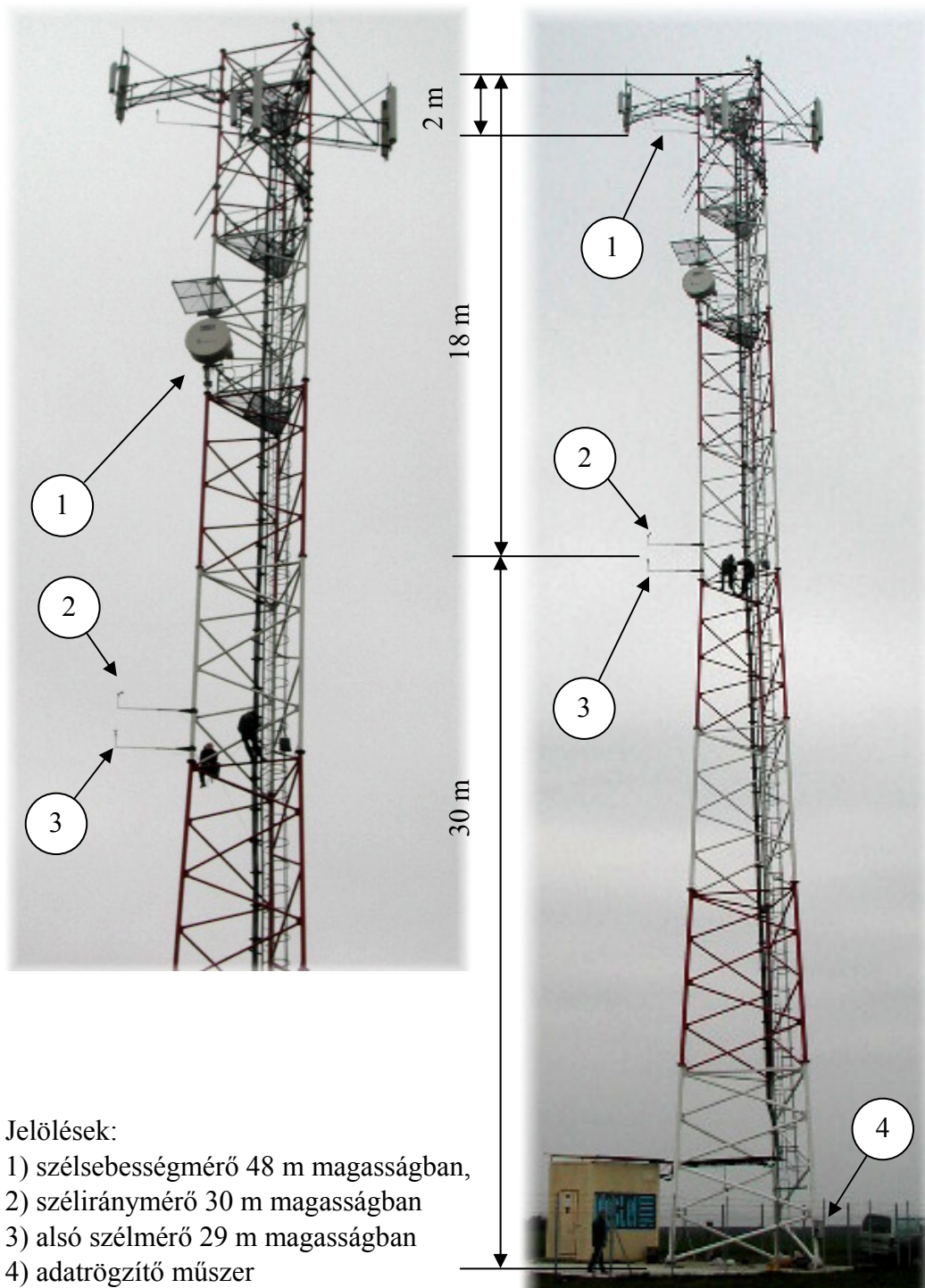
e) Ajka



f) Törökbálint

Mérőegységek elhelyezésének lehetőségei

- a) b) c) speciális mérőállványon*
- d) víztornyon e) GSM tornyon,*
- f) kéményen*



A mérés kialakítása Ostffyasszonyfán



a) Az adatrögzítő kiolvasása
(Ajka, GSM torony)



b) Az adatrögzítő feszültségellátását
biztosító napelem
(Ajka, GSM torony)



c) Az adatrögzítő kiolvasása
(Komárom, Rácsos mérőállvány)



d) Az adatrögzítő kiolvasása
(Rácsos mérőállvány)



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)



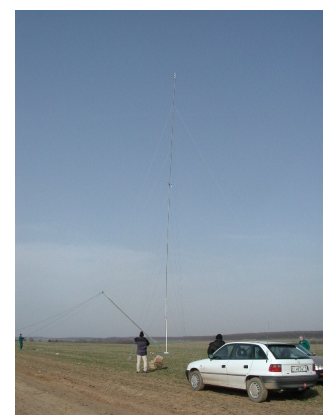
i)



j)



k)



l)

*Mérőállvány felállítása segédállvány segítségével
Zalaegerszegen*



*a) A torony több oldalról,
több ponton ki van feszítve*



*b) Feszítő sodronyok rögzítése a
talajon, erre a célra készített
beton alapzaton*



*c) A torony alján található
berendezések elhelyezése
(tápfeszültség, adattároló stb.)*



d) Torony alapzata

Teleszkópos mérőállvány rögzítése



a) Az állvány még darabokban



b) A feszítősodronyok alapzata



c) Az első elem felállítása



d) Segédállvány



e) A többi elem szerelése



f) A mérők elhelyezése

Rácsos szerkezetű mérőállvány felállítása Alsószentivánon



a) A torony felállításához használt UNIMOG és a szerelvényezés



b) A torony kifeszítésére szolgáló sodronyok rögzítése a talajon



c) A toronyon elhelyezett villamos szerelvények és a tápellátást biztosító napelem



d) A felállított mérőállvány

*Teleszkópos mérő állvány felállítása Bogyoszlón (2005 január).
Ma már a zord időjárás nem jelent gondot.*


```

Sub Mérési alapadatok()
'
' Alfa-irányonként Makró
' Rögzítette: Tóth Gábor, dátum: 2003.04.12.
'
'
    Sheets("a").Select
    Sheets("a").Copy After:=Sheets(1)
    Range("A4").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=a!RC*0.1"
    Range("A4").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("A4:A147"), Type:=xlFillDefault
    Range("A4:A147").Select
    Selection.Copy
    Range("E4").Select
    ActiveSheet.Paste
    Range("I4").Select
    ActiveSheet.Paste
    Application.CutCopyMode = False
    Columns("B:D").Select
    Selection.Delete Shift:=xlToLeft
    Columns("C:E").Select
    Selection.Delete Shift:=xlToLeft
    Columns("D:F").Select
    Selection.Delete Shift:=xlToLeft
    Columns("E:W").Select
    Selection.Delete Shift:=xlToLeft
    Range("A1").Select
    Selection.ClearContents
    Range("A3").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "vat1"
    Range("A3").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "v at1"
    Range("A3").Select
    Selection.ClearContents
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "80"
    Range("B3").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "50"
    Range("C3").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "25"
    Range("D3").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "irany"
    Range("A3:D3").Select
    Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone
    With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlMedium
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlNone
    Columns("A:A").Select
    Selection.Insert Shift:=xlToRight
    Range("A4").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "0:00"
    Range("A5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "0:10"
    Range("A4:A5").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("A4:A147"), Type:=xlFillDefault
    Range("A4:A147").Select
    Range("A3").Select
    Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone
    With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlMedium
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlNone
    Range("A3").Select

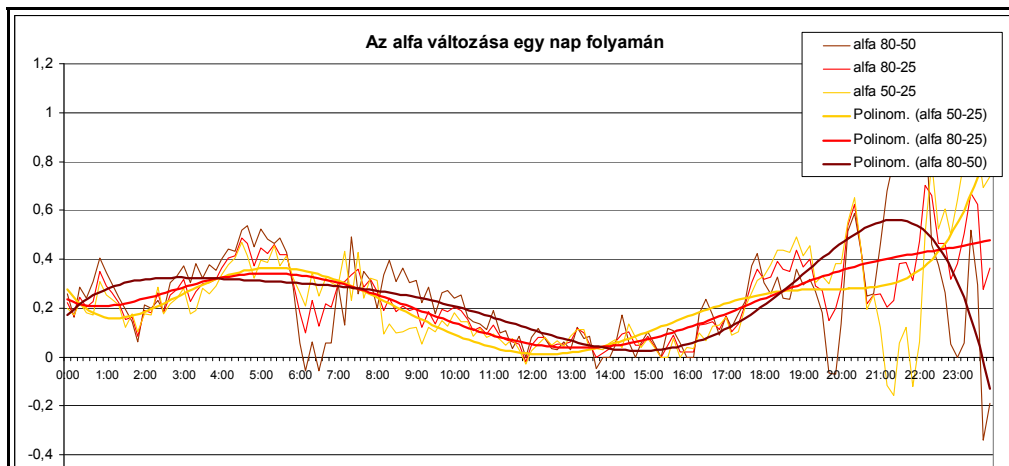
```

*A mérés adatok kiértékelése során
általam készített egyik program (makró) részlete*

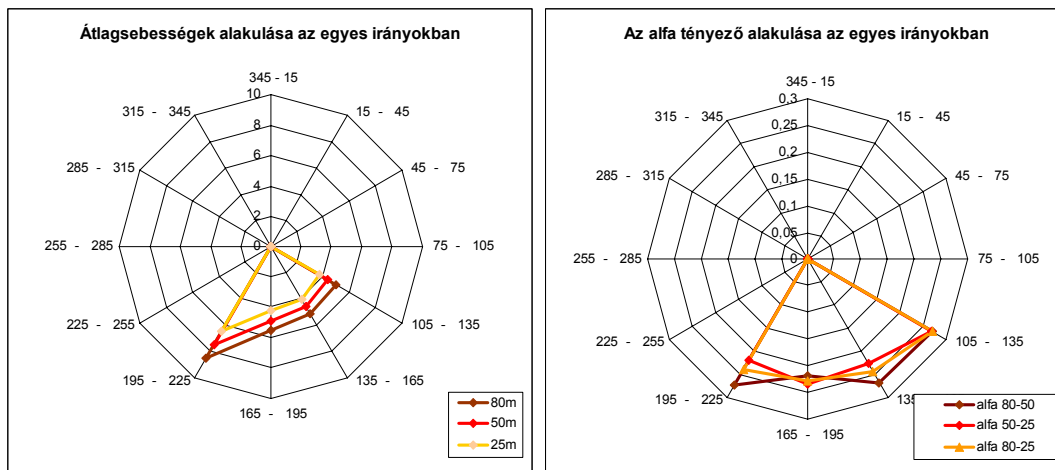
T	hónap, nap, év	óra, perc, másodperc													
v (átlag) dm/s	v (max) dm/s	v (min) dm/s	σs	v (átlag) dm/s	v (max) dm/s	v (min) dm/s	σs	v (átlag) dm/s	v (max) dm/s	v (min) dm/s	σs	szélirány %-ban		σs	
Anemométer 80 m magasságban			Anemométer 55 m magasságban				Anemométer 25 m magasságban				50 m				
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N		
36	30	34	0	26	29	24	0	24	27	20	1	257	0		
38	41	35	1	29	32	25	1	26	29	21	1	260	0		
42	43	40	1	29	32	26	1	25	28	22	1	259	5		
39	42	35	2	27	29	24	1	22	25	17	1	262	0		
39	42	36	2	27	31	25	1	23	26	20	1	265	9		
33	36	31	1	27	29	24	1	22	26	18	1	267	0		
30	34	28	1	27	30	23	1	22	26	19	1	268	6		
27	29	24	1	25	27	23	1	21	24	17	1	271	6		
25	26	24	0	24	27	21	0	19	22	17	0	277	9		

σs = az adatok szórása (standard szórás) %-ban

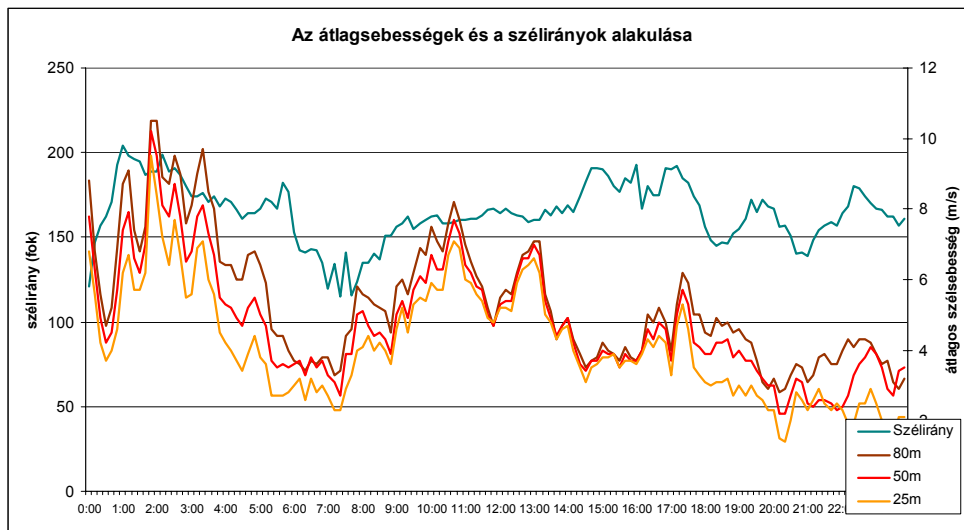
a) A mérőkből kiolvasott adatok és az utólagosan kiegészített fejléc



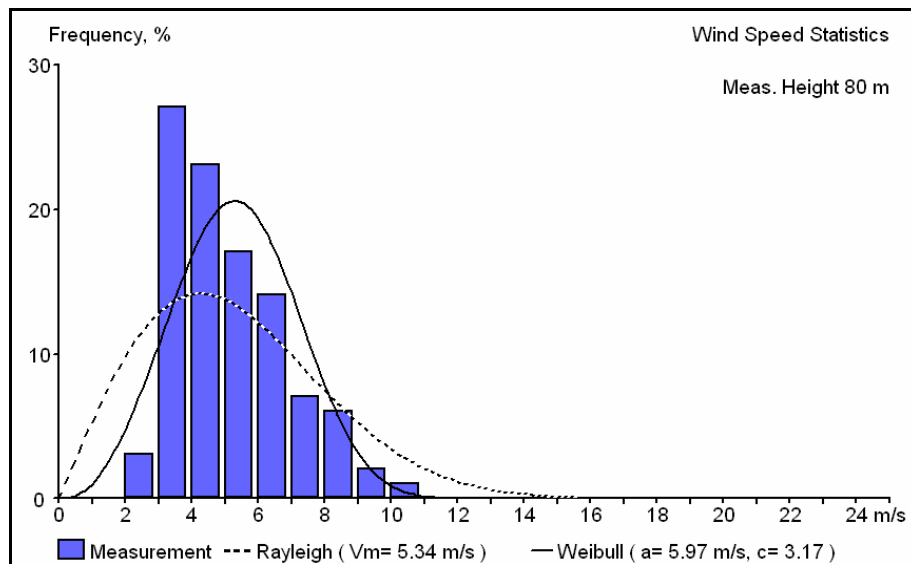
b) Az alfa tényező változása egy nap alatt



c) Az alfa tényező változása egy nap alatt

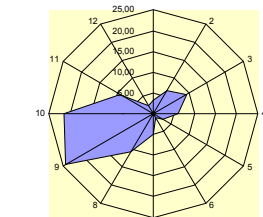


d) Átlagsebességek és a szélirányok alakulása



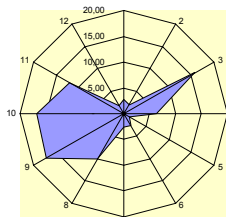
e) A 10 perces átlagsebesség értékek gyakoriságának eloszlás függvénye Rayleight és Weibull szerinti összefüggés szerint

A 7.14 és 7.15 mellékletek egy mintát mutatnak egy adott hely egy napos mérési adatainak kiértékelésére



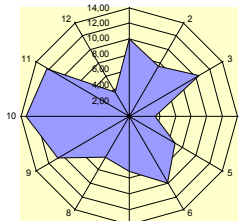
január

1.hó



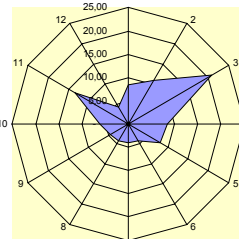
február

2.hó



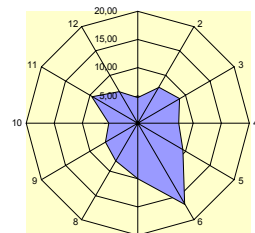
március

3.hó



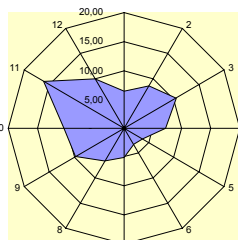
április

4.hó



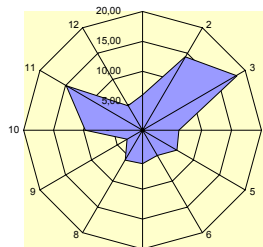
május

5.hó



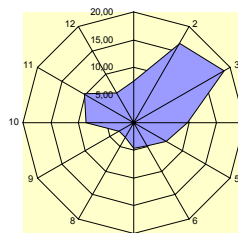
június

6.hó



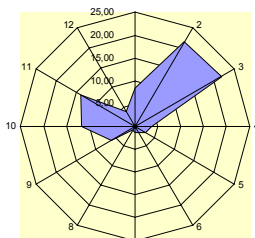
július

7.hó



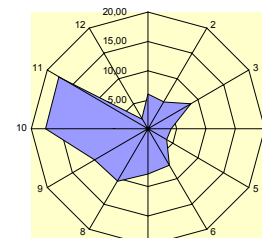
augusztus

8.hó



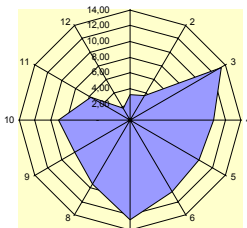
szeptember

9.hó



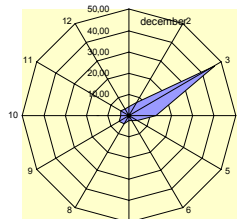
október

10.hó



november

11.hó

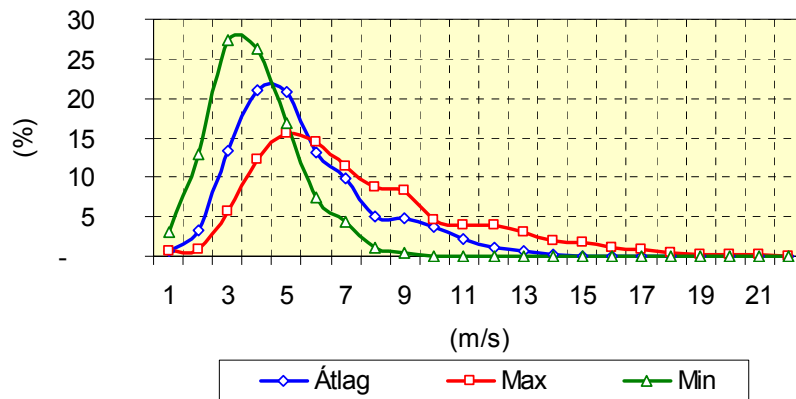


december

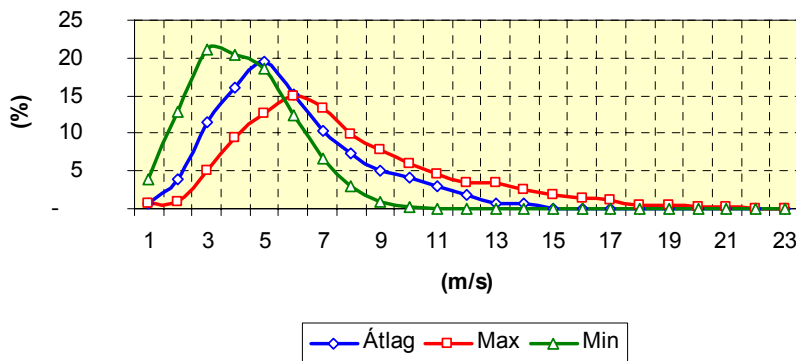
12.hó

Minta éves adatfeldolgozásra

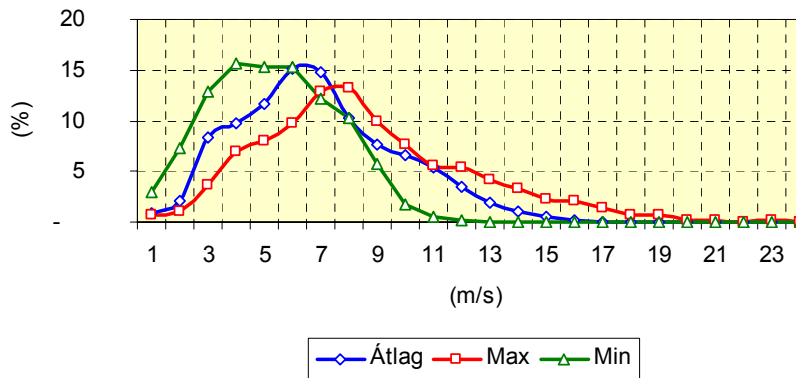
15 m, 2003.03.



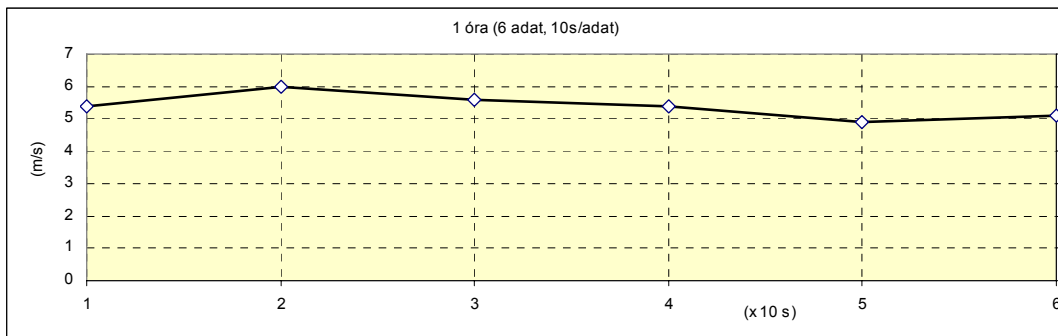
25 m, 2003.03.



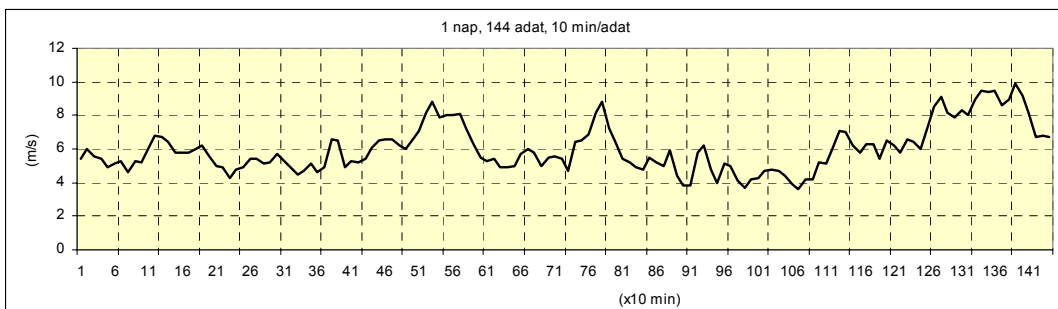
50 m, 2003.03.



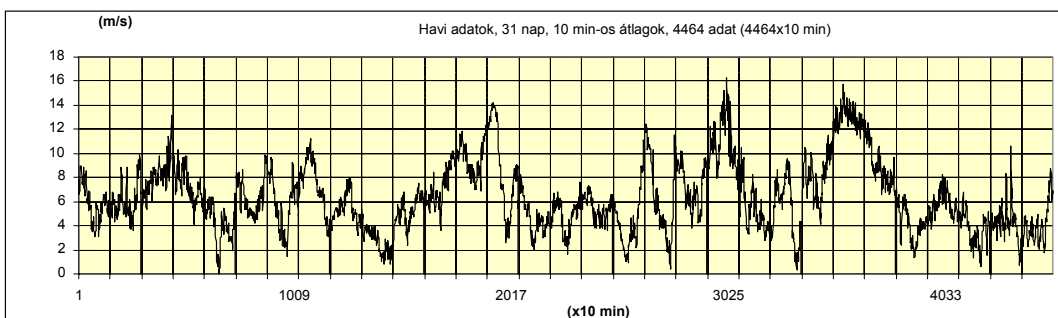
Minta szélesség eloszlás függvényeinek alakulására ugyanazon a helyen és időpontban 3 mérési magasságban
Ceglédbercel, 2003. március



a) 10 perces szélesség átlagértékek – 1 órás időtartam

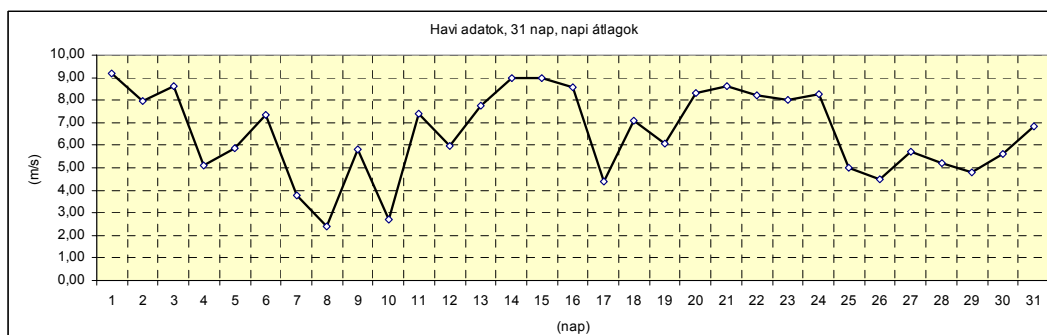


b) 10 perces szélesség átlagértékek – 1 napos időtartam

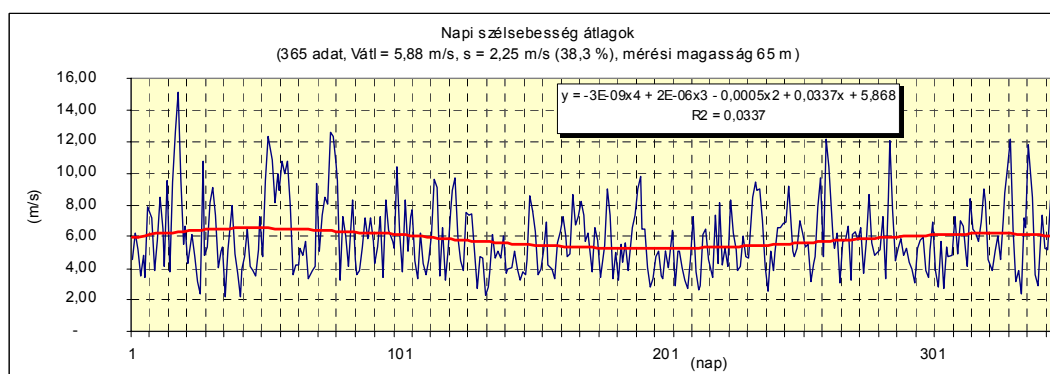


c) 10 perces szélesség átlagértékek – 1 éves időtartam

Minta 10 perces szélesség átlagérték adatok ábrázolása
1 órás, 1 napos és 1 éves időtartamra

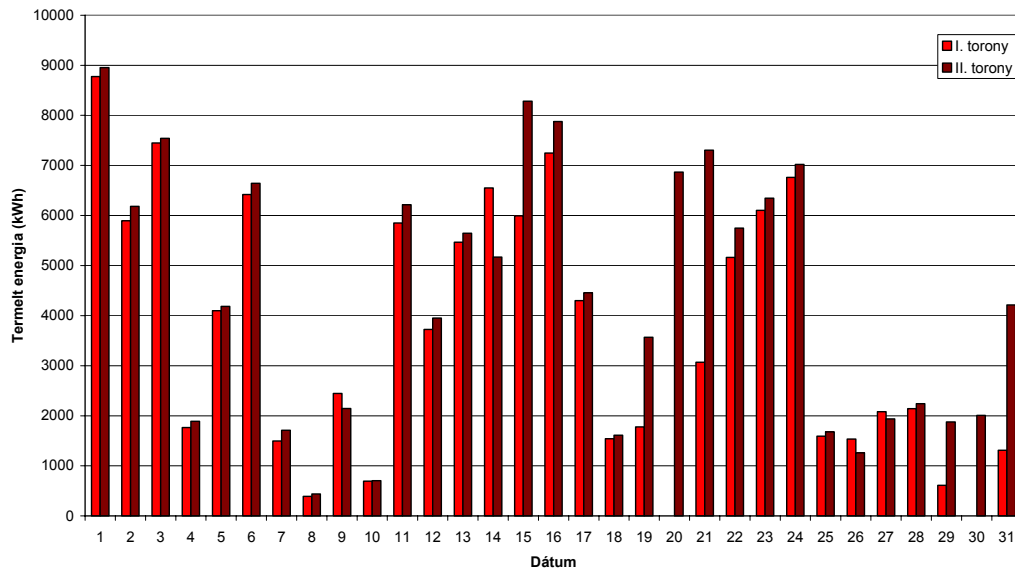


a) Napi szélesség átlagértékek - 1 hónapos időtartam

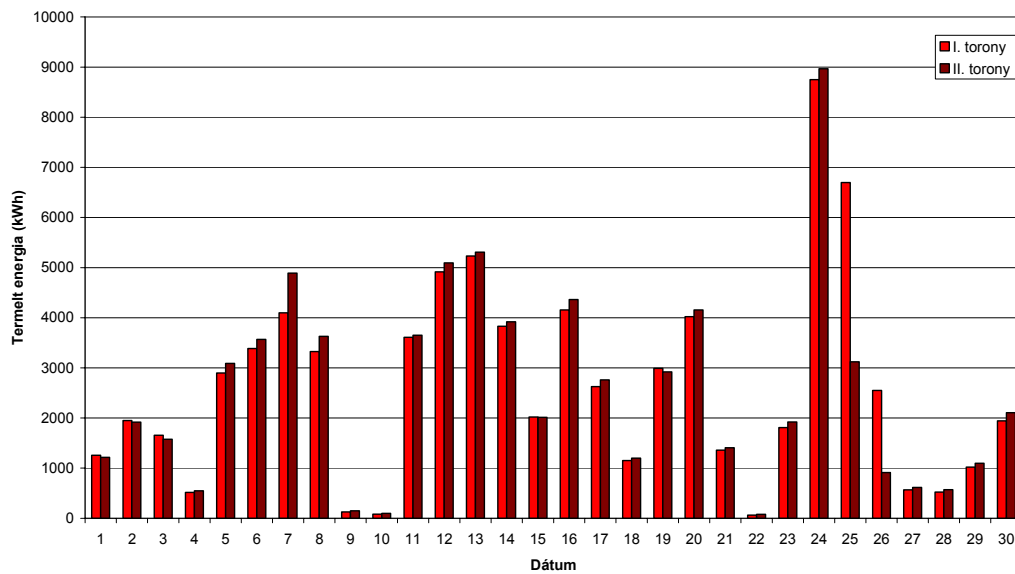


b) Napi szélesség átlagértékek - 1 éves időtartam

Minta napi szélesség átlagérték adatok ábrázolása
1 hónapos és 1 éves időtartamra



a) Minta egy adott januári hónapban



b) Minta egy adott áprilisi hónapban

Minta a mosonszolnoki szélérőmű park 2 gépének havi energiatermelésére adott 2 hónapban.

Jól megfigyelhető, hogy bár azonos típusúak és közel vannak egymáshoz a 2 gép között állandó a különbség, illetve látható a januári hónapban az 1. gép többszöri leállása. (Forrás: E.ON Hungária Rt.)