



A SZÉLENERGIA HASZNOSÍTÁS
KLIMATOLÓGIAI VONATKOZÁSAI
DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

BÍRÓNÉ KIRCSI ANDREA

Debreceni Egyetem, Meteorológiai Tanszék
Természettudományi Doktori Tanács
Földtudományi Doktori Iskola
Debrecen, 2008

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem TTK Földtudományi Doktori Iskola Tájvédelem és éghajlat programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem TTK doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.
Debrecen, 2008. február 1.

a jelölt aláírása

Tanúsítom, hogy Bíróné Kircsi Andrea doktorjelölt 1998- 2001 között a fent megnevezett Doktori Iskola Tájvédelem és éghajlat programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Az értekezés elfogadását javasolom.

Debrecen, 2008. február 1.

a témavezető aláírása

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	11
2. Szakirodalmi háttér	15
2.1. A megújuló energiaforrások és a szélenergia	15
2.1.1. Megújuló energiaforrások és sajátosságaik	15
2.1.2. Megújuló energiaforrások az energiaszerkezetben	18
2.1.3. Megújuló energiaforrások Magyarországon	29
2.2. A szél energiája és hasznosítása	33
2.2.1. A szélenergia hasznosítás helyzete	39
2.2.2. A szélenergia hasznosítás jövője	45
2.3. Szélklimatológiai vizsgálatok	49
2.3.1. Szélklimatológiai vizsgálatok világszerte	49
2.3.2. Magyarországi szélklimatológiai vizsgálatok	56
2.3.3. Magyarország szélenergia potenciálja	57
3. Anyag és módszer	65
3.1. Nagytérségű szélklimatológiai vizsgálatok	65
3.2. SODAR mérések	68
4. Eredmények	73
4.1. Makroskálájú szélklimatológiai vizsgálatok	73
4.1.1. Éves szélsősebesség átlagok	75
4.1.2. A szélsősebesség éven belüli változása	85
4.1.3. Kiválasztott területek szélklímája	87
4.2. Magyarország szélklímája	99
4.2.1. NCEP / NCAR reanalízis alapján	99
4.2.2. SODAR mérések alapján	105
5. Következtetések	121
6. Összefoglalás	125
7. Summary	129
8. Köszönetnyilvánítás	133

Ábrák jegyzéke

1.1. A szélenergia-hasznosítás összefüggés-rendszere	13
2.1. Megújuló energiaforrások természetes ciklusainak időskálája (IEA, 2005)	16
2.2. Energiaforrások társadalmi elfogadottsága az Európai Unió országaiban (Eurobarometer, 2007)	19
2.3. Energiatermelési technológiák üvegházgáz kibocsátásának összehason- lítása 1 GWh energiatermelés esetén (Sims, 2007).	21
2.4. Összes primer energiatermelés (TPES) megoszlása (%) 1973 és 2004- ben energiaforrások szerint a Földön. (IEA, 2006b)	22
2.5. A megújuló energiaforrások aránya az összes primer energiatermelésből 1971-től (IEA, 2002b)	23
2.6. Megújuló energiaforrások átlagos éves növekedési rátája 1971-2004- között (TPES - Összes primer energiatermelés; CRW - Éghető biomassza és hulladék) (IEA, 2002b)	24
2.7. Összes primer energiatermelés (TPES) megoszlása (%) 2004-ben ener- giaforrások szerint a Földön (IEA, 2007)	25
2.8. Összes primer energiatermelés megújuló energiaforrásokból 2000-ben. (Az egyéb kategóriába tartozik a geotermikus energia, a napenergia (termikus és PV), a szélenergia, a folyékony biomassza, a biogáz és a hulladék) (IEA, 2002a)	26
2.9. A villamosenergia-termelés megoszlása (%) 1973 és 2004-ben energiafor- rások szerint a Földön (IEA, 2006b)	27
2.10. A villamosenergia-termelés megoszlása 2004-ben a Földön (IEA, 2007)	27
2.11. Megújuló energiaforrásokból származó villamos energia aránya a teljes villamos energiafelhasználásban (%) Európában (EUROSTAT, 2007) . .	28
2.12. Legfontosabb megújuló energiaforrások részesedésének változása a vil- lamosenergia-termelésben EU-25 országokban (EUROSTAT, 2007) . .	28
2.13. Magyarország összes energiatermelésének alakulása kőolaj-egyenértékben (Mtoe) 1990-2004 között (EUROSTAT, 2007)	29
2.14. Primer energiaszolgáltatás Magyarországon 2004-ben (IEA, 2006a) . .	30
2.15. Villamosenergia-termelés Magyarországon 2005-ben energiaforrások sze- rint (MVM, 2006)	31

2.16. A megújuló energiaforrásból termelt villamos energia a hazai villamos energia össz fogyasztáshoz viszonyítva (Tóth and Csikós, 2007)	32
2.17. A szél fluktáló jellege horizontálisan és vertikálisan	34
2.18. A szélprofil alakja különböző érdességi magasság (z_0) esetén	36
2.19. Érdesség változás hatása a felszín közeli szél tulajdonságaira (Foken, 2001)	37
2.20. A teljesítménytényező(C_p) változása a gyorsjáratú tényező (λ) függvényében (Sembery and Tóth, 2004)	38
2.21. Telepített szélenergia kapacitások alakulása a világban és Európában 2006 végéig (EWEA, 2007)	39
2.22. Évente telepített szélenergia kapacitások alakulása Európában 2006 végéig (EWEA, 2007)	41
2.23. Évente telepített szélenergia kapacitás alakulása Magyarországon 2007 végéig	42
2.24. Szélérőművek által termelt villamos energia Magyarországon 2006 végéig	43
2.25. A szélenergiából termelt villamos energia aránya tízezrelékben Dániában, Németországban és Spanyolországban (EUROSTAT, 2007)	43
2.26. Beépített szélenergia kapacitás alakulása Magyarországon 2007 végéig	44
2.27. Szélérőművek, szélparkok elhelyezkedése Magyarországon	44
2.28. A szélérőművek méret növekedésének hatása a kinyerhető teljesítményre (TPWIND, 2006)	46
2.29. Működő és 2010-ig tervezett, MEH engedéllyel rendelkező szélprojektek földrajzi eloszlása Magyarországon	47
2.30. A szélenergia eloszlása a Földön 1980-ban (US-DOE and NREL, 1985).	50
2.31. Az USA szélenergia térképe (Elliott et al., 1986)	50
2.32. Európai szélenergia térkép (Troen and Petersen, 1989)	51
2.33. Átlagos szélesebesség 10 m magasságban NCEP / NCAR reanalízis 1976-95 közötti adatai alapján (www.windatlas.dk)	52
2.34. Szélenergiapotenciál 80 m magasságban 2000-ben mért adatok alapján (Archer and Jacobson, 2005)	53
2.35. Az európai megfigyelő állomások szélenergia osztályai 80 m magasságban 2000-ben mért adatok alapján (Archer and Jacobson, 2005)	54
2.36. A szélenergia kutatására alkalmas lehetséges helyszínek Magyarországon (Kakas and Mezősi, 1956)	58
2.37. MVM Rt megbízásából végzett energetikai szélméresek helyszínei és eredményei (Kht, 2000)	60
2.38. A domborzat áramlásmódosító hatásának figyelembevételével 80 m felszín feletti magasságra modellezett rendelkezésre álló szélenergia-mező (Radics, 2004).	61
2.39. Fajlagos szélenergia potenciál Magyarországon 75m magasságban (Wan-tuchné Dobi et al., 2005)	62
3.1. SODAR mérések helyszínei	70
4.1. A szélesebesség eloszlása 1956-2005 közötti 50 év átlagában a NCEP / NCAR reanalízis alapján 80 m magasságban	74

4.2. A szélesebesség területi eloszlása 1956-2005 között Európában	75
4.3. Szélesebesség osztályok Európában 50 év átlagában	75
4.4. Az északi negyedgömb átlagos szélesebességének alakulása 1956- 2005 között	76
4.5. A negyedgömb átlagos szélesebességénél erősebb és gyengébb szélesebességi gridek aránya évenként 1956-2005 között	77
4.6. A átlagos szélesebesség változása éghajlati övenként 1956-2005 között .	77
4.7. Relatív szélesebesség (%) változása éghajlati övenként 1956-2005 között	78
4.8. A éves átlagos szélesebesség változásának iránya 1956-2005 között . . .	79
4.9. A éves átlagos szélesebesség változásának iránya 1996-2005 között . . .	80
4.10. A éves átlagos szélesebesség változásának iránya 1986-2005 között . . .	81
4.11. A éves átlagos szélesebesség változásának iránya 1976-2005 között . . .	81
4.12. Relatív szórás (variációs tényező) területi eloszlása 1956-2005 között .	82
4.13. A 2006-os év negyedgömbi átlagos szélindexének értéke különböző időszakokhoz viszonyítva	83
4.14. Szélindex területi eloszlása 2006-ban	85
4.15. A szélesebesség átlagos évszakos változása (1956-2005)	86
4.16. A szélesebesség havi átlagos értékei éghajlati övenként	87
4.17. Kiválasztott gridek Európában	88
4.18. Havi szélesebesség maximális, minimális és 25% és 75% valószínűségi szinthez tartozó értékei Európában 1956-2005 között	89
4.19. Részletes elemzéshez kiválasztott gridek elhelyezkedése a Földön . . .	90
4.20. Az NCEP / NCAR reanalízisból származó szélindex és a dán széleenergia index összehasonlítása	91
4.21. Átlagos havi szélesebesség köbök Portugáliában és Spanyolországban . .	92
4.22. Átlagos havi szélesebesség köbök menete Brazíliában (1956-2005) . . .	94
4.23. 1986-2005 közötti havi szélesebességből számolt variációs tényező földrajzi eloszlása	98
4.24. A szélesebesség éves átlagos értékei Magyarországon 1956-2005 között .	99
4.25. A havi szélindex 50 éves átlagos értékei Magyarországon (1956-2005).	100
4.26. A szélesebesség köbeinek relatív havi eloszlása 1956-2005 között Magyarországon (12 hónap = 100%)	101
4.27. A magyar villamosenergia-rendszer (VER) havi terhelési görbéje 2005-ben (MVM, 2006)	
1. Beépített teljesítőképesség, 2. Rendelkezésre álló teljesítőképesség, 3. Változó rendelkezésre álló teljesítmény, 4. Igénybe vehető teljesítmény, 5. Ténylegesen igénybe vehető teljesítmény, 6. Fogyasztói csúcsterhelések átlaga, 7. Próbaüzem nélküli átlagterhelés, 8. Csúcsterhelések napi maximuma, 9. Csúcsterhelés átlaga hazai erőművekből .	102
4.28. Napi földgáz fogyasztás, felhasználás 2005-ben	102
4.29. A szélesebesség napi átlagtól való átlagos eltérése %-ban kifejezve 1956-2005 időszakot alapul véve	104
4.30. Összefüggés a magyarországi területek napi szélesebessége között 1956-2005 között havonta	104
4.31. A szélirány és -sebesség eloszlás Budapesten 30-120 m között SODAR mérések alapján	106

4.32. A szélirány és -sebesség eloszlás Pakson 30-120 m között SODAR mérések alapján	108
4.33. A szélirány és -sebesség eloszlás Szegeden 30-120 m között SODAR mérések alapján	110
4.34. Weibull k paraméter értéke a magasság függvényében	112
4.35. Átlagos szélprofil és közelítés függvényekkel Budapesten, Pakson és Szegeden	112
4.36. Normalizált átlagos szélprofil a leggyakoribb szélirány szektorban ($275-315^\circ$) Budapesten, Pakson és Szegeden > 4 m/s szélsébség esetén	113
4.37. Átlagos fajlagos szélteljesítmény SODAR mérések alapján	114
4.38. A z_0 érdességi magasság szélirányonként Budapesten, Pakson és Szegeden	115
4.39. Az α hatványkitevő értéke szélirányonként Budapesten, Pakson és Szegeden	116
4.40. A Magyar VER terhelésének napi menete (MVM, 2006)	117
4.41. A szélsébség napi menete különböző magasságban Budapesten, Pakson és Szegeden	118
4.42. A különböző magasságban uralkodó szélsébség napi menete és a VER terhelésének kapcsolata	119

Táblázatok jegyzéke

2.1. A megújuló energiaforrásokból származó légköri emissziók teljes életciklusuk folyamán (g/kWh) (IEA, 2002a)	19
2.2. Hagyományos energiatermelés légköri kibocsátásai teljes életciklusuk folyamán az Egyesült Királyságban (g/kWh) (IEA, 2002a)	20
2.3. A megújuló energiaforrások költségei (IEA, 2002a)	25
2.4. Összes telepített szélenergia-kapacitás országonként 2006 végén (GWEC, 2007)	40
2.5. Installált szélerőmű kapacitás várható alakulása 2030-ig Magyarországon	48
2.6. Az USA-ban alkalmazott szélenergia osztályok (Elliott et al., 1986) . . .	50
3.1. A SODAR mérések helyszínei és időpontjai	69
4.1. A 10 legszelesebb, tipikus és gyengén szeles év 1956-2005 között	76
4.2. Magyarországi gridek ($Ny \Rightarrow K$ irányba) 2006-os szélindexének szélsőértékei különböző időszakból számolva	84
4.3. Kiválasztott területek éves szélindexének szórása és az idősorra illesztett trendegyenes meredeksége 1986-2005 között	96
4.4. Havi szélindexek jellemző értékei a kiválasztott területeken	97
4.5. A hatványkitevő értéke szélirány szektoronként SODAR mérések alapján Budapest, Pakson és Szegeden	116

1. fejezet

Bevezetés

A levegő mozgásában rejlő energiának az emberiség által történő kihasználása nem újkeletű jelenség. A vitorlás hajózás, vagy a vízhúzó, terményt őrölő szélmalmok építése már az időszámításunk előtti évszázadokban ismert és elterjedt volt. A Földön gyakorlatilag mindenhol, bárki számára elérhető, összességében hatalmas potenciállal rendelkező energiaforrás kihasználásának igénye kézenfekvő, így az emberiséget mindig is foglalkoztatta és tegyük hozzá most is foglalkoztatja, hogy hogyan lehet a szél energiáját minél jobban, hatékonyabban kihasználni. Az ingyen rendelkezésre álló szél hasznosításához szükséges berendezések, illetve azok telepítése, felállítása azonban mindenképpen tőkét igényel. A beruházók az érdeklődésen túl természetesen akkor fognak befektetni szélenergiába, ha a befektetés belátható időn belül megtérül, azaz előbb-utóbb hasznot fog hozni. A beruházás, a hasznosítás nagyságrendjétől függően számos szerteágazó probléma megoldását követeli, de abban mindenki biztos, hogy minden, ami a széllel kapcsolatos, kulcsfontosságú.

A szél tulajdonságainak hosszú távú vizsgálatával foglalkozó szélklimatológia és az optimális telephely kiválasztásra specializálódott szélenergia meteorológia (Wind Power Meteorology) arra az igen fontos kérdésre keresi a választ, hogy térben és időben milyen szélklimatológiai keretfeltételekkel kell számolnia a szélenergia hasznosításban érintetteknek. A tudományterület jelentősége az utóbbi időben felértékelődött, hiszen mára az érintettek köre a szélenergia és a megújuló energiaforrások előtérbe kerülésével párhuzamosan igen szélessé vált.

Manapság a hálózatra csatlakozó ipari méretű szélerőművek által termelt villamos energia profitot hozó piaci termék, amely a liberalizált villamosenergia-piacon szabadon eladható. Ugyanakkor egy energiátárolást nélkülöző villamosenergia-rendszerben szabályozási kérdéseket felvető műszaki probléma. Tekinthetünk rá, mint a széndioxid kibocsátás csökkentésének legolcsóbb eszközére, az így megtakarított széndioxid kvóta a befektetőkön túl egy ország számára hozhat költségvetési bevételeket, illetve biztosíthatja a hazai és nemzetközi környezetvédelmi célok elérését. Lehet tájképi értékeket érintő, érzékeny fajokat potenciálisan veszélyeztető zajkibocsátó forrás, ugyanakkor villamos hálózattól távol fekvő, elmaradott területeken olyan könnyen elérhető energiaforrás, amely alapvető komfortot, éltető vizet biztosíthat az ottlakóknak. Nem feledhetjük, hogy napjainkban a Föld népességének még mindig 1/5-e él

ilyen alapvető komfort nélkül (WorldBank, 2007).

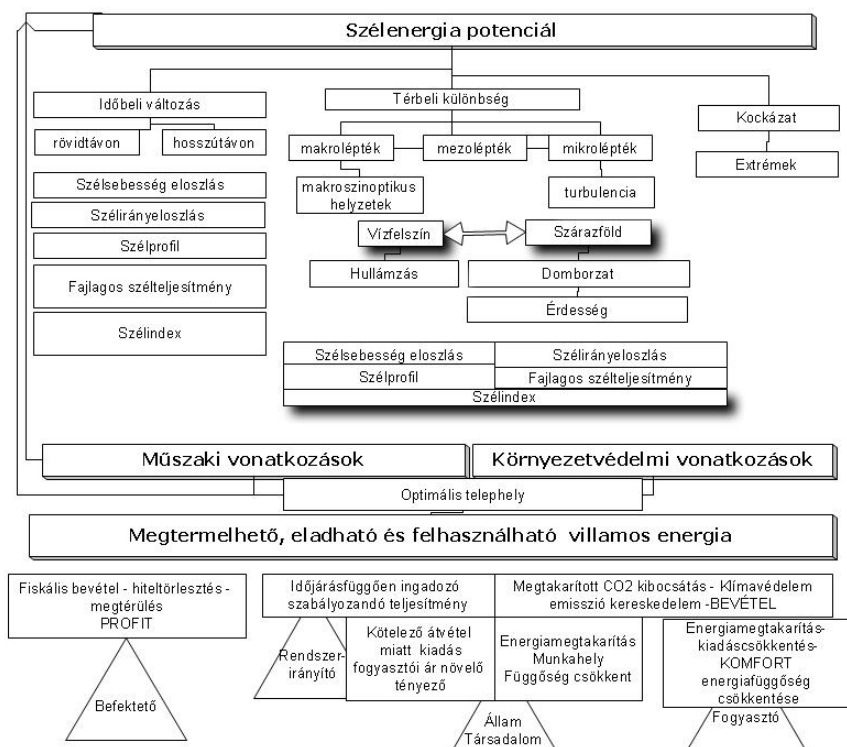
A szél energiájának hasznosítása során minden érintett elvárását, szempontjait figyelembe kell venni. Az vitathatatlan, hogy a szél tulajdonságainak ismerete alapvető számos kérdés megoldásában, a potenciális konfliktusok elkerülésében, a lehetséges hatások feltárásában. A szélerőművek műszaki paramétereit, elhelyezését szintén a helyi szélviszonyokhoz kell optimalizálni. A szélklimatológia alap kutatás jellege mellett hasznosítható információkat tud szolgáltatni a gyakorlati élet számára is, és így fontos döntéseket tehet megalapozottá az összes érdekelt fél esetében.

A Nap közvetett energiájának kihasználására a Földön bárhol van lehetőség, hiszen a légkör állandó mozgásban lévő dinamikus rendszer, noha a légköri mozgások különböző tér-, és időbeli skálán belül zajlanak. Az igazi kérdés az, hogy a szél energiáját milyen célra szeretnénk használni. Vízmozgatásra, a háztartás áramköltségének csökkentésére, esetleg egyedi villamos energia igényt szeretnénk kielégíteni, vagy hálózatra csatlakozó szélerőmű fogja biztosítani a megélhetést? Igényeinknek megfelelően kell választanunk olyan lehetséges helyszínt, olyan magasságot, ahol a szélviszonyok céljainknak megfelelően alakulnak. Ezt a döntést alapozzák meg a kisebb-nagyobb térségre és különböző magasságra vonatkozó széltérképek, illetve a konkrét helyszínen végzett szélmérések. A telephelynek ugyanakkor eleget kell tenni a környezetvédelem, a műszaki és jogszabályi követelmények szempontjainak is. A saját céljaink és a helyszín ismeretében dönthetünk a helyi viszonyokhoz leginkább illeszkedő berendezésről, amelynek beszerzése, felállítása, üzemeltetése belátható időn, legalább élettartamán belül meg térül (1.1 ábra).

Ezért gazdasági döntések meghozatalához a légköri határréteg különböző régióiról mind rövid, mind hosszú távon ismernünk kell a szél tulajdonságait és az azokat befolyásoló tényezők lehetséges változásának irányait. Ismernünk kell mennyi villamos energiát fog tudni termelni a berendezés hónapról hónapra, évről évre, esetleg napszaktól függően. Milyen gyakorisággal fordulnak elő olyan extrém események, amelyek miatt berendezésünk nem fog termelni, esetleg károsodhat. Szélelőrejelzést igényelhet a rendszerirányító 15 perces időközönként 1 napra előre, hetekre, hónapokra, de a befektető és hitelfolyósító számára érdekes 25 éves időtávlatban is, a berendezés teljes élettartama folyamán.

A megújuló energiaforrások és ezen belül a szélerőenergia által hálózatra termelt energia fajlagos költségei ma még köztudottan magasabbak, mintha fosszilis energiaforrásokkal, vagy atomenergia segítségével termelnénk. A szélerőművek rendkívül gyors innovációja és széleskörű elterjedése miatt azonban törvényszerű a költségek csökkenése. A kisebb energiasűrűség, az időjárástól függő rendelkezésre állás miatt a szélerőenergia hasznosítása nem a legkényelmesebb megoldást jelenti a villamosenergia-termelésre, mégis feltétlenül érdemes foglalkoznunk vele.

Politikai döntéshozók hosszú távú energiapolitikai stratégiai célként fogalmazhatják meg a megújuló energiaforrások arányának növelését a klíma védelme érdekében, hogy az energiatermelésből származó légszennyező anyagok kibocsátásának csökkentését elérjék. Már napjaink kihívása az egyre növekvő energiaigény kielégítése, egy-egy ország egyoldalú energiafüggésének mérséklése. Az energiatermelés diverzifikálása az energetikai monopóliumok lebontásával párhuzamosan zajló folyamat, amely egyben a társadalom elvárását is tükrözi, épp ezért a politikai döntéshozóknak segíteniük és támogatniuk kell versenyhátrányban lévő, ugyanakkor környezetkímélő energiater-



1.1. ábra. A szélenergia-hasznosítás összefüggés-rendszere

melési módokat. Ebben a támogatandó körben a légköri erőforrások - így a szélenergia - kulcsszerepet kaphatnak mind az energiaigények kielégítése, mind a klímavédelmet szolgáló tulajdonságai révén.

Az értekezés célja az, hogy bemutassa a klimatológia azon területét, amely a légmozgások tulajdonságait vizsgálja kifejezetten a szél energetikai hasznosítása szempontjából. A témaválasztásunk lehetőséget ad egyrészt az elméleti háttér bemutatására, másrészt gyakorlati ismeretekkel, tapasztalatokkal segíthetjük a szélenergia hasznosítás jövőbeli szerepének növelését, a szélenergiával kapcsolatos döntések megalapozását.

A vizsgálataink a következő főbb területekre irányulnak:

- A XXI. század első évtizedére Európában, és általában a világon rendkívül gyorsan és ígéretesen fejlődő terület a megújuló energiaforrások, ezen belül a szélenergia hasznosítása. Bemutatjuk, hogy hol tart ma a fejlődés és milyen tervek készülnek a jövőre vonatkozóan. Rögzítjük a szél hasznosításának elméleti alapjait: a szél keletkezésének feltételeit, az áramlási mező karakterisztikáit, a befolyásoló tényezőket, a szél energiájának leírásának módozatait, a hasznosíthatóság törvényszerűségeit. Röviden bemutatjuk milyen kutatási eredmények ismertek a szélklimatológia terén a Földön, az EU-ban, különös

tekintettel hazánkra.

- Nagy területi felbontással, 50 éves időtávra vonatkoztatva vizsgáljuk a légmozgás tulajdonságainak alakulását az északi negyedgömbön az NCEP / NCAR reanalízis modell 1956-2005 közötti homogén napi, havi és éves adatsorai alapján.
- Magyarországi SODAR mérések adatait felhasználva arra a kérdésre kerestük választ, hogy hogyan változnak a magassággal a szél tulajdonságai, milyen tényezők befolyásolják a szélprofilok irányfüggését az adott megfigyelőhelyeken, illetve hogyan változik a szélesebesség napi menete különböző magasságban összefüggésben a magyar villamosenergia-rendszer átlagos terhelésével.

Végeredményben munkánk legfontosabb célja, hogy szélklimatológiai információkkal elősegítsük a szél energiájának hasznosítását rövid-, közép-, és hosszú távon.

2. fejezet

Szakirodalmi háttér

2.1. A megújuló energiaforrások és a szélenergia

2.1.1. Megújuló energiaforrások és sajátosságaik

A megújuló energiaforrás megnevezés olyan elsődleges energiahordozókat takar, amelyek hasznosítása közben a forrás nem csökken, hanem újratermelődik, megújul, vagy hosszú távon lehetőség van egy adott területről ugyanolyan jellegű energiát ugyanolyan mennyiségben kinyerni (Bohoczky, 2004). Legfontosabb sajátossága az elsődleges energiaforrásként ismert természeti erőforrásoknak, hogy hosszabb-rövidebb ciklus alatt képesek újratermelődni. A fosszilis energiaforrásokat létrehozó természetes folyamatok hossza évmilliókban mérhető. Emberi léptékben mérve nem tekinthetjük megújulni képes energiaforrásoknak, sőt felhasználásuk ütemének gyorsulása miatt, az ismert készletek kimerülésével kell számolnunk. A megújuló energiaforrások ugyan gyorsan, belátható időn belül képesek megújulni, azonban természetes okokból térben és időben rendkívül változékony a rendelkezésre állásuk. Változékonyságuk az őket létrehozó természeti folyamatok ritmusának függvénye (2.1 ábra).

Hosszú időskálán képes változni a Föld belső hőjéből származó hasznosító geotermikus energia mégis, ha felszín közeli közegeket hasznosítunk, akkor évszaktól függő ciklussal lehet számolni. A vízenergia felhasználhatósága a természetes vízciklus sebességétől, a csapadék és lefolyásviszonyok évszakos változásától függ egy területen. Változékonyságát hatalmas víztározók építésével hatásosan és eredményesen lehet mérsékelni. Ennek köszönhető, hogy a vízenergia hasznosítása egyben a mai napig a leghatékonyabb energiátárolás lehetőségét is jelenti. A biomassza rendelkezésre állása közvetve és közvetlenül összefüggésben van a felhasznált növények vegetációs periódusával. Felhasználható nyennyisége pedig évről évre közvetve mindenképpen az időjárás nyújtotta feltételektől függ. A folyamatos rendelkezésre állást tárolással, míg magát a megújítást, hogy a felhasználható biomassza mennyisége időben ne csökkenjen folyamatos munkával lehet elérni. Ennek révén a biomasszát inkább "megújítható" megnevezéssel illethetnénk. Feltétlenül megújuló a Nap energiája, és a Hold árapály-keltő hatása. Rendelkezésre állásuk csillagászati okokból szabályos ciklust követ. A Nap energiájának közvetlen hasznosítása során azonban kevésbé

Az Európai Unión belül a megújuló energiaforrások kiemelt prioritást élveznek (Commission, 2001) 2001-ben elfogadott 77 / 2001 EU direktíva rendelkezései alapján. A tagországokban azonban nem egységes, hogy egy adott országban mely energiaforrást és milyen nagyságrendű beépített teljesítményű erőművet tekintenek megújuló energiaforrást hasznosítónak és ezzel egyértelműen támogatásra érdemesnek. Tehát a megújuló energiaforrások tagországonkénti megítélése és támogatási politikája nem egységes, melynek háttérében természetesen az egyes országok természeti adottságaiban lévő alapvető különbségek kereshetők.

Hagyományosan Európában a szárazföldön is hasznosítható napenergia (fotovoltaikus, termikus), szélenergia (onshore), a biomassza különböző formáiból nyert villamos- és hőenergia tekinthető mindenhol megújuló eredetűnek. Az ország adottságától függ, hogy számolnak-e a geotermikus energiával, a tengerparthoz kötődő hullám- és árapály energiával, illetve a manapság széles körben terjedő tengeri (offshore) szélenergia hasznosítással. Érdekes módon országonként változik a vízenergia megítélése, amely bár egyértelműen megújuló energiaforrás, mégis néhány európai ország a meghatározott beépített kapacitás feletti vízerőműveit kizárja a megújuló energiákat pénzügyileg támogató programjából. Az Egyesült Királyságban 10 MW-ot, míg Németországban 5 MW-ot meghaladó kapacitású vízerőművek kapnak ilyen kedvezőtlen megítélést (Imre, 2003). Egyes országokban, például Belgiumban és Hollandiában a megújuló energiák körébe sorolták a hulladékból égetéssel előállított villamos energiát is. A fent említett EU irányelv szerint az ipari és kommunális hulladék szerves részéből előállított villamos energia csupán fele tekinthető megújuló jellegűnek (Imre, 2003). Az utóbbi években vált követelménnyé, hogy az ilyen hasznosításra szánt hulladékot szelektíven kell gyűjteni, azaz teljesíteni kell ezen hulladékokra vonatkozó környezetvédelmi és hulladékgazdálkodási előírásokat.

Magyarországon 2007. október 15.-ig a 2001. évi CX. törvény (VET), ezt követően a 2007. évi LXXXVI. törvény rendelkezik a megújuló energiaforrásokból termelt villamos energiáról. A 2001. évi VET értelmében megújuló energiaforrás az időjárás körülményektől függő nem fosszilis energiahordozó (nap, szél), az időjárás körülményektől nem függő nem fosszilis energiahordozó (geotermikus energia, vízenergia, biomassza, valamint biomasszából közvetve vagy közvetlenül előállított energiaforrás), továbbá hulladéklerakóból, illetve szennyvízkezelő létesítményből származó gáz, valamint a biogáz. Az új törvény fogalom-meghatározása (LXXXVI. tv, 2007) nem tesz különbséget az erőforrás időjárás függő volta alapján, illetve a vízenergia értelmezési körét meglepő módon kibővítette a hullám-, és árapály-energiával. Magyarországon a hulladék égetéséből nyert villamos energia nem megújuló, de megújuló energiaforrásokhoz és a kapcsoltn termelt villamos energiához hasonlóan támogatott.

A támogatás lényege a kötelező átvétel biztosítása államilag normatívan támogatott áron (feed-in tarif). A megújuló energiaforrásokból származó villamos energiát korábban a közüzemi nagykereskedő (MVM) vette át. Az ártámogatás mértéke és módja energiaforrásonként eltérő, időtartama a beruházás megtérülésének időtartamával van összefüggésben (GKM, 2002). Az átvételi ár az előző év inflációjával korrigált, így 2007-ben a legmagasabb ár 24,71 Ft/kWh, 2008 január 1-től 26,46 Ft/kWh, amely a szélenergiára vonatkozik. Más megújuló energiaforrás, kapcsolt és hulladékból nyert villamosenergia esetén fogyasztástól függő napszakonként változó az átvételi ár. A 2001. évi VET napenergia (PV) esetén 1 MW-ig, vízenergia esetén 5

MW-ig, míg a többi megújuló elsődleges energiaforrást hasznosító erőmű maximálisan 50 MW beépített kapacitásig biztosította a kötelező átvétel lehetőségét.

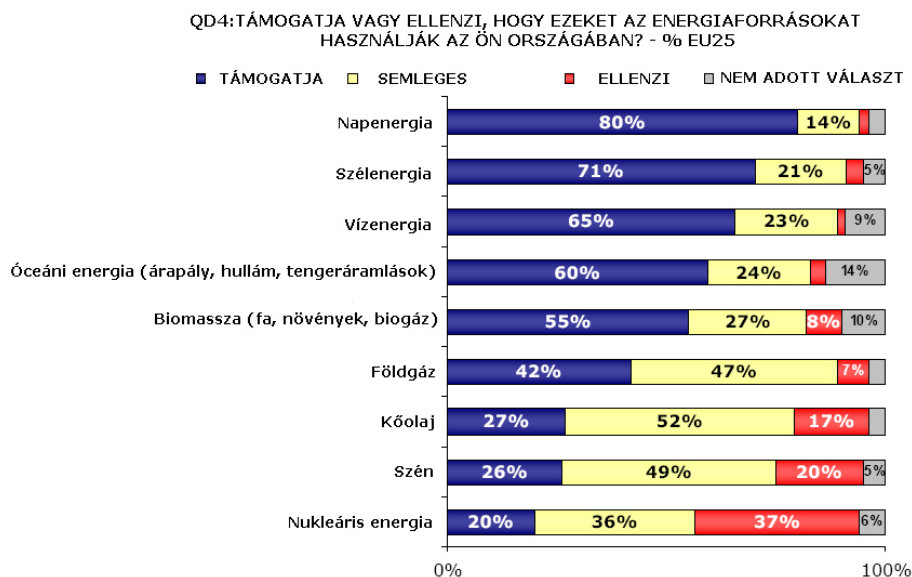
Az új jogszabály (LXXXVI. tv, 2007) a liberalizát villamosenergia-piac keretei között biztosítja a megújuló energiaforrásokból hálózatra termelt villamos energia kötelező átvételét. A kötelező átvételi rendszer alapelvei a törvényben már le vannak fektetve, részleteit kormány-, és miniszteri rendeletek pontosítják (389, 2007; GKM, 2007a,b). Lényeges változás, hogy a kötelező átvétel elméletileg piaci áron is történhet, nem csak rendeletben meghatározott támogatott áron, ugyanakkor differenciálhatnak energiaforrás, termelési eljárás, erőművi névleges teljesítmény, az energiaátalakítás határfoka és az erőmű létesítési időpontja alapján. Az átvételi kötelezettség alá eső villamos energia mennyiségét és időtartamát a Magyar Energia Hivatal határozza meg figyelembe véve a beruházás megtérülését, az igénybe vett beruházási támogatások nagyságrendjét. A kötelező átvétel által érintett megújuló, hulladékból származó és kapcsoltan termelt villamosenergia-termelők az átvételi rendszerirányító által vezetett ún. zöld mérlegkörhöz csatlakoznak, az általuk termelt energiát a rendszerirányítóval kötött szerződés alapján mindegyik villamosenergia-kereskedő köteles az általa értékesített villamos energia arányában átvenni. Így hazánkban minden fogyasztó használ nagyon kis arányban zöld energiát és természetesen elosztva mindenki viseli ennek többletterheit. Összességében 2008. januárjában az összes megújuló energiaforrásból származó villamos energia kötelező átvétele az egyetemes villamosenergia-szolgáltatás lakossági fogyasztói árának kb. 5%-át teszi ki, ami 2 Ft/kWh. Ez nagyságrendileg annyi, mint az egyetemes szolgáltató árreése (MEH, 2008). Más villamos energiakereskedők beépíthetik árképzésükbe ezt a többletterhet, de nem kötelező érvénnyel.

A kötelező átvételi rendszerben a Magyar Energia Hivatal által kiállított eredetigazolás biztosítja, hogy megújuló energiaforrásból, hulladékból nyert, vagy megfelelő határfokú kapcsolt termelésből származó villamos energiát értékesítenek. Önmagában az igazolás pedig nem jogosít a támogatott árú átvételre.

2.1.2. Megújuló energiaforrások az energiaszerkezetben

Egy adott területen a megújuló energiaforrások hasznosíthatóságát alapvetően a földrajzi helyzethez kapcsolható potenciálok (különböző energiaforrások készleteinek) megléte befolyásolja (Imre, 2003). Végeredményben azonban főként a makro-, és mikro-gazdasági környezet, a politikai stratégia viszonyulása az energiapolitikához, a környezetüghöz, a nemzetközi elvárásokhoz a legfontosabb, hogy milyen arányban képviselik energiaszerkezetükben a megújulókat. Ehhez hozzájárul a műszaki - technológiai adottságok megléte, továbbá a társadalom hozzáállása a lehetséges energiaforrásokhoz, hogy mennyire elfogadóak, avagy elutasítóak velük szemben. Az Eurobarometer 2006 évi felmérése szerint (2.2 ábra) Európában a megújulók társadalmi elfogadottsága igen magas, ezen belül a szélenergiáé különösen (Eurobarometer, 2007).

A legtöbb országban az energiapolitika irányelvei alapvetően az ellátás biztonságára, az import függőség mérséklésére, az energiatakarékosságra (energiaforrásokkal való takarékság), és környezetpolitikai követelmények teljesítésére koncentrálnak fogalmazzák meg a különböző megújuló energiaforrások használatának, arányának növelését az energiaszerkezetben belül (Szerdahelyi, 2004). Az Európai Unió szerepe a



2.2. ábra. Energiaforrások társadalmi elfogadottsága az Európai Unió országaiban (Eurobarometer, 2007)

megújulók alkalmazásában egyedülálló és példaértékű. Ezen túl 2007. márciusában a tagországok miniszterelnökei döntöttek arról, hogy kötelező 2020-ra 20%-os részarányt képviseltetni az energiaszerkezetben, ami hosszú távon elkötelezettséget jelent a megújuló energiaforrások felé. Kulcsfontosságú környezetvédelmi előny, hogy ezen erőforrások mindegyike teljes életciklusukat tekintve is nagyságrendekkel alacsonyabb káros anyag kibocsátással jellemezhető (2.1 táblázat), mint akár a legjobb technológiával égetett hagyományos fosszilis tüzelőanyagok (2.2 táblázat) (IEA, 2002a).

2.1. táblázat. A megújuló energiaforrásokból származó légköri emissziók teljes életciklusuk folyamán (g/kWh) (IEA, 2002a)

		CO ₂	SO ₂	NO _x
Energiaültetvények	Jelenlegi gyakorlat	17 - 27	0.07 - 0.16	1.1 - 2.5
	Jövőbeli gyakorlat	15 - 18	0.06 - 0.08	0.35 - 0.51
Víz	Kisméretű	9	0.03	0.07
	Nagy méretű	3.6 - 11.6	0.009 - 0.024	0.003 - 0.006
Nap	Fotovoltaikus	98 - 167	0.20 - 0.34	0.18 - 0.30
	Termális	26 - 38	0.13 - 0.27	0.06 - 0.13
Szél		7 - 9	0.02 - 0.09	0.02 - 0.06
Geotermikus		79	0.02	0.28

2.2. táblázat. Hagyományos energiatermelés légköri kibocsátásai teljes életciklusuk folyamán az Egyesült Királyságban (g/kWh) (IEA, 2002a)

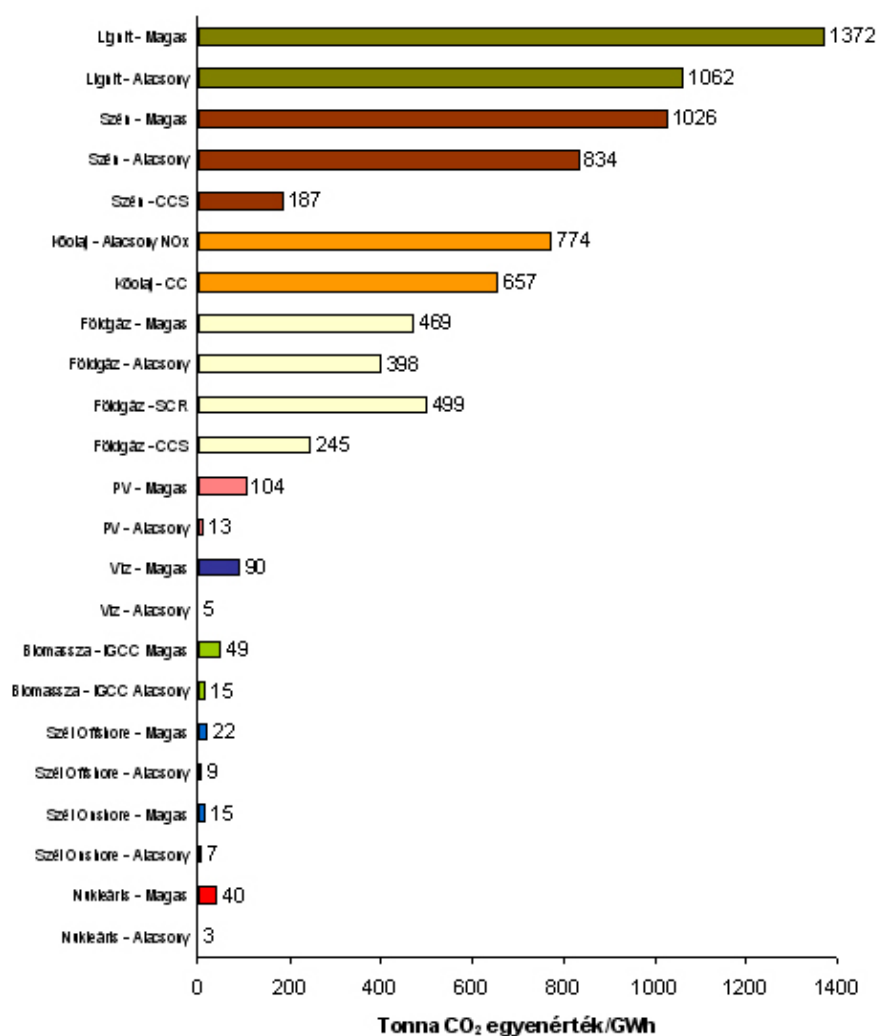
		CO ₂	SO ₂	NO _x
Szén	Legjobb gyakorlat	955	11.8	4.3
	Füstgáz kéntelenítés, és alacsony NO _x	987	1.5	2.9
Kőolaj	Legjobb gyakorlat	818	14.2	4
Földgáz	Kombinált ciklusú gázturbina	430	-	0.5
Diesel	Beágyazott	772	1.6	12.3

A szélergia mindkőzűl a legkisebb légszennyező anyag kibocsátással jár még teljes életciklust figyelembe véve is (2.3 ábra). Ez is főként a gyártáshoz kapcsolódik, hiszen működése nem jár szén-dioxid kibocsátással. A szélergia bármelyik fosszilis energiatforrással felveszi a versenyt, még akkor is, ha a legmodernebb ismert technológiát alkalmazzák energiatermelésre.

Sokak véleménye szerint a megújulók nyújthatnak megoldást a fenntartható energiatermelés megvalósulásához, a kiotói vállalások teljesítéséhez. A világban a növekvő energia igények kielégítése a légkör további terhelése nélkül így oldható meg, vagy a távoli, rurális térségek villamos energiával való ellátása lehetővé válhat ezen erőforrások révén. A megújuló energiatforrások jelenlegi hozzájárulása az energiatermeléshez mindenesetre jelzi egy ország természeti potenciállal való ellátottságát (főként vízerőkeszletek, erdő területek nagysága) és ugyanakkor a gazdaság fejlettségét is.

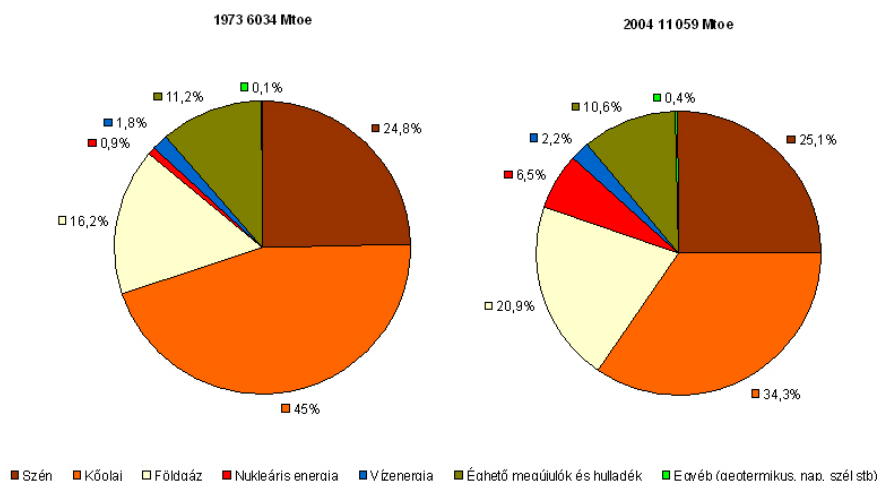
A megújuló energiatforrások felhasználását többféle módon jellemezhetjük az energiaszerkezeten belül. Egyrészt az összes primer energia termelésen belül arányukkal, amikor mindennemű formában történő hasznosítást figyelembe veszünk, beleértve a hőenergia termelésben való részesedést. Másrészt a villamosenergia-termelésben való hányaduk, esetleg energiatfelhasználásban vett részarányuk alapján. Néhány technológia esetében, így a napenergia termikus (napkollektorok) alkalmazásai és mezőgazdasági hulladékok esetén becslésen alapul a fűtőérték meghatározása, így a megtermelt hőmennyiség nagyságrendje is (Molnár, 2006).

A Nemzetközi Energia Ügynökség (IEA) adatai szerint az összes primer energiatermelésen (TPES) belül, noha jelentős szerkezeti átalakulás zajlott 1973 és 2004 között az olajválságok következményeként, a megújulók részaránya (%) nem növekedett nagyságrendekkel (2.8 ábra). Az alternatív energiatforrások felé fordulás egyébként a fejlett országokban elsősorban tényleg a '70-es évek olajválságának köszönhető. Látható azonban, hogy a növekvő igényekhez alkalmazkodva egyre több energiát állítunk elő mind a fosszilis, mind a megújuló energiatforrásokból (IEA, 2006b). Míg az első olajválság idején mintegy 6000 Mtoe (Mtoe - Megatonna kőolaj-egyenérték) energia került felhasználásra, addig az ezredfordulót követően már a 10000 Mtoe-t is meghaladtuk. A részarány alig változott abszolút értékben, a megújulóból termelt energia mennyisége mégis jelentősen nőtt. A jövőre vonatkozó előrejelzések (IEA, 2002b) szerint sem számíthatunk arra, hogy részaránya jelentősen növekedne (2.5 ábra), de az energiaigények növekedésével párhuzamosan mindenképpen növelni kell a közreműködésükkel termelt energia mennyiségét. Ebből következően a megújulóknak igenis helyük van az energiamixben és a jövőben is kisebb - nagyobb fontosságú tételként jelen lesznek majd az országok energiaszerkezetében.



2.3. ábra. Energiatermelési technológiák üvegházgáz kibocsátásának összehasonlítása 1 GWh energiatermelés esetén (Sims, 2007).

CC - Kombinált ciklus; IGCC - Integrált gázosítású kombinált ciklus; SCR - Szelektív katalitikus redukció; CCS - Szén megkötés és tárolás

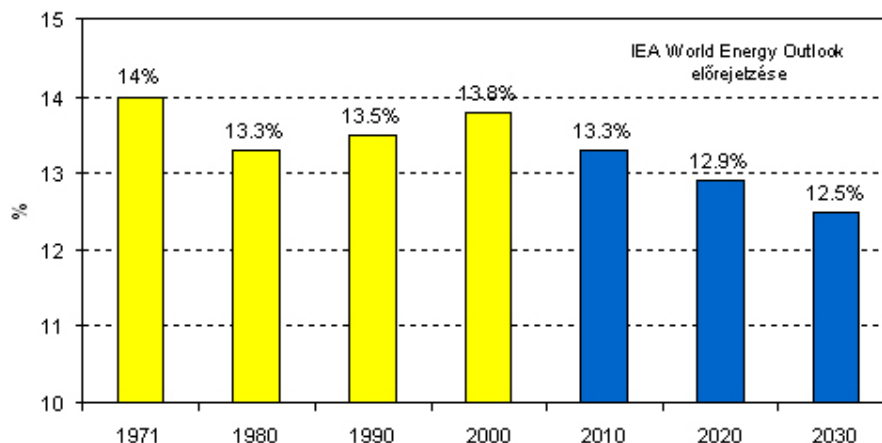


2.4. ábra. Összes primer energiatermelés (TPES) megoszlása (%) 1973 és 2004-ben energiaforrások szerint a Földön. (IEA, 2006b)

Az átlagos éves növekedési ráta alakulása 1971 és 2004 között jól mutatja (2.6 ábra), hogy a megújulók arányának növekedése igazából az igények növekedését követi. A vízenergia ezt meghaladta, míg az éghető megújulók és a hulladék (CRW) aránya némileg elmaradt ettől. A megújuló körön belül azonban azok fejlődtek gyorsabban, amelyek innovációja rendkívül gyors és új lehetőségek sokaságát jelenthetik a jövőben. Így a 70-es évektől a legnagyobb arányú növekedést tudhatja maga mögött a szélenergia.

Az ezredforduló környékén a megújulók a primer energiatermelésen belüli, világátlagban közel 14%-os arányának legnagyobb hányada szilárd biomassza égetésből származott (2.8 ábra), ugyanis a fejlődő országokban mind a mai napig nagy hagyománya van a fatüzelésnek, a különböző szerves hulladékok hőhasznosításának. Ebből eredően az éghető biomassza messze az elsőszámú megújuló energiaforrás világszerte, amely javarészt tűzifát jelent. Sajnálatosan a többi energiaforrás részvétele igen mérsékelt, még a fejlettebb csoporthoz tartozó OECD országokban is (2.8 ábra), hiszen még ezekben az országokban is olcsó megoldás fát, vagy mezőgazdasági eredetű hulladékot égetni az erőművekben. Köztudott, hogy nem csak fejlődő országokban okoz komoly károkat az ésszerű erdőgazdálkodást nélkülöző erdőirtás. Lehetséges következmények taglalása helyett elég, ha a biomassza globális szén ciklusban betöltött szerepére gondolunk. Hosszabb távon nem kerülhető el az anyagi ráfordítás ennél a technológiánál sem. Időben gondoskodni kell energiaerdők telepítéséről, vagy energiafű, energianád termesztéséről, újabb, intelligensebb technológiák kidolgozásáról. Mindenesetre 2000-ben 1371 Mtoe energiát termeltek megújuló energiaforrások segítségével, amelyből mindegy 1000 Mtoe nem OECD országokból származott (2.8 ábra).

A szilárd biomassza jelentős aránya miatt a fejlődő országokban a primer energiatermelés majdnem egynegyed része származik megújuló forrásokból, míg a fejlett országokat tömörítő OECD országok 6% körüli részesedést mutatnak, noha ennek

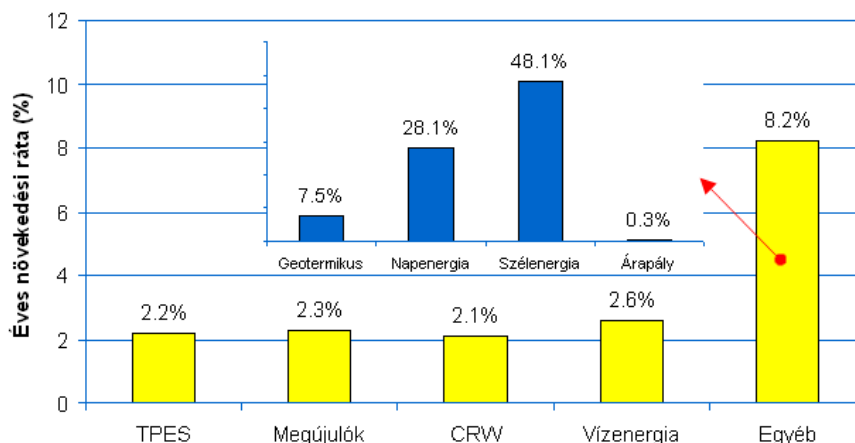


2.5. ábra. A megújuló energiaforrások aránya az összes primer energiatermelésből 1971-től (IEA, 2002b)

több mint 20%-át magasabb technológiai igényű erőforrásokkal (geotermikus, nap, szél, biogáz, folyékony biomassza, hulladék stb.) termelik (2.8 ábra). Az IEA energiasztatistikája szerint a Földön 2004-ben a primer energiatermelés (TPES) 13,1%-a származott megújuló energiaforrásokból és ebben meghatározó szereppel (79,4%) csak az éghető biomassza és hulladék (97%-ban tűzifa) és a vízenergia bírt (16,7%), míg a 1990 óta óriási kapacitásnövekedéssel jellemezhető szél-, nap- vagy geotermikus (stb.) energia még mindig nagyon kis arányt képvisel összességében.

A megújuló-felhasználás jellemzésének másik lehetséges módja, ha a villamos energiatermelésen belüli arányukat vizsgáljuk. Az IEA elemzése (IEA, 2006b) szerint a villamos energiatermelés energiaszerkezete 1973 - 2004 között markánsan átalakult a Földön (2.10 ábra). A kőolaj részaránya jelentősen csökkent a nukleáris energia javára, kissé nőtt a földgáz szerepe, ugyanakkor mérséklődött a vízenergia részesedése. Az egyéb kategóriába tartozó, elsősorban a vízenergián kívüli megújuló energiaforrások részaránya három évtized alatt 0.6%-ról közel 2%-ra növekedett. A Földön összesen megtermelt villamos energia mennyisége ez idő alatt 2,5-szeresére nőtt (1973 - 6111TWh; 2002 - 16054TWh; 2004 - 17450TWh). A vízenergián kívüli megújulók segítségével előállított villamos energia TWh-ban tehát csaknem 10-szer több, mint a '70-es években volt. A vízenergia ugyanakkor kiemelkedő fontosságú megújuló energiaforrás a villamosenergia-termelésben (2.10 ábra), mivel 2004-es adatok szerint a Földön előállított villamos energia 16%-a származik vízerőművekből, 1% éghető biomasszából és hulladékból, és csupán 0.8% az összes többi energiaforrás (így a nap, szél stb.) részesedése (IEA, 2007).

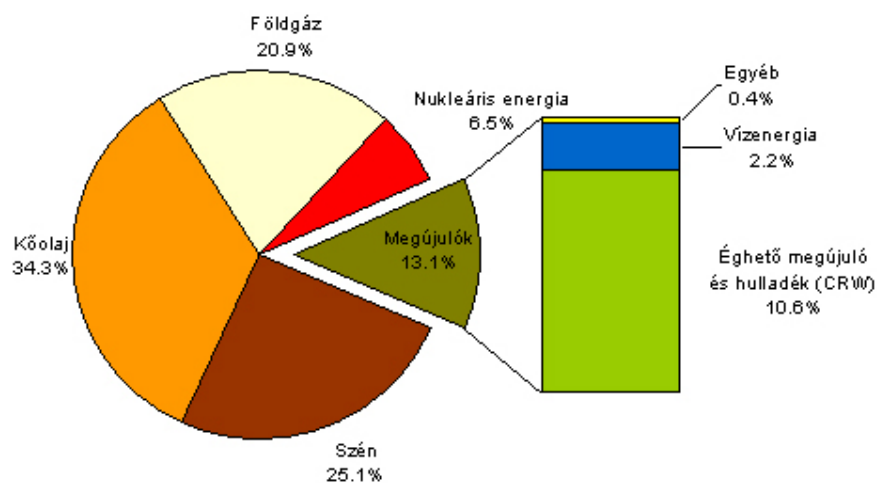
Az európai országokban a megújulók aránya a villamos energiaszerkezetben szintén a vízenergia és biomassza-potenciál meglététől függ. Néhány kivételtől eltekintve azokban az országokban, ahol a természeti adottságok nem kedvezőek, a megújulók aránya a teljes villamosenergia felhasználáson belül a 10%-ot is alig éri el és csak



2.6. ábra. Megújuló energiaforrások átlagos éves növekedési rátája 1971-2004- között (TPES - Összes primer energiatermelés; CRW - Éghető biomassza és hulladék) (IEA, 2002b)

néhány esetben közelíti, vagy haladja meg a 30 %-os részesedést (2.11 ábra). A 2.11 ábrán az európai országok 2010-re vonatkozó vállalásai alapján vannak rendezve. Látható, hogy a 2010-re tervezett aránynövelés azon országokban jelent majd komoly kihívást, ahol egyébként is alacsony részarányt tudhatnak magukénak a megújulók, vagy, akik az 1990 utáni évtizedben sem tudtak jelentős növekedést elérni. Magyarország helyzete sok szempontból sajátos. Az 2.11 ábra mutatja, hogy az EU politikailag elkötelezett a megújuló energiák hasznosításának bővítése iránt. Sajnos a megvalósítás lassan halad, hosszú távon nehézségekbe ütközik. A vízenergia felhasználást már nem lehet drasztikusan növelni, hiszen a kontinensen rendelkezésre álló potenciálok nagy része kihasznált. A biomassza felhasználás bővítését nehezíti magának az energiahordozónak, pl. tűzifa árának folyamatos növekedése. Ez várhatóan igaz lesz a mezőgazdasági növényként termesztett alapanyagok ára is. A jövőben kulcsfontosságú lehet azon megújuló energiaforrások szerepe, amelyek esetén legalább az energiahordozó ingyen elérhető. Ez az oka, hogy a kilencvenes évektől az EU-25 országaiban a szélenergia aránya jelentősen bővül, ugyanakkor sajnos a vízenergia részesedése folyamatosan csökken. A biomassza hasznosítási kedv jelenlegi olcsósága miatt növekvő, míg a geotermikus energiába történő befektetés igen drága, ezért részaránya stagnáló a villamoenergia-termelésen belül (2.12 ábra).

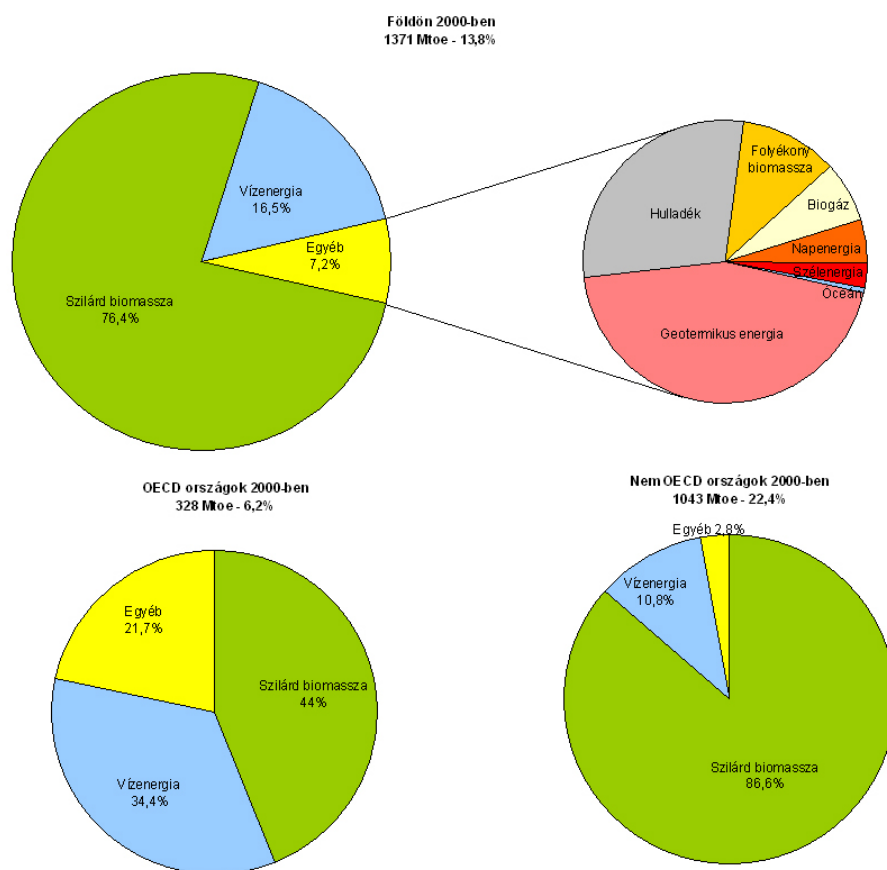
A szélenergia ipari méretű alkalmazása már most relatívan a legalacsonyabb tőkét igényli, a jövőben további 15-25% költségcsökkenés prognosztizálható a technológia fejlesztések révén (2.3 táblázat). A megújulók versenyképességét jelenleg magas fajlagos költségeik is gátolják, tehát az állami szerepvállalás elengedhetetlen széleskörű elterjedésükhöz. Európai gyakorlat szerint országoként eltérően, de beruházási támogatással, adókedvezményekkel, ártámogatással (feed-in tarif), illetve zöldbizonyítvány kiadásával nyújtanak segítséget az ilyen beruházásoknak annak érdekében, hogy tel-



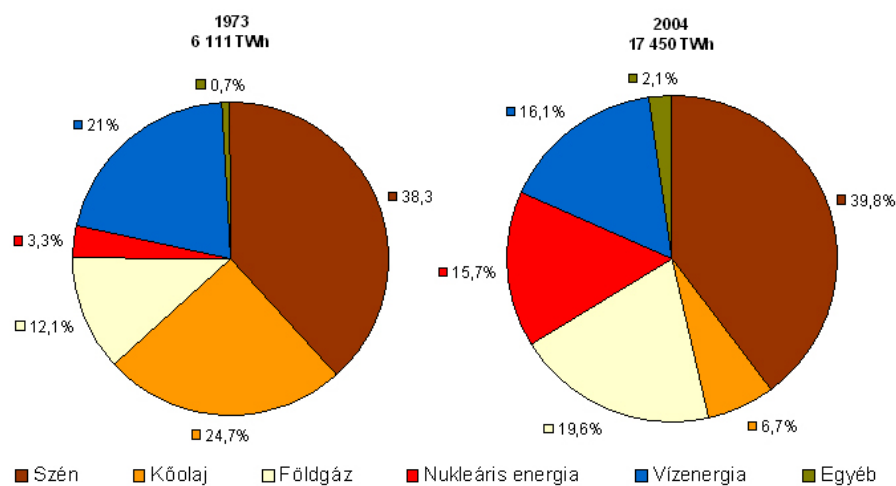
2.7. ábra. Összes primer energiatermelés (TPES) megoszlása (%) 2004-ben energiaforrások szerint a Földön (IEA, 2007)

2.3. táblázat. A megújuló energiaforrások költségei (IEA, 2002a)

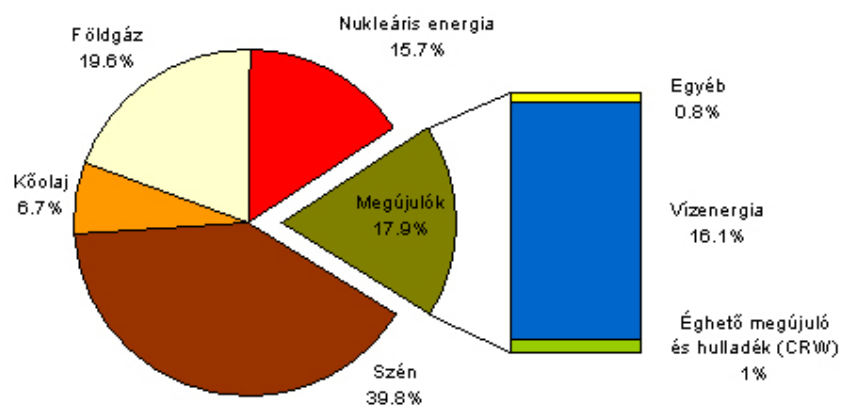
	Jelenlegi költségek	Valószínűen várható átlagos költségcsökkentés 2020-ig
Bioenergia	Magas. Költséghatékony lehet bizonyos alkalmazásokban.	10-15%
Szél onshore	Relatívan alacsony, a többihez képest a legalacsonyabb	Több mint 15-25%
Szél offshore	Magas	20-30%
Nap - fotovoltaikus	Nagyon magas	30-50%
Nap - termális	Nagyon magas	30%+
Geotermikus	Magas	10%
Vízenergia	Relatívan alacsony nagy erőműveknél	10%



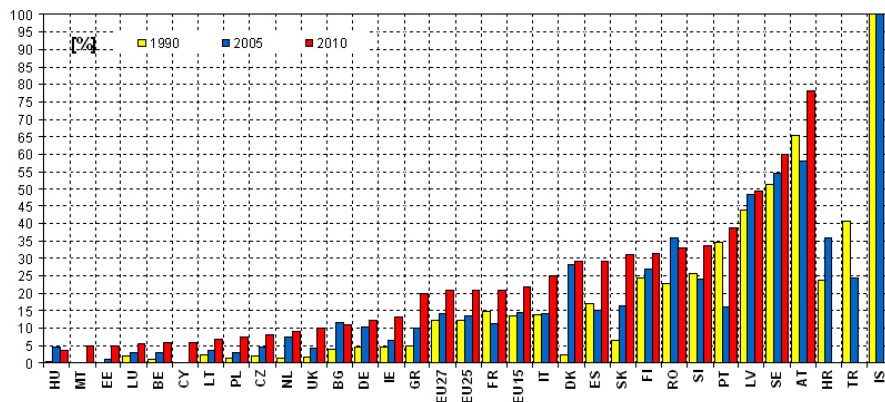
2.8. ábra. Összes primer energiatermelés megújuló energiaforrásokból 2000-ben. (Az egyéb kategóriába tartozik a geotermikus energia, a napenergia (termikus és PV), a szélenergia, a folyékony biomassza, a biogáz és a hulladék) (IEA, 2002a)



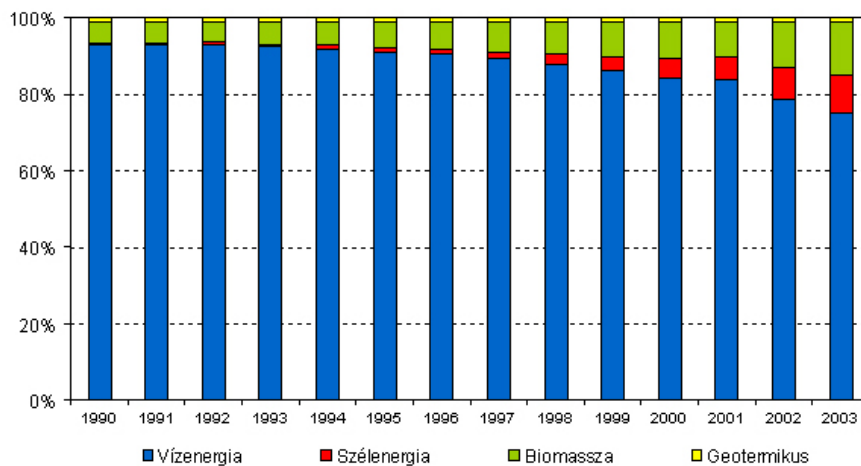
2.9. ábra. A villamosenergia-termelés megoszlása (%) 1973 és 2004-ben energiaforrások szerint a Földön (IEA, 2006b)



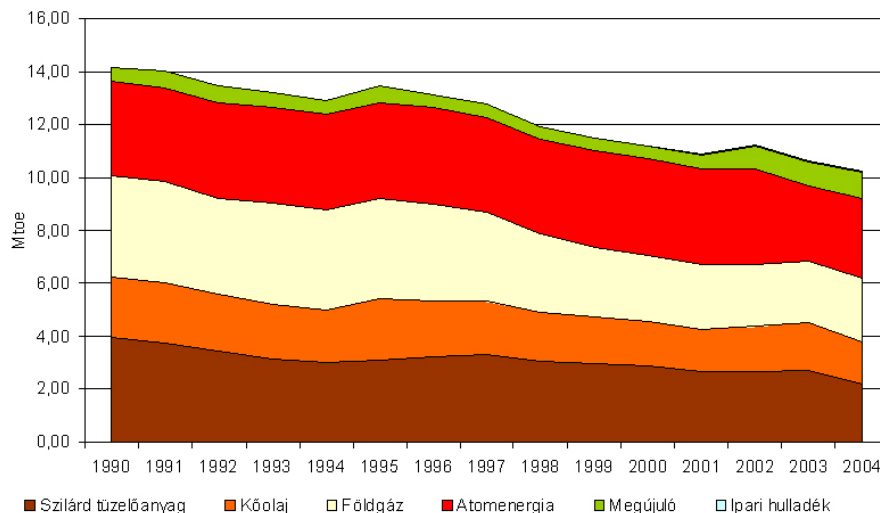
2.10. ábra. A villamosenergia-termelés megoszlása 2004-ben a Földön (IEA, 2007)



2.11. ábra. Megújuló energiaforrásokból származó villamos energia aránya a teljes villamos energiafelhasználásban (%) Európában (EUROSTAT, 2007)



2.12. ábra. Legfontosabb megújuló energiaforrások részesedésének változása a villamosenergia-termelésben EU-25 országokban (EUROSTAT, 2007)

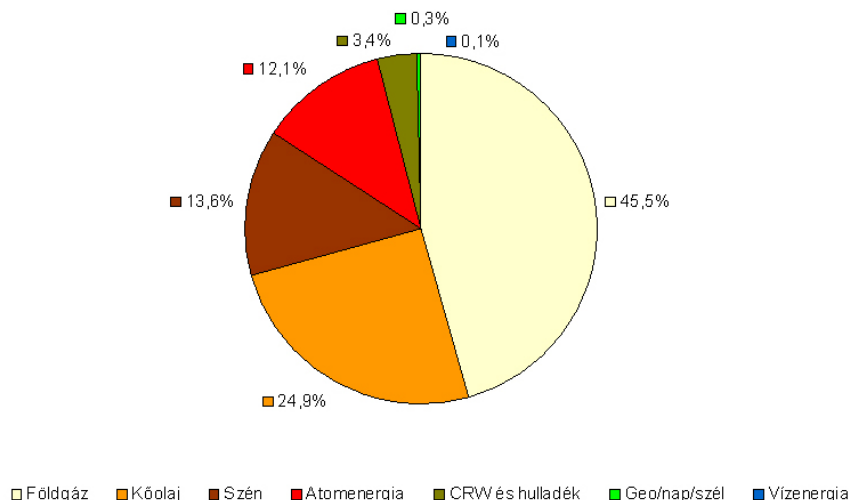


2.13. ábra. Magyarország összes energiatermelésének alakulása kőolaj-egyenértékben (Mtoe) 1990-2004 között (EUROSTAT, 2007)

jesítsék a 2001/77/EK irányelv előírásait. Azaz az importfüggőség csökkentése, a fenntartható fejlődés előmozdítása érdekében versenyképessé tegyék a megújulókat a liberalizált energiapiacra, kifejezetten a villamos energiatermelés területén.

2.1.3. Megújuló energiaforrások Magyarországon

Magyarország az Európai Unióhoz 2004 májusában csatlakozott, így elfogadja annak energiapolitikáját, amely célkitűzésként fogalmazza meg a megújuló energiaforrások növekvő felhasználását. "Magyarország földrajzi fekvésénél fogva, természeti adottságait is figyelembe véve abban a kedvező helyzetben van, hogy a megújuló energiaforrások - több évszázados hagyományt folytatva - jelentős szerepet játszhatnak az ország energiaellátásának biztonságosabb kielégítésében" (GKM, 2003). Magyarország energiafüggősége 2006-ban 63% volt, ami az európai átlagnál (56% 2006-ban) magasabb (EUROSTAT, 2007) miközben az energiatermelés a rendszerváltást követően folyamatosan csökken (2.13 ábra). A főként keleti irányból érkező import aránya ezzel szemben növekvő, hiszen az igénynövekedést valamiből fedezni szükséges. Magyarországnak a természeti adottságait minél inkább ki kell használnia, és egyre nagyobb arányban kell képviseltetni energiaszerkezetében a megújulókat. A rögzített EU elvárásokkal elvben minden további nélkül egyet lehet érteni, azonban a teljesítés főként anyagi okok miatt jelent komoly kihívást a mindenkori aktuális hazai energiapolitika számára. A hazai kormányzat a célkitűzéseket a legkisebb ráfordítással kívánja elérni, miközben egyrészt a rendelkezésre álló potenciálok meglétének hiányára, a villamosenergia-rendszer szabályozhatatlanságára hivatkoznak. Ugyanakkor jelenleg olcsóbb villamos energiát importálni, mint az egyébként is támogatásra szoruló,



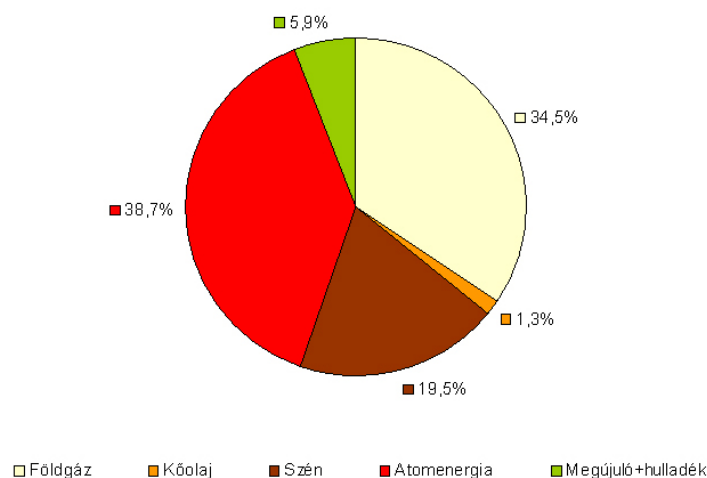
2.14. ábra. Primer energiaszolgáltatás Magyarországon 2004-ben (IEA, 2006a)

rendszerirányítás szempontjából körülményesebb, kevésbé biztosan rendelkezésre álló megújulókat alkalmazni.

A magyarországi primer energiaszolgáltatáson (TPES) belül meghatározó szerepet kapnak a szénhidrogének, a földgáz, illetve a kőolaj (2.14 ábra). A földgáz aránya növekvő tendenciát mutat, míg a kőolaj és a szén aránya folyamatosan csökkent az elmúlt években. Számottevő nagyságrendet a megújulók közül csupán az éghető biomassza és hulladék képviselt, bár meg kell jegyezni, hogy az általuk termelt hőenergia egy része becslésen alapult. A megújulók részaránya a primer energiatermelésben már 4% közelében van.

A hazai villamos energiatermelésben a paksi atomerőmű megépítése óta a nukleáris energia az egyik legjelentősebb tétel (2.15 ábra) a földgáz mellett. A megújulók az ezredfordulót követő években jelentek meg a statisztikákban, hiszen ezt követően épültek a magyarországi szélenergiák, és számos egykori szén-erőmű váltott biomassza tüzelésre. Hosszú éveken át a megújulók aránya nem érte el az 1%-ot sem, azonban részben az EU elvárásaként, de főként a növekvő befektetési kedvnek köszönhetően aránya folyamatosan növekedett. A megújulóból termelt energia gyors fel-futást követően 2005-ben érte el a csúcspontot, amikor a Mátrai Erőmű néhány blokkja is részt vett a tátrai súlyos erdőkár során keletkezett nagy mennyiségű fahulladék égetésében.

A villamos energiatermelésre a megújuló energiaforrások közül meghatározó módon szilárd biomasszát, vízenergiát használunk, másodsorban szél-, és napenergiát, illetve biogázzal hajtott gázmotorokat. A megtermelt energia évről évre változik, hiszen a beépített kapacitások változnak, az erőművek kihasználtsága objektív okokból, illetve az időjárás változása miatt változókéony. Ez különösen igaz a szélenergiára, amely esetében az egymást követő évek között is jelentős különbségek lehetnek. 2001

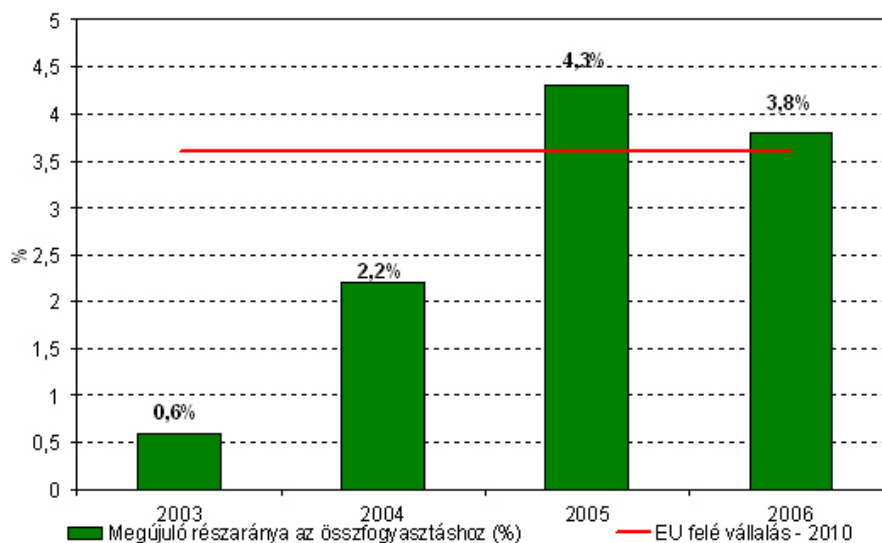


2.15. ábra. Villamosenergia-termelés Magyarországon 2005-ben energiaforrások szerint (MVM, 2006)

után az összes termelt villamos energia mennyisége csökkent kieső erőműi kapacitások miatt (pl. elavult környezetszennyező erőművek felszámolása / biomassza fogadására történő átalakítások), azonban a megújulók nem tudták kellő támogatás hiányában pótolni azokat. Az égethető hulladékban rejlő energia kihasználását ma még a kapacitások hiánya és hatékony, lakosságot is érintő szelektív hulladékgyűjtés bevezetése hátráltatja. A 2002 és 2003 évi adatsorokban nem sorolhatták a megújuló energiaforrásokkal egy kategória, mert a hazai hulladékkezelők nem feleltek meg az Unió követelményeknek.

A legtöbb elemzésben a megújuló energiahordozók által termelt energiamennyiséget az ország összes energia felhasználásához viszonyítva jellemzik (2.16 ábra). Az EU elvárása Magyarországra vonatkozóan, hogy megújulókból származó villamosenergia-termelés részaránya a belföldi felhasználáshoz mérve érje el a 3,6%-ot 2010-re, amely 40000 - 46500GWh éves villamos energia-termelés mellett legalább 1500-1700GWh energia termelését feltételeznél megújuló bázison (Unk, 2004). A Magyar Energia Hivatal adatai szerint 2005-ben már 1721.8GWh villamos energiát állítottak elő megújuló erőforrások alkalmazásával, míg a hazai bruttó fogyasztás 39149GWh értékű volt. A megújulók részaránya a hazai összes energiateljesítményből 2005-ben már 4,3%-ot ért el a Magyar Energia Hivatal adatai (Tóth and Csikós, 2006,2007) szerint. A vállalás 5 évvel a határidő előtt teljesült, azonban hosszú távú kiszámítható energiapolitika teremthet csak olyan hátteret, hogy az EU mind a 2010-re vonatkozó 12%-os, mind a 2020-ra vonatkozó 20% vállalása teljesülhessen. A 2007. márciusi döntés értelmében 2020-ra kötelező érvényű a 20%-os megújulós arány elérése, noha még meg kell határozni, hogy országonként mekkora az elérendő szint.

Magyarországon egy kutatás (Unk, 2004) keretében megvizsgálták milyen megújuló



2.16. ábra. A megújuló energiaforrásból termelt villamos energia a hazai villamos energia össz fogyasztáshoz viszonyítva (Tóth and Csikós, 2007)

szerkezettel lehetséges teljesíteni a követelményeket úgy, hogy az állam részéről a legkisebb támogatást igényelje. Az elsősorban gazdaságossági szempontokat figyelembevevő vizsgálat azokat a lehetséges megújuló technológiákat emelte ki, amelyek önmagukban is gazdaságosak lehetnek, a legkisebb kockázatot jelentik az államnak. Így került kiválasztásra a közepes méretű vízerőművek, a geotermikus energia 50 MW kapacitás fölött, illetve a biomassza hasznosítás néhány változata (pl. biogázmotoros technológia). A szélenergia ezek szerint jelképes támogatást érdemelhetnek, azaz jövőben is a hagyományos, nem innovatív technológiák kaphatnak szerepet a magyarországi energiaszerkezetben.

Természetes, hogy a nagyobb beépített kapacitású erőművek hosszútávon versenyképesek és a rendszerirányító szempontjából is kedvezőek, azonban 2005-ig környezetvédelmi okokból, 2015-ig pedig gazdasági - műszaki okokból várhatóak erőmű leállások, melyek kieső kapacitásait pótolni szükséges az elkövetkező 20 év folyamán (Stróbl, 2004). Az épülő erőművek kb. 25%-a lehetne földgázra és megújuló erőforrásra épülő kiserőmű, míg az ellátás biztonsága szempontjából egy közepes méretű vízerőműre, illetve import feketeszénre, vagy hazai lignitre épülő, összetett körfolyamatú kapcsolt termelésű nagy erőművek építésére lenne igény (Stróbl, 2004). Természetesen az atomerőmű élettartamának meghosszabbítása is várható, hiszen a magyar közvélemény az európai átlagnál kedvezőbben ítéli meg a nukleáris energiát. A magyarok mindössze 34%-a támogatja és 20%-a ellenzi, míg az EU-25 átlaga pedig 20%-a támogató és 37%-a ellenző (Eurobarometer, 2007).

Az európai országok villamosenergia-rendszeregyesülése (UCTE) álláspontja szerint (Bial, 2005) támogatja a megújuló energiaforrások fejlesztését és azoknak az európai villamosenergia-rendszerekbe történő integrációját. Jelenleg a világ üzembe

helyezett szélenergia hasznosító létesítményeinek közel kétharmada működik az UCTE európai hálózatán belül. A jövőben tervezett nagy arányú szélenergia-kapacitásbővítés számos hálózati irányítási problémát indukál, azaz a meglévő hálózati infrastruktúra kapacitásának növelésével, pótlólagos tartalék erőművi kapacitások bevonásával érhető csak el, hogy továbbra is biztonságos legyen az európai villamosenergia-ellátás, és magas minőségi színvonalon tudjanak működni az integrált hálózati irányítók (TSO). Az intézkedéseknek nemzeti szinten is meg kell valósulniuk, hiszen számos európai országhoz hasonlóan hazánk is tagja az UCTE-nek (Union for the Coordination of Transmission of Electricity). A hazai rendszerirányítást érő kihívások egyik lehetséges megoldási lehetőségét teremtheti meg egy VER-be illesztett szivattyús tározós erőmű, amelyet már a paksi atomerőmű megépítése idején terveztek megépíteni a villamosenergia-rendszer stabilitásának biztosításához.

Miután a villamosenergia-szolgáltatás privatizált, a közeli jövő a liberalizált energiapiac létrejöttéről szól, az állam egyre inkább kivonul erről a területről.

2.2. A szél energiája és hasznosítása

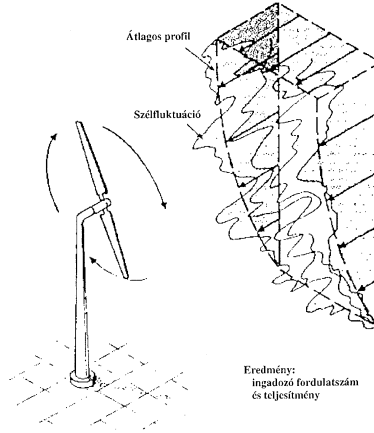
A légköri mozgások leírásához használt vektormennyiségek (u , v , w) horizontális (zonális és meridionális) összetevőit (u , v), azaz a levegő vízszintes irányú elmozdulását nevezzük szélnek. Az u és v vektormennyiségek egyértelműen meghatározzák a szél erősségét és irányát. A szél sebességét a vektorszámítás szabályai szerint, irányát a u és v vektorpárok előjel kombinációi szerint tangens függvény segítségével határozhatjuk meg. Mivel a légköri mozgások összetettek, többféle térbeli skálán értelmezhetők, matematikai leírásuk bonyolult. A Föld légköre mindig mozgásban van, így egy adott helyen szemlélve a szél a csapadék mellett az az éghajlati elem, amelynek tér- és időbeli változékonysága a legszembetűnőbb.

A légköri mozgások globális rendszere létrejöttének oka abban áll, hogy a Naptól érkező sugárzási energia a Föld gömbalakja miatt a földfelszínen nem egyenletesen oszlik el, ez eltéréseket indukál a légnyomás eloszlásában. Miután a rendszer egyensúlyra törekszik, a nyomáskülönbségek kiegyenlítésére légmozgások keletkeznek.

A súrlódásmentes szabadlégkörben a nyomáskülönbségből származó nyomási gradiens erő és a forgórendszerekre jellemző Coriolis erő egyensúlyaként írjuk le a geosztrófikus szelet, melynek sebessége arányos a nyomáskülönbséggel, iránya az izobárokkal párhuzamos.

A szélenergia hasznosítás szempontjából a légköri határréteg felszín közeli rétegeinek (Plandtl és Ekman réteg) folyamatai kulcsfontosságúak (Bartholy and Radics, 2000). A légkör legalsó, átlagosan mintegy 1 km vastag régiójában a szilárd felszín és a légkör kölcsönhatásának következményei figyelhetők meg. Hatással van a légmozgásokra a felszíni érdességéből származó súrlódási erő, ezért a talaj közelében három, légkörben ható erők eredőjeként alakul ki elméletileg légmozgás. Ennek iránya nem egyezik meg a geosztrófikus szél irányával, az izobárokkal α szöget zár be (Czelnai et al., 1994; Rákóczi, 1998; Tar, 2000; Péczely, 1979).

A planetáris határréteg legalsó, már kb. 1 m magasságban a kicserélődés turbulens mozgások formájában történik, azaz a külső és belső súrlódás miatt az áramlás örvényes. Ennek megnyilvánulása a szélesebességének rendkívüli gyorsaságú in-



2.17. ábra. A szél fluktuáló jellege horizontálisan és vertikálisan

gadozása egy adott helyen (Szász and Tőkei, 1997). A nagy érzékenységu, sűrű mintavételezésű anemométerek szélregisztrátumain jól felismerhető a szél lökésessége. A pillanatnyi horizontális szélesség egy időintervallumra érvényes átlagos tagból és a fluktuációra jellemző tagból tevődik össze. A fluktuáló tag jelzi a turbulens örvények áthaladását a megfigyelő helyen (Szász and Tőkei, 1997), ez pedig szélenergia konvertereknel ingadozó fordulatszámot és teljesítményt eredményez (2.17 ábra). A szélesség és energiájának becslésének megbízhatósága pedig többek közt (Melzer, 2001) az átlagolási idő megválasztásán is múlik. A mérések pontosságát javítja, ha minél rövidebb időtartamra átlagolunk (Vigh, 1996, ;Bartholy and Radics, 2000). A gyakorlatban energetikai célú alkalmazásokban a 10 perces átlagolás az ajánlott és elfogadott (GmbH, 2000).

További problémát vett fel, hogy a szél sebessége, és egy meghatározott szinttől az iránya, vertikálisan változik. A téma szakirodalma egyetért abban a vonatkozásban, hogy a felszín feletti szélprofil alakját a felszín tulajdonságai (a felszín domborzata, a felszínborítottság, érdesség, mesterséges akadályok) mellett légköri tényezők is szabályozzák. Így nagytérségű időjárási jelenségek, a légkör egyensúlyi állapota, hőmérsékleti szerkezete, a nedvesség eloszlása befolyásolhatja.

A szél sebességének magassággal történő változását gyakran exponenciális, logaritmus esetleg lineáris összefüggésekkel közelítik. A meteorológiai gyakorlatban inkább logaritmus összefüggéssel (2.1),

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.1)$$

ahol $u(z)$ a szélesség magasságban, z_0 a felszín érdességi magassága, $\kappa = 0.4$ a Kármán-féle állandó és u_* a dinamikus (súrlódási) sebesség (Tennekes, 1973). Az elméleti logaritmus szélprofil összefüggés (Baranka et al., 2001) a planetáris határretegére vonatkozó vizsgálatok szerint jól alkalmazható 100 m felett a talaj közelében és nagyobb magasságokban 925-850 hPa magassági szintben főként neutrálisához közeli,

vagy gyengén labilis légköri egyensúlyi helyzetekben, azaz főként nappal. A becslés hibája romlik talajközeli inverzió, erősen stabil állapotok fennállása esetén, különösen éjszaka. A 2.1 összefüggés alapvető esetleges stabilitási korrekcióval a szélsébség becslésekhez a mérésektől eltérő magasságban.

A egyszerűsített, gyakorlatban alkalmazott változata a Hellmann-féle hatványkitevős összefüggés (2.2), ahol az α kitevő értékénaka nemzetközi gyakorlatban $\alpha = \frac{1}{7} = 0.14$ konstans értéket vesznek.

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

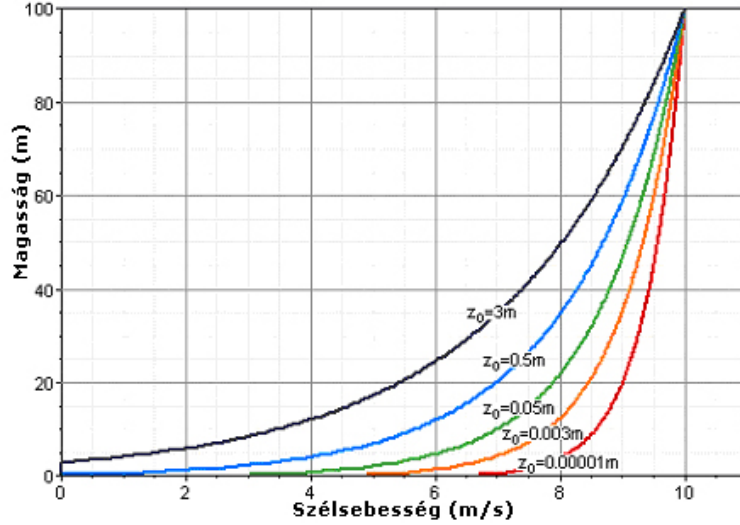
Egyszerűségének köszönhetően az energetikai célú szélmerések során is alkalmazzák az eredmények szélturbina magasságára történő konvertálásakor. Az α kitevő a logaritmikus összefüggésben szereplő z_0 érdességi magasság segítségével is közelíthető (2.3) (Hau, 2003) .

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

A kitevő értéke a magyarországi szélenergia potenciát felmérő kutatások alapján is bebizonyosodott, hogy nemcsak a felszín érdességének függvényében, hanem számos légköri tényező eredőjeként széles határok között változhat (Tar (2004), Hunyár (2004), Varga et al. (2006)). A kutatás megállapította, hogy Magyarországon országos átlagban $\alpha = 0.25$ kitevőérték ajánlott (Dobi and Mika, 2007).

Az áramlási mezőt a felszín közelében alapvetően négy paraméter képes jelentősen befolyásolni, amelyeket a szélmező modellezése során figyelembe vesznek.

1. A felszín érdessége, amely a felszín tulajdonságai által meghatározza a szélprofil alakját. Mint láttunk teljesen sík felszín felett közel logaritmikus a görbe alakja. Az érdességi magasság (z_0) értéke a felszín jellegétől függően más és más (pl.: víz és erdő felett), a mérőhely körül akár szélirány szektoronként változhat. A jelentősebb érdességváltozásnak hatása van a szélprofil alakjára, ugyanis a légkör alsó régiójában az uralkodó szél irányának megfelelően ún. belső határréteg fejlődik, amelynek magassága a távolság négyzetgyökével arányosan növekedve egyre magasabb rétegek szélviszonyait befolyásolja. Az érdességváltozás hatásának és a belső határréteg magasságának modellezése (2.19 ábra) adhat választ arra, hogy például a tengeri offshore szélfarmokat milyen távolságra tegyék a parttól, illetőleg a tengerparton milyen magas oszlopra helyezzék a turbinákat (Foken, 2001).
2. A topográfia, a vizsgálandó térség domborzata egyértelműen áramlás-módosító. A rajta kialakuló hőmérséklet eloszlás is generál helyi légmozgásokat (hegy - völgyi szél). Enyhe lejtőjű domborzat leírása egyszerű szélmodellekkel is megoldható, míg összetett terepek hatásának modellezése rendkívül bonyolult (Radics, 1999).
3. Az árnyékoló objektumok (épületek, fák) jelenlétének vizsgálata a harmadik lépés az észlelőhely leírása során. "Az akadályok hatása az objektum magasságának háromszorosáig, míg horizontálisan az akadály mögött 30-40-szereséig terjed." (Bartholy and Radics, 2000).



2.18. ábra. A szélprofil alakja különböző érdességi magasság (z_0) esetén

4. A felszín hőmérsékleti és nedvességi karakterisztikái mérsékelt szeles vidékeken már elhanyagolhatók. Ezért gyakran standard légköri körülményeket (neutrális légrétegződést, 15°C átlagos hőmérsékletet és 1.225 kg/m^3 sűrűségű levegőt) vesznek alapul a széltérkép statisztikák készítésénél.

A szél sebessége révén kinetikus energiával (E_k) rendelkezik, amely arányos a mozgó levegő tömegével (m) és a sebesség (v) négyzetével:

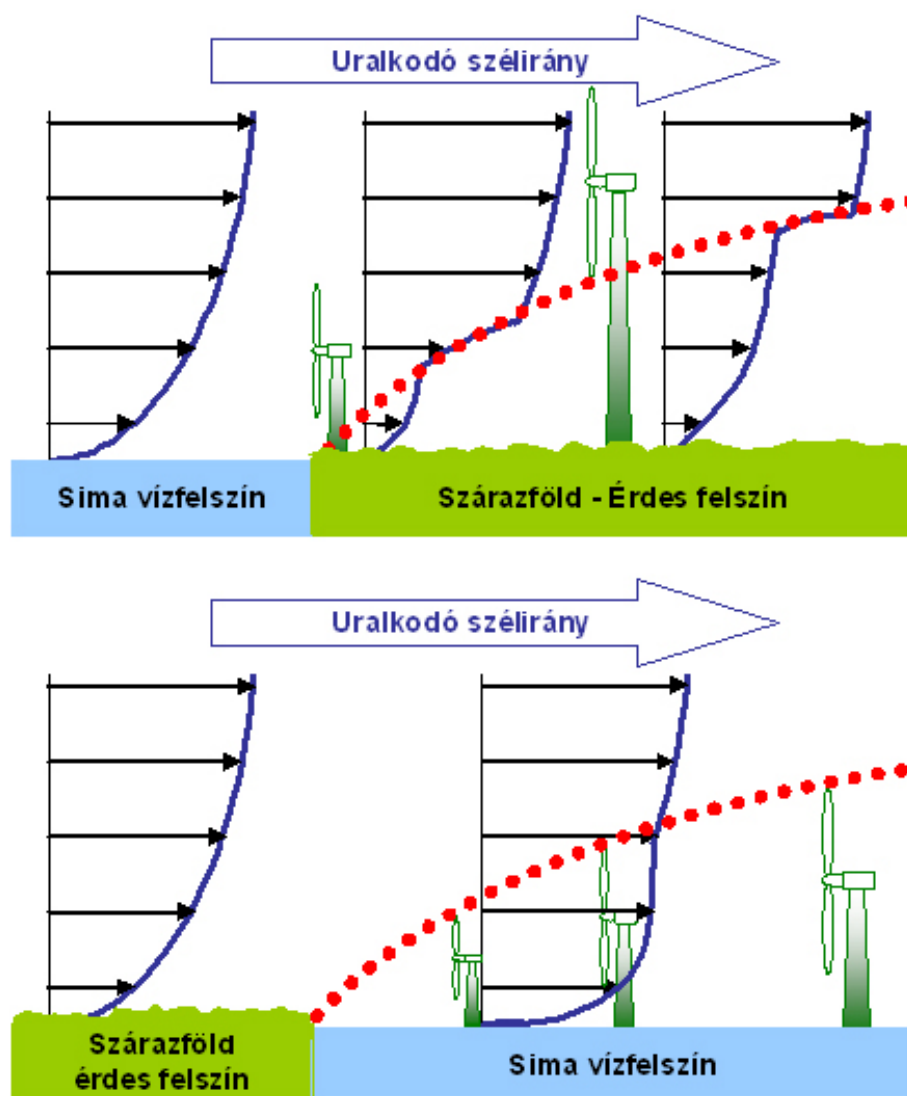
$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2.4)$$

Amennyiben meg akarjuk határozni, hogy A függőleges felületen, egységnyi idő alatt átáramló levegő tömegnek (ρ) mekkora a kinetikus energiája, eredményül a szélsebesség köbével arányos (Czelnai, 1953), úgynevezett fajlagos szélteljesítményt (P) kapjuk:

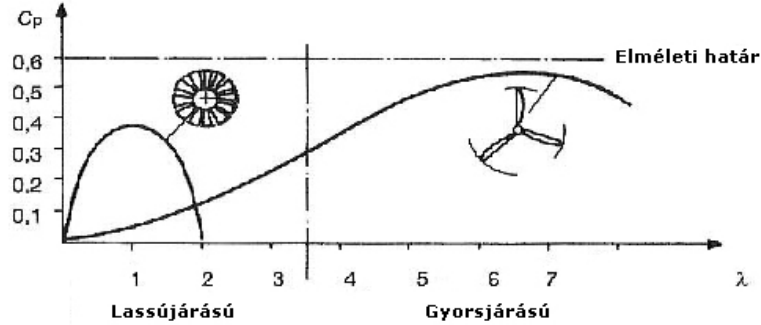
$$P = \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) \cdot v \cdot A = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot A \quad (2.5)$$

A köbös összefüggés miatt a szélsebesség megduplázódásával a potenciálisan kinyerhető fajlagos szélteljesítmény nyolcszorosára növekszik (AWEA, 2001; ; Kakas and Mezősi, 1956).

A rotorlapátokon áthaladó levegő energiája teljes mértékben nem használható ki, mivel ehhez a szelet a lapátoknak teljesen le kellene fékeznie. A levegőnek azonban tovább kell mozognia (Czelnai, 1953). A szélérőmű csak azt az energiát tudja kihasználni, ami a rotor két oldalán létrejövő sebességkülönbségnek felel meg. Az elvileg maximálisan elérhető hatásfok akkor alakul ki, ha a rotorlapát előtti szél sebessége



2.19. ábra. Érdesség változás hatása a felszín közeli szél tulajdonságaira (Foken, 2001)



2.20. ábra. A teljesítménytényező (C_p) változása a gyorsjáratí tényező (λ) függvényében (Sembery and Tóth, 2004)

a gépen áthaladva harmadára csökken (Czelnai, 1953). Persze a ténylegesen kinyerhető szélenergia (P_k) erősen függ az alkalmazott turbina tulajdonságaitól, elsősorban a rotorlapátok kialakításától. Ezt jellemzi az ún. C_p teljesítménytényező (Justus, 1985):

$$P_k = C_p \cdot P \quad (2.6)$$

A maximálisan kinyerhető teljesítményt a 3.1 adja meg:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.7)$$

ahol a $\frac{16}{27}$ hányados a rotor ideális, vagy maximális teljesítménytényezője:

$$C_{pmax} = 0,593 \quad (2.8)$$

A teljesítménytényező a rotor energetikai hatásfoka, amely megmutatja, hogy a rotor adott terhelés mellett milyen mértékben használja ki a szél mozgási energiáját. Ezt az értéket Betz - limitnek is nevezzük (Hunyár et al., 2002; Sembery and Tóth, 2004), amelyet egyetlen szélenergia-átalakító szerkezet sem képes felülmúlni.

A teljesítménytényező alapvetően tehát az alkalmazott rotorlapátok kialakításának a függvénye (2.20 ábra). Két leggyakoribb rotorkialakítás a lassújárású, sok lapátos, illetve a gyorsjárású, szárnytípusú rotor. A gyorsjáratí tényező (λ) a rotorlapátok végén mérhető kerületi sebesség és a szélssebesség hányadosa, amely alapján lassú- és gyorsjárású szélérőgép típusokat különböztetünk meg.

A lassújárású szélérőgépek rotorlapátjai vékony hajlított lemezekből állnak, melyek az adott szélviszonyokhoz optimalizált lapátszöveget zárnak a széliránnyal. Nagyon kicsi az indítási sebességük, azonban névleges teljesítményüket gyorsan elérik, mivel erősödő szélben az egyes lapátok az előttük álló lapátok által keltett légörvényébe kerülnek, így csökken a kinyerhető teljesítmény. Alapvetően gyenge szeleknél (2-4 m/s) ideálisak.

A gyorsjárású berendezések rotorlapátjainak a száma kevesebb, mint a lassújárásúaké, azonban összetettebb kialakításúak. A felhajtó erőt hasznosító szárnylapátok segítségével nagyobb teljesítménytényezőt érhetünk el különösen, ha a szárnylapát

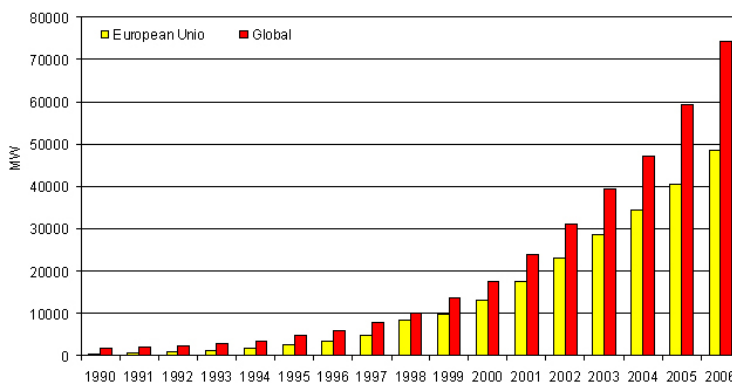
széllel bezárt szöge változtatható. A háromlapátos, dán típusú, pitch szabályozással ellátott szélérőművek eredetileg magasabb (50-100m) légrétegek szélviszonyaihoz optimalizált villamosenergia-termelők. Ezek a berendezések nagyobb szélsébség (6-10m/s) esetén működnek ideálisan, névleges teljesítményük nagyságrendekkel nagyobb, mint a soklapátos, lassújárású társaiké.

A fentiekből következik, hogy a szélerőátalakító berendezések kialakításuktól függően adott szélsébség tartományban üzemelnek optimálisan. Az indítási és kikapcsolási szélsébség miatt nem túl gyenge és nem túl erős, de viszonylag állandó sebességű légmozgás a legkedvezőbb a hasznosítás szempontjából.

2.2.1. A szélerőátalakítás helyzete

Európa vezető szerepe vitathatatlan a szélerőátalakítás-iparban, hisz itt tevékenykedik a szél-turbina-gyártók 90%-a (TPWIND, 2006), a világszerte 235 000 magasán kvalifikált alkalmazott tekintélyes része, a telepített kapacitások nagyságrendjéről nem is beszélve. A szélerőátalakítás fejlődése világszerte rendkívül dinamikus az utóbbi időkből.

A Globális Szélerőátalakítás Tanács (GWEC, 2007) adatai szerint 2006 végére a Földön összesen 74 223MW-nyi szélérőmű termelt villamos energiát (2.21 ábra). Az elmúlt évben 15 200MW új szélérőművet állítottak üzembe, amelyek a Worldwatch Institute számításai szerint 43 millió tonna CO_2 kibocsátástól óvta meg a földi légkört (43 millió tonna CO_2 megfelel 23db USA-beli átlagos méretű szélérőmű, vagy 8 millió személygépkocsi éves szén-dioxid emissziójának).



2.21. ábra. Telepített szélerőátalakítás kapacitások alakulása a világban és Európában 2006 végéig (EWEA, 2007)

A telepített kapacitásokat illetően vezető szerepe van Európának 65,4% részaránnyal (48 027 MW), azonban a dinamikus fejlődő észak-amerikai piac (USA (11 603 MW) és Kanada (1 459 MW)) mellett a fejlődés központja egyre inkább Ázsia (elsősorban India (6 270 MW), Kína (2 604 MW) és Japán (1 394 MW)).

A tavalyi évben világszerte közel 22 milliárd dollárt fektettek a szélerőátalakítás iparba. A Föld közel 50 országában hasznosítják ipari célra és 13 országban üzemel több

2.4. táblázat. Összes telepített szélenergia-kapacitás országonként 2006 végén (GWEC, 2007)

	MW	%
Németország	20622	27.8
Spanyolország	11615	15.6
USA	11603	15.6
India	6270	8.4
Dánia	3136	4.2
Kína	2604	3.5
Olaszország	2123	2.9
UK	1963	2.6
Portugália	1716	2.3
Franciaország	1587	2.1
Hollandia	1560	2.1
Kanada	1459	2.0
Japán	1394	1.9
Világ többi országa	6571	8.9
top 13	67652	91.1
Teljes	74223	100.0

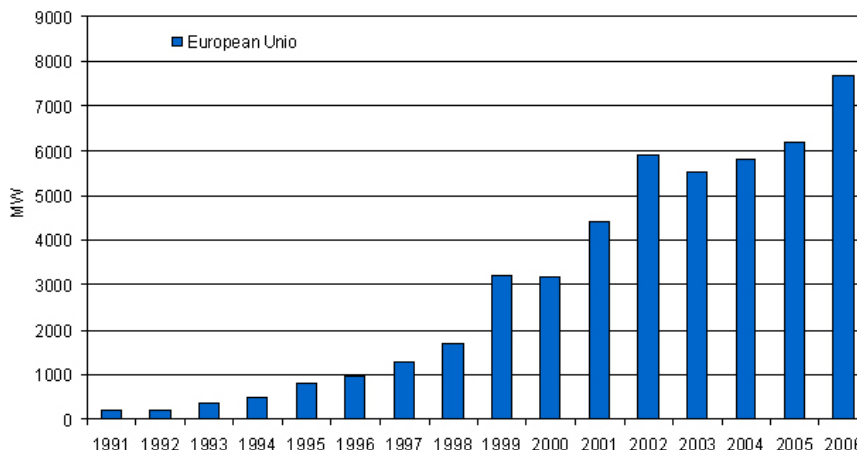
mint 1000 MW nagyságrendű szélerőmű. Az országok sorrendjét kapacitás alapján a 2.4 táblázat foglalja össze. Ez a néhány ország adja a Földön felállított összes szélerőmű kapacitás 90%-át. Ezen országok szinte mindegyike jelentős energiainportőr, míg mások tekintélyes fosszilis energiakészletekkel rendelkeznek, vagy számottevő az atomenergia felhasználásuk. Ennek ellenére ezekben az országokban és a világ egyre több részén az ellátásbiztonság növelésére hivatkozva, másrészt a klímaváltozás elleni küzdelem részeként az utóbbi években az energiapolitika részévé vált a megújuló energiaforrások, és ezen belül a szélenergia ipari méretű hasznosításának ösztönzése.

A fejlődő országokban a kiotói megállapodáshoz kapcsolódó CDM (Clean Development Mechanism) projektek keretében építenek évente több száz szélerőművet, de például India a szélenergia ipar munkahelyteremtő képességét kihasználva szélturbina-gyártó cégek alapításában is jeleskedik. Ezek gyakran az európai know-how tudást hasznosítják. A vállalatok mára nemcsak az ázsiai piacot látják el, hanem az európai piacon tőkeerős befektetőként is megjelennek. Például 2007-ben a Suzlon indiai szélturbina-gyártó vállalat befolyást szerzett a német érdekeltségű Repower Systems részvénytársaságnál. Ez utóbbi vállalkozás építette meg egyébként Európa első 5 MW teljesítményű szélerőművét.

Az Európai Szélenergia Társaság (EWEA, 2007) szerint az európai piac 2006-ban 7588MW újonnan telepített szélerőmű kapacitással bővült (2.22 ábra), a növekedés 23% 2005 végéhez képest. A beruházások értéke 2006-ban elérte a 9 milliárd Eurót. Az elmúlt 7 év során Európában az újonnan létesített energiatermelő kapacitások sorában a földgáz tüzelésű erőművek után (2006-ban Európában közel 8500 MW gázmotoros erőművet adtak át) legnagyobb számban szélerőműveket telepítettek.

Az Európai Unióban (EU-27) 2006-ban működő összesített szélenergia kapacitás

elérte a 48027MW-ot (2007-ben 56535 MW-ot) . Egy átlagosan szeles évben ennyi szél erőmű közel 100 TWh villamosenergia termelését biztosítja, amely az Európai Unió teljes energiafelhasználásának közel 3,3%-val egyenlő. Ez Magyarország teljes villamosenergia-felhasználásának több mint kétszeresével egyenlő! A szélenergia piac az elmúlt években hasonlóan bővült, mint az atomenergia a '70-es években.

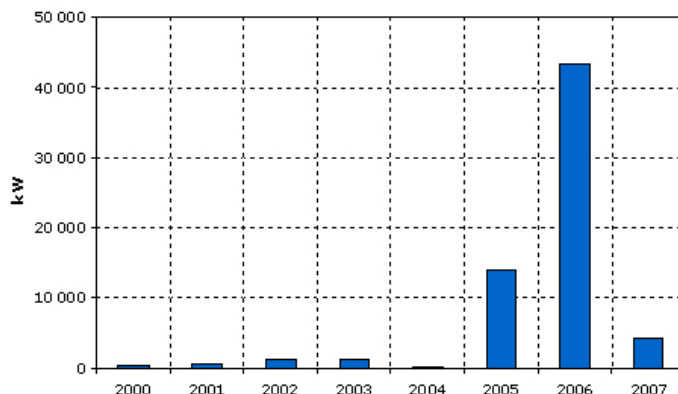


2.22. ábra. Évente telepített szélenergia kapacitások alakulása Európában 2006 végéig (EWEA, 2007)

Az európai szélenergia piacon továbbra is Németország és Spanyolország a két legnagyobb befektető. Ez a két ország tudhatja magáénak a piac több mint 50%-át. A piac egészséges fejlődését igazolja, hogy az európai országok második hulláma is egyre inkább beruház a szélenergia hasznosításba. A harmadik helyre zárkozott fel telepített szélenergia-kapacitásokat illetően Franciaország. Ez azért is meglepő, mert Franciaország hagyományosan atomenergia-párti. Franciaországot Portugália, az Egyesült Királyság, Olaszország és Írország követi a rangsorban.

Az EU újonnan csatlakozott országaiban a 2005 évi 60 MW kapacitás 2006 végére megháromszorozódott, 2006-ban elérte a 183 MW-ot. Ez a fejlődés azonban főként három országnak volt köszönhető: Lengyelországnak (69,3 MW) , Litvániának (49,05 MW) és Magyarországnak (43,4 MW). Bulgáriában 22 MW, míg Romániában 1,3 MW teljesítményű szél erőművet helyeztek 2006-ban üzembe. A jövőben ezekben az országokban is várhatóan dinamikus bővülni fog a szélenergia hasznosítása, amennyiben a politikai akarat mellett a befektetők bízhatnak a megfelelő jogi és gazdasági feltételek megteremtésében.

Hazánkban az ezredforduló környékén indult meg a befektetők részéről az érdeklődés a szél energiájának lehetséges hasznosíthatósága iránt, 2000 decemberében épült meg az első ipari méretű szél erőmű Inotán. A fejlődés dinamikus, azonban nem töretlen, főként ha az évente installált szél erőmű kapacitásokat vizsgáljuk (2.23 ábra). A Magyar Szélenergia Társaság információi szerint 2006 folyamán Magyarországon nyolc helyszínen összesen 43,4MW új szél erőmű kapacitás épült fel. A Magyar Energia Hivatal adatai szerint a szélenergiából hálózatra termelt áram hazánkban folyam-



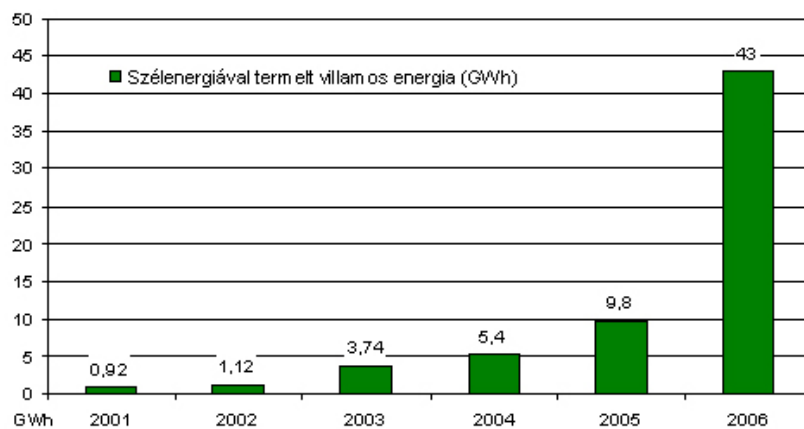
2.23. ábra. Évente telepített szélenergia kapacitás alakulása Magyarországon 2007 végéig

atoson és dinamikusan növekszik (2.24 ábra), 2006-ban 43 GWh villamos energiát termeltek a magyarországi szélerőművek, amely az összes energiatermeléshez képes csupán néhány tízezrelék nagyságrendet jelent. Valószínűleg a 2010-ig várhatóan megépülő 330 MW esetén sem lesz részaránya 2% feletti. A szélenergia hasznosításban úttörő és ma már vezető szerepet játszó országokban a szélenergia energiatermelésben vett aránya jóval jelentősebb, de fejlődés hasonlóan dinamikus volt (2.25 ábra).

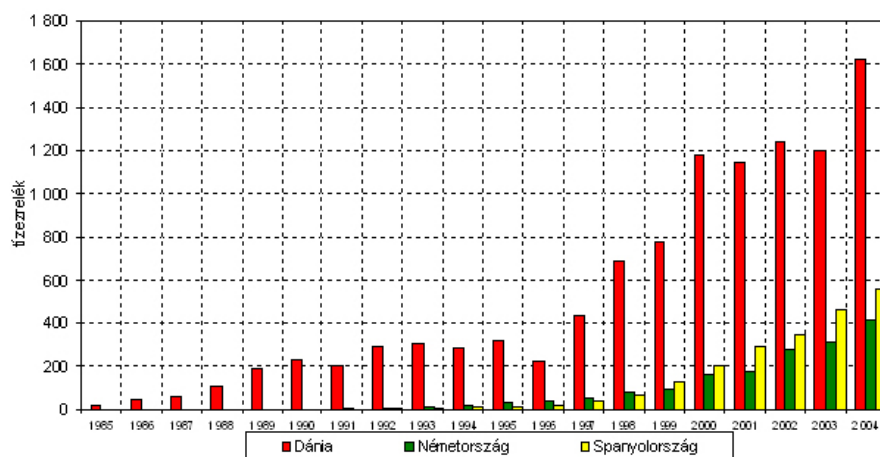
2007 folyamán összesen 4,2MW új szélerőmű épült fel és termel villamos energiát hálózatra. A legutóbb Mosonszolnok, Csorna, Mecsér és Bakonycsérnye települések határában felállított szélerőművekkel együtt az országban 2007 végén összesen 43 darab, összesen 65,075 MW szélerőmű üzemel (2.26 ábra). Földrajzi elhelyezkedés szempontjából a Kisalföld, az ország legszelesebbnek tartott Észak-Dunántúli része (2.27 ábra) a meghatározó.

A napjainkban a szélerőművek már 75 - 100m magas oszlopokon üzemelnek annak érdekében, hogy minél gazdaságosabb legyen működésük, és minél inkább kihasználják a magassággal növekvő, rendelkezésre álló szélpotenciált.

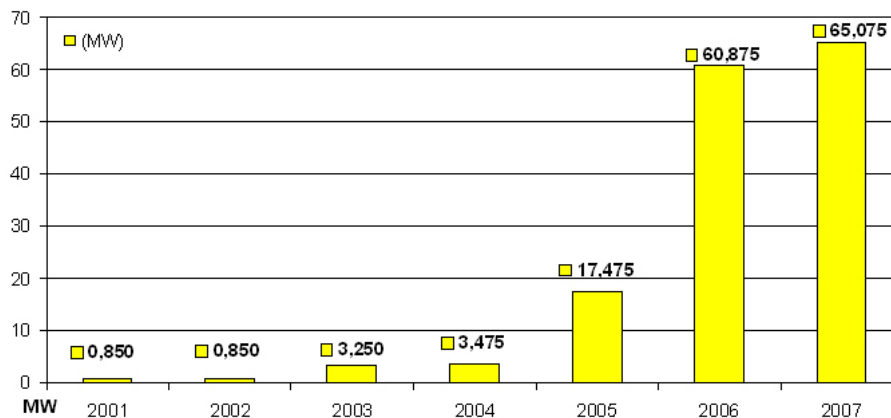
Tény, hogy 2010-ig a befektetői szándékok ellenére a villamosenergia-rendszer szabályozási problémáira hivatkozva összesen 330MW-nyi szélerőmű állhat üzembe hazánk-ban fő-ként a legszelesebbnek tartott Észak-Dunántúlon. Az erre vonatkozó engedélyeket már kiadták. További szélerőművek létesítésének jelenleg elsősorban adminisztratív akadályai vannak, azaz nem kapnak az Magyar Energia Hivataltól (MEH) a létesítésre és a villamosenergia-termelésre engedélyt. Ebben az engedélyben határozza meg a MEH a kötelezően átveendő villamos energia mennyiségét (kvóta), illetve a kötelező átvétel időtartamát. Magyarországon a szélerőművekre vonatkozóan nem csak egy rendszerszintű kapacitáskorlát van (2010-ig 330 MW), hanem a már üzemelő berendezésekre termelési korlátot is előírnak. Egy évben egy szélerőmű a típusától függően a kötelező, támogatott árú átvétel keretében az engedélyben meghatározott mennyiségű villamos energiát adhat hálózatra. Az igénybe vett támo-



2.24. ábra. Szélörművek által termelt villamos energia Magyarországon 2006 végéig



2.25. ábra. A szélenergiából termelt villamos energia aránya tízezrelékben Dániában, Németországban és Spanyolországban (EUROSTAT, 2007)



2.26. ábra. Beépített szélenergia kapacitás alakulása Magyarországon 2007 végéig



2.27. ábra. Szélérőművek, szélparkok elhelyezkedése Magyarországon

gatások függvényében, pedig a kötelező támogatott árú átvétel időtartamát csökkentették (Újronafő, Vép).

A befektetői igényeket jól mutatja, hogy 2006-ben összesen 132 db engedélykérelmet bírált el a MEH 1787 MW kapacitással, amelyből 49 db projekt volt sikeres a 2006-ig létesült erőművekkel együtt! A 330 MW-nyi szél erőmű összesen 717GWh villamos energiát adhat kötelező támogatott árú átvétel keretében hálózatra a jövőben (Ábrahám et al., 2007).

Magyarországon szélenergiát nem csak hálózatra csatlakozó, ipari méretű szél erőművekkel lehet hasznosítani. Hazánkban gyártanak és forgalmaznak néhány W - néhány kW névleges teljesítményű szélgenerátorokat, szél erőgépeket, amelyek háztartások villamos energiaigényét képesek kiegészíteni. Magyarországon a tanyavillamosítás lehetséges eszközei a nap-, és szélenergiát hasznosító hibrid rendszerek, amelyek hálózattól távol fekvő területeken szigetüzemben képesek komfortot biztosítani. A rendszerszintű és termelési korlátok mellett ezen a háztartási méretű szél erőgépek, szélgenerátorok létesítésére van esély a jövőben.

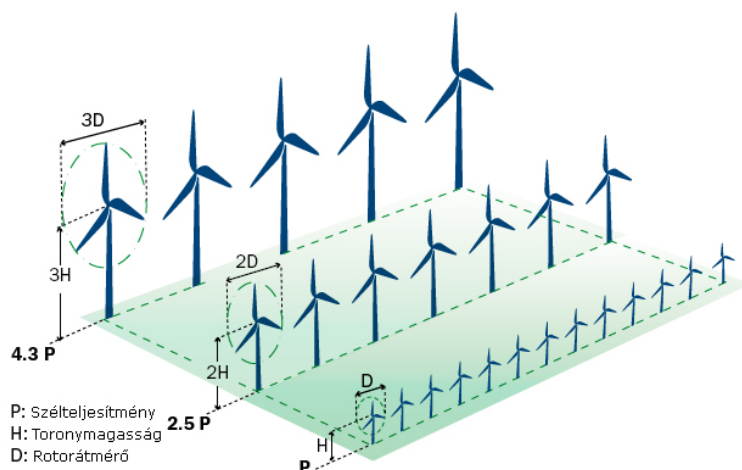
2.2.2. A szélenergia hasznosítás jövője

Az Európai Unió a világ legnagyobb energiaimportőre, hiszen energiaszükségletének alig felét termeli hazai forrásokból, másik felét EU-n kívüli országokból importálja. Az energiafogyasztási előrejelzések szerint a világ energia felhasználása évente 1-2 %-kal fog növekedni. Európában ugyan várhatóan lassabban, mint a fejlődő országokban, azonban előbb utóbb elkerülhetetlen, hogy versenyezni kell az energiaforrások megszerzéséért.

A kőolajpiac rendkívül érzékenyen reagál a világban zajló konfliktusokra, politikai instabilitásra különösen olyan területen, ahol a kitermelő infrastruktúra, illetve a hosszú távú kőolajtartalékok találhatók. Európa földgázzal történő biztonságos ellátásának megkönnyítéséhez milliárd eurós beruházások szükségesek, hiszen az elérhető készletek mellett az energiahordozó folyamatos, biztonságos tranzitja éppolyan fontos. Világszerte hatalmas, 220 évre elegendő szénkészletek állnak ugyan rendelkezésre, ezek azonban a hagyományos energia átalakítási technológiával történő felhasználás mellett jelentős szén-dioxid kibocsátást jelentenek. Léteznek már tiszta szén technológiák, azonban alkalmazásuk jelenleg még nagyon költséges. A nukleáris energia felhasználásának az előnyök mellett - nincs üvegházhatású gáz kibocsátás - hosszú évtizedekre meghatározó hátrányai vannak, - kis és közepes aktivitású hulladékok, kiégett fűtőelemek tárolása, biztonságos őrzése - mely révén számos európai országban nem kap elegendő társadalmi támogatást.

A megújuló energiaforrások népszerűek, Európa számos megújuló energia technológia terén úttörő és világszerte meghatározó szerepet tölt be. Elsősorban a szél-, napenergia, illetve a bio-üzemanyagok terén történtek jelentős beruházások, melyek hozzájárulnak az EU kiotói vállalásának teljesítéséhez, az európai emisszió-kereskedelem fejlődéséhez. A jelenlegi európai energiapolitikát és jövőre vonatkozó stratégiát sok fontos szempont mellett főként a klímaváltozás elleni küzdelem határozza meg, melyben komoly szerepet kaphat a szélenergia hasznosítása.

A szélenergia ipar optimista a szélenergia-potenciál jövőbeli meglétében, azaz ez alapján képes lesz 2020, 2030 időszakra vonatkozó célkitűzéseket teljesíteni, mint a-



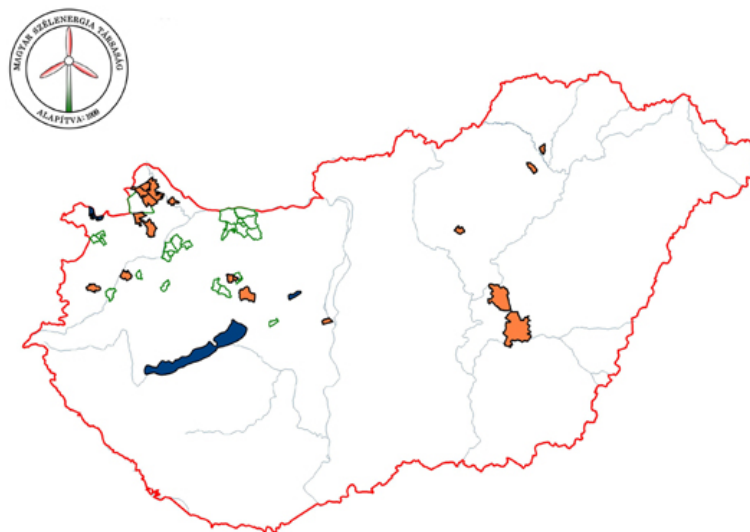
2.28. ábra. A szélérőművek méret növekedésének hatása a kinyerhető teljesítményre (TPWIND, 2006)

hogyan eddig is tette. Piaci elemzők szerint Európában a jelenlegi növekedési trend el fog maradni a világátlagtól a jövőben, azaz a fejlődés legfontosabb régióivá Ázsia és Amerika fog válni. Európában 2010-re közel 80 GW, 2020-ra 180 GW, míg 2030-ra 300 GW (EWEA, 2006; GWEC, 2007) összes szélenergia kapacitásra számítanak. A jövőre vonatkozó forgatókönyvek szerint a szél részesedése az elektromos áram termelésében markánsan nőhet, 2010-re meghaladhatja az 5%-ot, 2020-ra 13,4%-ot, míg 2030-ra elérheti akár a 22%-ot is. Ekkora nagyságrend közel 300 GW szélérőmű kapacitásból származhatna. Ez azonban nem feltétlenül jelenti azt, hogy minden talpalatnyi területre szélérőmű parkokat kellene építeni.

Az elmúlt két évtizedben nem csak a szélenergia piac, hanem az alkalmazott technológia is rendkívül sokat fejlődött (2.28 ábra). A jelenlegi szélérőművek már közel 180-szor több energiát képesek termelni fele akkora fajlagos költséggel, mint 20 évvel ezelőtti elődeik. Az átlagos turbinaméret 2004-ben 1,3 MW volt onshore, míg 2,1 MW offshore telepítések esetén. 2006-ban már megközelítette a 2 MW-ot a szárazföldre telepített szélérőművek átlagos névleges teljesítménye Európában. Elkészült az első 5 MW-os szélérőmű beruházás, amely nagyon fontos lépés az offshore piac jövőbeli fejlődése szempontjából.

2005-ben 83 TWh villamosenergia-termelés 40,5GW szélérőmű kapacitásból származott Európában, és ezt 47 000 darab szélérőmű termelte. A 300 GW célkitűzés 75 000 darab átlagosan 2 MW teljesítményű onshore berendezésekkel, míg 15 000 db átlagosan 10 MW teljesítményű offshore szélérőművel érhető el (TPWIND, 2006). Azaz a folyamatosan növekvő névleges teljesítmények miatt a jelenleg üzemelő szélérőművek kétszerese képes lehet 20-szor több villamosenergia-termelésre 2030-ra.

A jövőre vonatkozó trendek becslésekor természetesen figyelembe kell venni, hogy az ipari méretű szélérőművek átlagos kapacitás kihasználtsági tényezője a hagyományos erőműtípushoz hasonlítva alacsony. Telepítési helyszíntől és széljárástól függően 17-45% (IEA, 2005).



2.29. ábra. Működő és 2010-ig tervezett, MEH engedéllyel rendelkező szélprojektek földrajzi eloszlása Magyarországon

Az ambiciózus célkitűzések eléréséhez várhatóan a dinamikus technológiai fejlődés mellett a kontinens területének már közel 1%-a elegendő lesz a tervek megvalósításához. 2030-ig nagyon komoly szerepet szánunk a ma még nagyon kis szegmenst képviselő offshore szélenergia piacnak. A nagy teljesítményű turbinafejlesztés gyakorlatilag az offshore piac fejlődését alapozza meg. Számos kérdés nem teljesen megoldott ezen a téren, azonban egy dolog világos, a költségeket mérsékelni kell a jövőben. Természetesen a technológiai fejlesztések elkerülhetetlenek, hogy a kívánt teljesítménynövelést meg lehessen valósítani. Ilyen módon 2020-ra egyedül a szélenergia révén annyi üveg-házhatású gáz emisszió kerülhet kiváltásra, mint az EU kiotói vállalásának 1/3-a.

Az európai megújuló energiapiac és ezen belül a szélenergia további fejlődésének záloga lehet, hogy az Európai Unió kiemelt prioritásként kezeli a megújuló energiaforrások egyre nagyobb arányú hasznosítását. Ezt a folyamatot erősítheti az az intenzív kutatás- fejlesztés a világban, amely a villamos energia tárolhatósága problémakörében folyik.

Magyarországon a jelenlegi körülmények között 2010-ig 330 MW szélerőmű kapacitás csatlakozhat hálózatra és ez várhatóan meg is fog valósulni (2.29 ábra). A szélenergia hasznosítása már most igen részletesen szabályozott területté vált, amelyben a hálózatra csatlakozó erőművek számára a lehetőségek igen korlátozottak. A jövőben a magyar villamosenergia-rendszer fejlesztésével, határt keresztező kapacitások bővülésével, megfelelő szabályozási tartalékok képzésével és ezáltal a keretfeltételek enyhülésével számolunk.

Három feltételezéssel éltünk a jövőre vonatkozó becslések során (2.5 táblázat).

A pesszimista verzió esetén a szélerőművek létesítésének jelenlegi korlátozása nem fog változni hosszú évtizedeken át. Ebben az esetben a már kiadott engedélyekhez meghatározott üzemeltetési időt vettük figyelembe. Így 2030-ban már több jelenleg

2.5. táblázat. Installált szél erőmű kapacitás várható alakulása 2030-ig Magyarországon

	Pesszimista jövő	Mérsékelt becslés	Optimista jövő
2010	250 MW	325 MW	330 MW
2015	330 MW	450 MW	500 MW
2020	330 MW	850 MW	900 MW
2030	265 MW	900 MW	1000 MW

működő szél erőművet le kell szerelni, hiszen működési engedélyük le fog járni, másrészt az eltelt idő megközelíti a szél erőmű élettartamát. Ebben a forgatókönyvben még azzal sem számoltunk, hogy az üzemeltetők élnek a "repowering" lehetőségével, azaz a szél erőműveket nem cserélik le idő előtt modernebb típusra.

A mérsékelt és az optimista becslés 2010 után számol jelentős fejlődéssel, azaz a jelenlegi korlátok enyhülésével, megszűnésével. A mérsékelt becslés a rendszerirányító közép- és hosszú távú kapacitásterveiben megjelenő tervezett szél erőműkapacitás. Az optimista becslés, pedig a már most kirajzolódó befektetői igények teljes megvalósíthatóságát vetíti előre. Természetesen ennek a variációnak a megvalósulására van a legkisebb esély, hiszen ehhez kell a legtöbb feltételnek a lehető legjobban alakulni.

A szélenergia hasznosítás jövőbeli fejlődésének lehetőségeit Magyarországon a villamosenergia-rendszer műszaki fejlesztései mellett elsősorban a politikai akarat, az elfogadásra kerülő energiastratégia és a célokhoz rendelt ösztönzők fogják leginkább meghatározni. Mindenesetre a technológia fejlődése és a fajlagos költségek csökkentése várható közép és hosszú távon, illetve arra számítottunk, hogy a szélenergia beruházások a jövőben is nagy társadalmi támogatottságot fognak élvezni.

2.3. Szélklimatológiai vizsgálatok

A szélklimatológiai munkák két csoportjáról kívánunk szólni ezen a helyen, mégpedig egyrészt a szélenergia hasznosítás szempontjából világszerte végzett vizsgálatok módszereiről, eredményeiről, illetve a magyarországi szélviszonyok és szélpotenciál felmérésével kapcsolatos kutatási eredményekről.

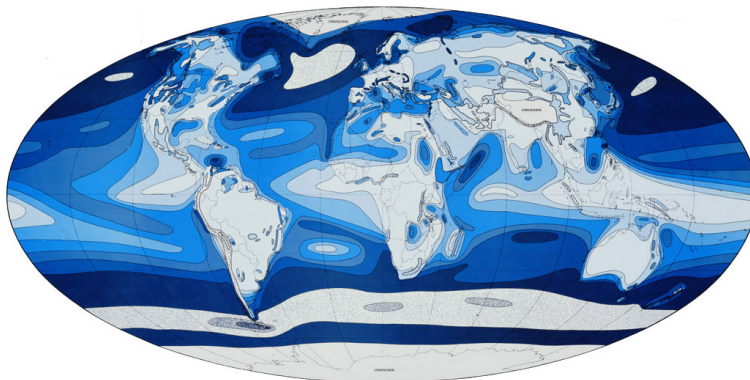
2.3.1. Szélklimatológiai vizsgálatok világszerte

A világ szélerő készleteinek feltárása a szélenergiát hasznosítani képes technológia fejlődésével párhuzamosan vált fontos kutatási területté. A szélenergia hasznosításának elterjedését mai napig befolyásolja a kihasználható potenciál kellő mélységű feltártsága. Számos módszer létezik egy-egy terület szélenergia-potenciáljának felmérésére. Általában felszíni szélsébség megfigyelések adataiból indulnak ki, amelyet vagy önállóan kezelnek, vagy különböző felszíni paraméterek (domborzat, érdesség, akadályok) ismeretében terjesztenek ki horizontálisan, olyan térségekre, ahonnan konkrét mérés nem áll rendelkezésre, illetve vertikálisan a turbina tengelymagasságára. A másik megközelítés, ha nagytérségű modellezett szélsébség adatokból indulnak ki és mezoskálájú modellek segítségével tárják fel egy kisebb régió szélenergia potenciálját. A kapott eredmények mindig függenek az alkalmazott mérési eljárásoktól, a modellezéshez használt módszerektől, és természetesen a választott időszaktól.

Az USA-ban a mai Nemzeti Megújuló Energia Laboratórium (NREL) elődje az USA-DOE 1985-ben készített olyan energetikai széltérképet, amely a Föld egészét ábrázolta (2.30). A térkép elkészítéséhez 1980-ban világszerte meteorológiai állomásokon mért szélsébség adatokat használtak, melyeket egyszerű hatványkitevős formulával (2.2) számítottak át 50 m magasságra. A α kitevő értéke $1/7$ volt. A szélsébség adatokat Rayleigh szélsébség eloszlás segítségével teljesítménnyé konvertálták, és 10 kategóriát különítettek el. Főként a sarkvidéki és összetett domborzatú térségek ezen a térképen még feltáratlanok. A vizsgálat kimutatta, hogy az USA hatalmas szélerőkészlettel rendelkezik, bár megjegyezték, hogy a meteorológiai állomásokon mért felszíni szélsébség adatok valószínűleg alulbecslik a valóságot, hiszen a Föld nagyrésze az osztályozás 1. kategóriájába, a hasznosításra alkalmatlan területek kategóriájába tartozott.

Az USA szélenergia térképét a fenti munkához kapcsolódóan 1980-ban publikálták 12 regionális felmérés szintéziseként, melyet 1985-ben több államban újabb mérési eredményekkel pontosítottak és hoztak újra nyilvánosságra (Elliott et al., 1986). A térképes ábrázoláshoz 7 szélenergia-osztályt különítettek el, amelyek közül a 3.-7. kategóriát ajánlották mindenképpen hasznosításra érdemesnek (2.6 táblázat). Ez az szélenergia osztályozási mód azóta is világszerte elterjedt. A hatalmas kutatás eredményeként létrehozott szélenergia térkép éves átlagban (2.31 ábra) és évszakonként mutatja be az ipari méretű hasznosításra alkalmas területeket. Az összetett domborzatú térségek szélviszonyai ezen a térképen is elég nagy bizonytalansággal jelennek meg.

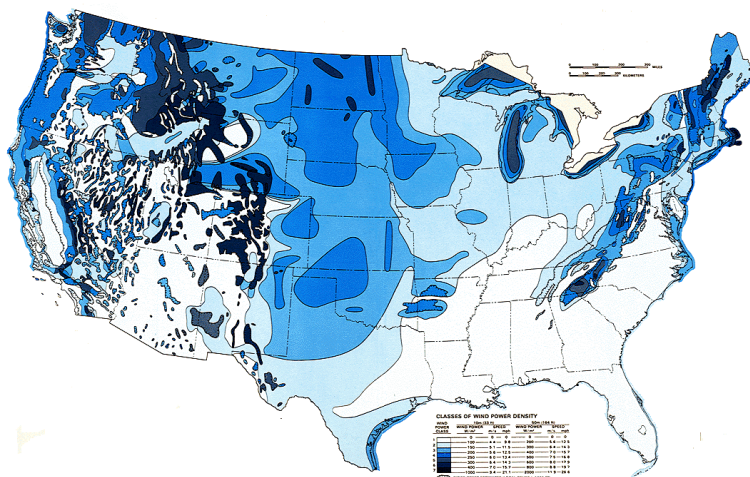
A nyolcvanas években az akkori Európai Közösség tagországaiban, 12 nyugat-európai országban történt egységes szélenergia potenciál felmérés, amelynek eredményei az európai szélatlásban kerültek napvilágra (Troen and Petersen, 1989). A



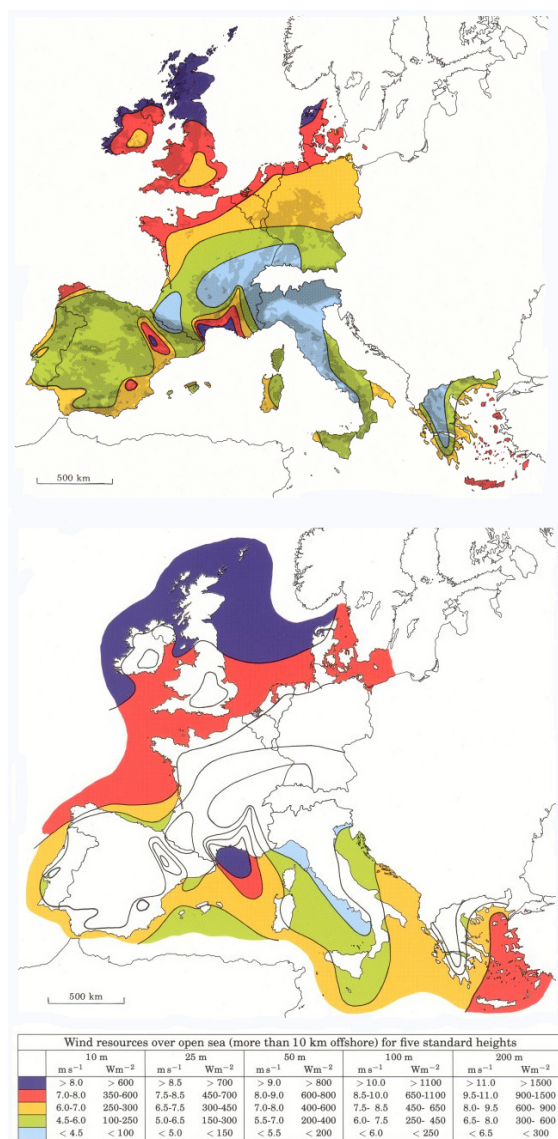
2.30. ábra. A szélenergia eloszlása a Földön 1980-ban (US-DOE and NREL, 1985).

2.6. táblázat. Az USA-ban alkalmazott szélenergia osztályok (Elliott et al., 1986)

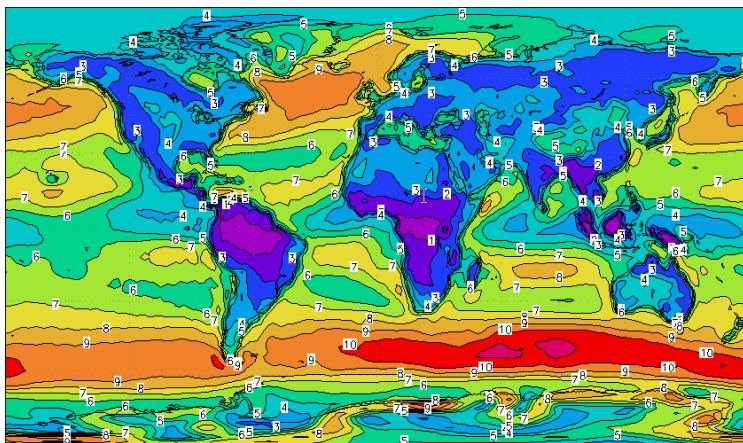
Szélenergia	10 m		30 m		50 m	
osztályok	W/m^2	m/s	W/m^2	m/s	W/m^2	m/s
1	0-100	0-4.4	0-160	0-5.1	0-200	0-5.6
2	100-150	4.4-5.1	160-240	5.1-5.9	200-300	5.6-6.4
3	150-200	5.1-5.6	240-320	5.9-6.5	300-400	6.4-7.0
4	200-250	5.6-6.0	320-400	6.5-7.0	400-500	7.0-7.5
5	250-300	6.0-6.4	400-480	7.0-7.4	500-600	7.5-8.0
6	300-400	6.4-7.0	480-640	7.4-8.2	600-800	8.0-8.8
7	400-1000	7.0-9.4	640-1600	8.2-11.0	800-2000	8.8-11.9



2.31. ábra. Az USA szélenergia térképe (Elliott et al., 1986)



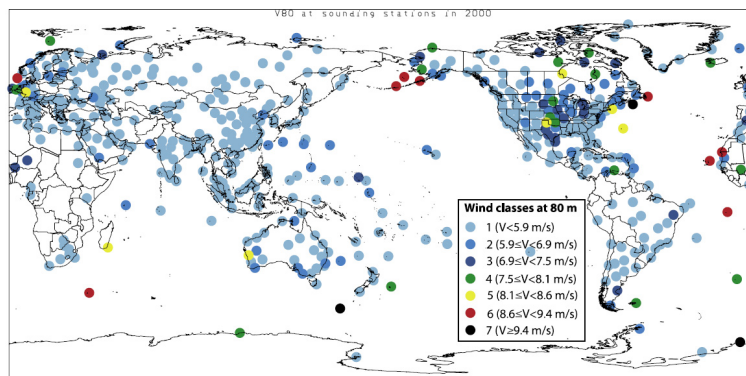
2.32. ábra. Európai szélenergia térkép (Troen and Petersen, 1989)



2.33. ábra. Átlagos szélesebesség 10 m magasságban NCEP / NCAR reanalízis 1976-95 közötti adatai alapján (www.windatlas.dk)

szélatlaszt nem csupán térképek gyűjteményének szánták. A felmérés során kidolgozásra került egy olyan módszert, amellyel egy helyszínen mért szélesebesség adatokat felhasználva becsülhetjük a környező régió szélviszonyait. A lineáris spektrális modellhez kifejlesztett számítógépes program a WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program). Jelenleg ez a modell az egyik legnépszerűbb a széleenergia potenciál felmérésekhez, mivel felhasználóbarát és körültekintő fizikai háttérrel alkalmaz (Verkaik and Smits, 2001). A WAsP modell alapvetően a mért szélesebesség adatok Weibull eloszlás paramétereinek szán kulcsszerepet, így a kimenő adatok sem idősorok, hanem a térségre jellemző ún. szélatlasz statisztikák. Körültekintő korrekciókat képes alkalmazni a mérőhely adottságainak megfelelően, így a környező akadályok árnyékoló hatását, domborzati és érdességi hatásokat figyelembe vevő almodellek futtathatók. Az érdesség hatásának kezeléséhez neutrális belső határréteg modellt (IBL) alkalmaz, amely limitáltan képes figyelembe venni gyakori érdesség változásokat. Stabilitási korrekciót az egész szélesebesség eloszlásra alkalmaz. A modell összetett domborzat esetén korlátozottan használható. Jelenlegi formájában kétféle adatforrást képes kezelni, egyrészt felszíni szélmérések adatait extrapolálja egy limitált területre, vagy globális modellek adatai alapján felszíni paraméterek ismeretében ad becslést a széleenergia potenciál térbeli eloszlására. Az ismert európai térkép 220 felszíni állomás adataiból készült, míg például Egyiptom széleenergia térképének elkészítéséhez már az NCEP / NCAR reanalízis adatait vették alapul. A globális léptékű áttekintésre az európai szélatlasz internetes oldala (www.windatlas.dk) is ennek a reanalízis modellnek 1976-95 közötti 10 m magasságra számított értékeit használja (2.33 ábra).

A dán fejlesztésű szélatlasz metodika alapján Dobesch and Kury (1997) készítette el a kelet - közép - európai országok néhány meteorológiai állomásának jellemzését. Ebben Magyarország mindössze 3 állomással szerepelt. Később hasonló módszert alkalmazva Kovács (1996), majd Kirsi (2001) készített néhány állomás 5 éves 1991-95 között mért óránkénti szélesebesség adataiból kiegészítést. Komplex formában 29



2.34. ábra. Szélerőpotenciál 80 m magasságban 2000-ben mért adatok alapján (Archer and Jacobson, 2005)

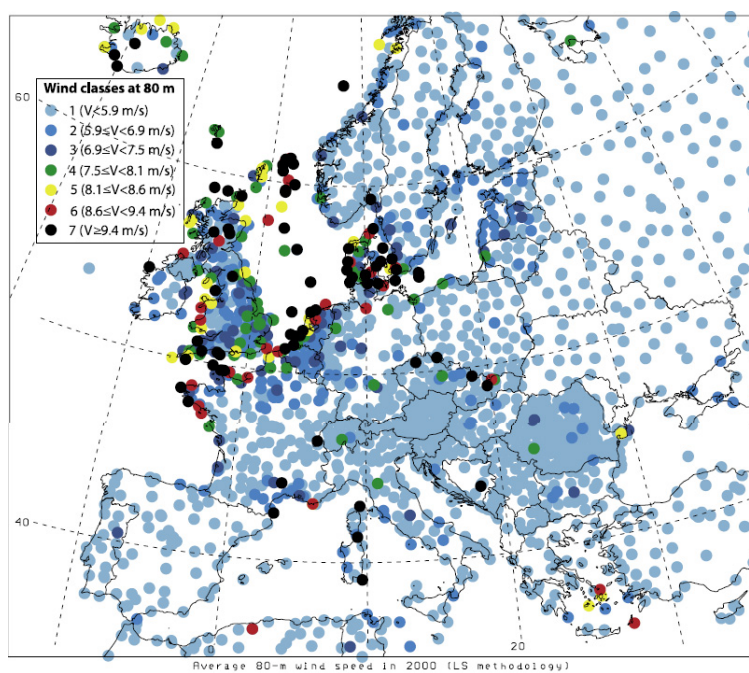
magyarországi felszíni meteorológiai állomás adatai alapján Radics (2004) állított elő szélerő potenciál térképet a WAsP által használt metodikával.

Az eddigi nagy térségre vonatkozó tudományos feldolgozások sorában egyedülálló a Archer and Jacobson (2005) által készített globális széltérkép (2.34 ábra).

Az áttekintő térkép a világméretű meteorológiai megfigyelő hálózat közel 8000 felszíni állomásának 2000-re vonatkozó órás szélerő adatai alapján készült. Archer and Jacobson (2005) úgynevezett legkisebb négyzetek (LS) extrapolációs technikát alkalmazva számították át az általában 10 m magasságban rendelkezésre álló szélerő adatait. A módszert a floridai Kennedy Space Centerhez tartozó szélmegfigyelő toronyhálózat mérési adatai alapján tesztelték. A szélerőpotenciál számításához egy fiktív, 80 m magas, 77 m rotorátmérőjű, 1500 kW névleges teljesítményű szélerőmű adatai használtak. Megállapították, hogy a vizsgált állomások 13%-án 80 m magasságban nagyobb a szélerő 6,9 m/s-nál éves átlagban. Véleményük szerint a szárazföldek felett 80 m magasságban nappal nagyobb a szélerő és nem éjszaka és ez csupán 120 m feletti magasságban fordul meg.

A kontinensek közül az európai vizsgálatok eredményét mutatjuk be (2.35 ábra), hiszen egyrészt ezen a kontinensen volt a legnagyobb a megfigyelő állomások sűrűsége, másrészt a szerzők az Északi - tenger térségében, Nyugat - Európában kiemelkedően magas szélerőpotenciált mutattak ki. Itt a vizsgált állomások több, mint 14%-át sorolták 3., vagy nagyobb kategóriába. Meglepően Csehországban és Szlovákiában találtak 7. kategóriában tartozó állomásokat, míg a szélerőhasznosításban előretörő Ausztriában egyetlen helyen sem. Végeredményben a Földön a 2000 évi adatsorok alapján 72 TW, azaz $6,27 \cdot 10^{14} \text{ kWh}$ becsülték a technikailag hasznosítható szélerőpotenciált. A fentiekből is látszik, hogy létezik néhány olyan szélerőklímológiai felmérés, amely a szél energetikai hasznosításának elősegítése céljaihoz készült.

Az éghajlatváltozás probléma körének előtérbe kerülésével természetesen felmerül, hogy lehetséges cirkulációs változások is bekövetkezhetnek, amelyek érinthetik egy-egy térség szélerő kincsének alakulását. A légköri és óceáni cirkulációs változások igen szoros kapcsolatban állnak az éghajlat megfigyelhető változékonyságával,



2.35. ábra. Az európai megfigyelő állomások szélenergia osztályai 80 m magasságban 2000-ben mért adatok alapján (Archer and Jacobson, 2005)

hiszen ezen folyamatok révén fordul elő az, hogy globális átlagban ugyan emelkedik az óceánok felszínének hőmérséklete, mégis néhány helyen éppen lehűlést tapasztalnak. A globális vizsgálatok általában reanalízis adatbázisok hosszútávú adatait használják az elemzéshez. Ilyen jellegű vizsgálatok eredményeit foglal össze az elmúlt évben nyilvánosságra hozott IPCC-AR4, azaz a Éghajlatváltozási Kormányközi Testület legutóbbi, 4. értékelő jelentése (Trenberth et al., 2007). A vizsgálatok leginkább a hőmérséklet változás révén módosuló nyomási gradiens változásaira (Schönwiese et al., 1994; Bartzokas and Metaxas, 1996; Trenberth et al. 2007), a mérsékelt övi ciklonok pályájának módosulására koncentrálnak (Bartholy et al., 2006), illetve az anyagi kárt okozó extrém viharok számának változásával kapcsolatban jön szóba a szél sebességének változása (Fischer-Bruns et al., 2005; Smits et al., 2005; Weisse et al., 2005).

Trenberth et al. (2007) szerint a téli hónapokban (DJF) a átlagos tengersizinti légnyomás (MSLP) 1948-2005 között nőtt az Észak-Atlanti térség szubtrópusi régióban, Dél-Európában, míg Arktiszon, illetve Szibériában gyengült. Ebben az évszakban (DJF) nőtt a közepes szélességeken a MSLP gradiense, amely a nyugatias cirkuláció megfigyelhető erősödésével jár. A téli féléves változás mindkét féltekén az NCEP / NCAR és az ERA-40 reanalízisok adatai alapján is bizonyítható. Az AR4 (Trenberth et al., 2007) szerint erősödnek és egyúttal a sarkok irányába tolódnak az északi félgömbön a téli viharciklonoknak a pályái különösen a XX. század második felében.

Végül az egyik legfontosabb eredmény, hogy nem mutatható ki semmilyen globális átlagos szignifikáns trend a szélesebbesség változásában, különösen a tengerek felett, noha egyes térségekben tapasztalható szélerősödés, vagy gyengülés.

2.3.2. Magyarországi szélklimatológiai vizsgálatok

A legelső tudományos klimatológiai vizsgálatokat ebben a témakörben Hegyfokya Kabos végezte 1894-1913 között (Hegyfokya, 1894, 1904, 1913), közel 20 éven át, amikor 216 meteorológiai obszervatórium adatai alapján vizsgálta a szélirány és -sebesség eloszlását az akkori országban. Megállapította, hogy a szél a hegyvidéki területeinkről a síkság felé tart, a medence középpontja fele, ahol légnyomási minimum rajzolódik ki. A legszelesebb tája az országnak szerinte a Felső-Tisza vidéke (Kovács, 1996). Úttörő munkája vitathatatlan, de magyarázatait, megállapításait az őt követő klimatológus nemzedék bírálattal illette (Bacsó et al., 1953).

Réthly 1938-ban írt hazánk szélrendszeréről, a szélirány és a szélesebesség napi menetéről (Réthly, 1938). Az ország területén szerinte az átlagos sebesség 3-4 m/s és mivel a szélesebessége növekszik a magassággal a legélénkebb széljárású területnek hegyvidékeinket, azon belül a Kékestetőt tartotta ().

Kakas (1947; 1952) 13 hazai repülőtér szélirány és szélesebesség gyakorsági eloszlását készítette el évszakos különbségeket is vizsgálva. Megállapította a szélirányok domborzattól való függését, ugyanakkor cáfolta, hogy az Alföld és a környező hegyvidékek között hegy - völgyi szélhez hasonló, termikus okokra visszavezethető légáramlás lenne, mivel nem mutatható ki évszakos szélfordulás.

Az ötvenes évek elején íródott (Bacsó et al., 1953) Magyarország éghajlatát bemutató könyv szélel foglalkozó fejezete alapműnek tekinthető ebben a témakörben, hiszen az ezt követően megjelent egyetemi (Dobosi and Felméry, 1994; Péczely, 1979; ; Justyák, 1998; ; Szász and Tókei, 1997; ; Bartholy and Weidinger, 2002), főiskolai tankönyvek (Frisnyák, 1975) azóta is ennek ábráit és megállapításait használják.

Szabó (1960) 1954-1957 közötti szélesebesség adatokat elemezte 11 meteorológiai állomás esetén. Legszelesebb állomásnak Siófok és Szombathely bizonyult, a Mátrai Erőműnél mért legkisebb szélesebességátlagot rossz műszer elhelyezésnek tulajdonította. Vizsgálta a viharos napok számát, évszakos eloszlását, illetve a viharos szelek irányát. Megállapította, hogy viharos szelek leginkább tavaszi hónapokban fújnak és az év során a legtöbb állomáson tapasztalható egy másodmaximum. A viharos szelek Szombathelyen és Pécsen északi irányúak, míg az ország nagy részén északnyugati irányúak. Debrecen kivétel, ahol a viharos szelek leginkább déli irányból érkeznek.

Szucsák (1972) 1959-68 közötti napi maximális szélirány, -erősség, és napi átlagos szélesebesség adatsorokat elemzett Budapest és Szombathely esetén. Megrajzolta a napi átlag és maximális szélesebesség tapasztalati eloszlásfüggvényét.

Öt alföldi állomás (Kisvárdá, Debrecen, Békéscsaba, Szeged, Kecskemét) 1968-72 közötti napi maximális széllökések erősségét, irányát és bekövetkezésének időpontját tanulmányozta évente és évszakonként (Barta, 1984; Tar and Barta, 1985). Elemezte a szeles (>10 m/s) és a viharos (>15 m/s) napok gyakorisági eloszlását makroszinoptikus helyzetenként.

Kircsi et al. (2000) 11 magyarországi szinoptikus állomás 1968-72 és 1991-95 közötti napi maximális széllökések statisztikus - klimatológiai vizsgálata alapján megállapította, hogy a Péczely-féle mCc, zC és C centrum helyzetekben, illetve a Hess - Brezowsky helyzetekből a meridionális N és a kevert NW áramlási irányú helyzetek fennállásakor legerősebbek a széllökések. A napi legnagyobb széllökések sebessége átlagosan háromszorosa a napi átlagos szélesebességnek (Kircsi, 2003). A maximális széllökés

sebességének és ugyanazon időtartam alatt átlagolt szélesebbesség hányadosa Wieringa (1976, 1983, 1986) szerint szoros összefüggésben van a megfigyelőhely környezetének érdekességi viszonyaival. A széllelkések iránya egyrészt a környező érdekességi elemek függvénye, másrészt a nagytérségű időjárási rendszerekhez kapcsolódnak (Péczely, 1957). Magyarországi vizsgálatok (Kircsi, 2004) szerint a napi legnagyobb széllelkések télen és a tavaszi hónapokban jellemzőek a síkvidéki állomásokon nappal, főként a déli órákban, míg a hegyvidéki állomásokon éjszaka, még éjfél előtti időpontokban.

Szabóné (1962) készítette el 49 állomás adataiból a szélirány-gyakoriságok 30 éves átlagait az 1921-től 1950-ig terjedő időszakra, azonban eredményei nem tértek el lényegesen a Bacsó et al. (1953) által közöltektől. Talán nem véletlenül, hiszen a szélirányok rendszere erősen függ a cseppet sem változékony természetű domborzati adottságoktól.

A nyugati szelek övében foglalunk helyet, hozzánk is ebből az irányból érkeznek elsősorban ciklonok. A nyugati alapáramlást az Alpok és a Kárpátok vonulatai, így a hegységeink helyzete módosítja. Végeredményben a dévényi kapun érkező szél a Kisalföldön és a Dunántúlon északi, északnyugati, míg a Keleti - Beszkideken át érkező levegő a Tiszántúlon északkeleti irányból tart a medence belseje fele. A Dél-Alföldön megfigyelhető délies légmozgások gyakran a Genovai-öböl térségéből érkező ciklonoknak köszönhető. "Összességében hazánk szélirány-eloszlási képe e két szélcsoport együttes, nagyrészt egyidejű légáramlás-szövevényéből alakul ki, s ami ezt egységes, uralkodó szélirányokká alakítja, az a Kárpát-medence domborzata" (Bacsó et al., 1953).

A hazai helyi szelek nagyobb tavainkhoz (pl. Balaton térségében kimutatható tavi szél), illetve domborzati okokból jönnek létre (pl. Várkonyi szél, Kassai szél, Kosava).

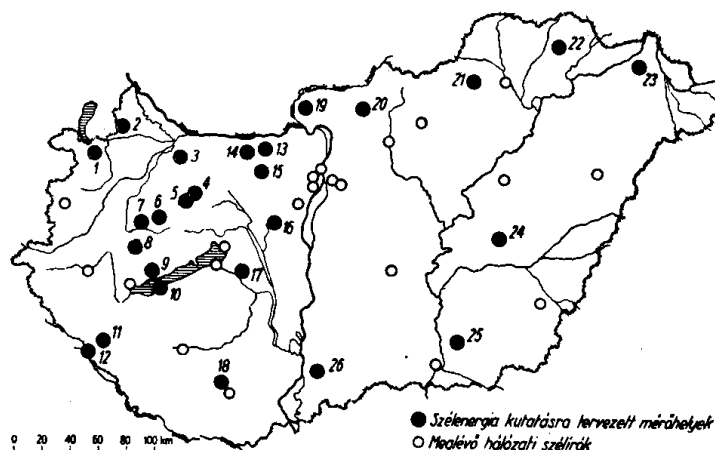
A szélesebbesség sajátos évi menetét Péczely (1961) a különböző makroszinoptikus helyzetek évi menetével magyarázta, azaz a szélerősség tavaszi maximuma a ciklontevékenység megélénkülésével van kapcsolatban. A szélesebbesség napi menete pedig a helyi, konvektív eredetű légkörzésből származtatható, távolabbról a Nap járásával van összefüggésben.

A szélesebbesség alapján az ország északnyugati, a Dunántúl északi része a leg-erősebben szeles terület, míg a Dunántúl délnyugati területei, illetve az ország északi, északkeleti térségei a gyenge légmozgásokkal jellemezhető (Radics and Bartholy, 2002).

2.3.3. Magyarország széleenergia potenciálja

Az ország széleenergia készleteinek bizonyos mértékű feltárása a '30-as évek elején indult meg a budapesti József Műegyetem Mezőgazdasági és Géptani Tanszékének kutatásának keretében (Szokol, 1964). A szélmerések Orosházán, Balatonföldváron és Kékestetőn zajlottak (Ledács Kiss, 1955). Sajnálatos módon a II. világháború véget vetett az itt folyó munkának és komoly veszteséget okozott a dokumentáció terén. Végeredményben azóta a mérőműszerek és a mérőhelyek megválasztása miatt kritizált méréssorozat negatív eredménnyel zárult. Orosházán az átlagos szélesebbesség 3,8 m/s, Balatonföldváron 4,7 m/s, míg Kékestetőn 6 m/s-nak adódott a talajszint-jétől kis magasságban mérve, azonban ezeket az értékeket nem találták kielégítőnek (Ledács Kiss, 1955).

Ezt követően újra és újra felmerült ez a téma, mivel többen úgy gondolták ennnyi



2.36. ábra. A szélerő kutatására alkalmas lehetséges helyszínek Magyarországon (Kakas and Mezősi, 1956)

vizsgálat alapján nem lehet eldönteni a kérdést. A témával foglalkozó meteorológusok hamar felismerték, hogy a levegő energiataralmának megítéléséhez nem elegendők a szélerő átlagok, hanem ismerni kell annak négyzetes és köbös változatát is (Aujesky, 1951). Czelnai (1953) tanulmányában rámutatott, hogy energetikai célú vizsgálatoknál a szélerő és szélirányeloszlás mellett a szél függőleges eloszlása is lényeges, illetve nagyobb magasságokban is mérni szükséges. Külföldi tapasztalatok alapján Tiszaörs két éves adatsorát elemezte és a szélerő súlyozott köbös átlagát javasolta a szélerő-viszonyok jellemzésére. Az ötvenes évek elején első volt azok között, akik energetikai célból indítottak volna több szinten szélméréseket, mivel nem tartotta elegendő információnak az éghajlatkutató állomásokon 10 m-en mért adatokat. Ő mindenesetre Mosonmagyaróvár térségét javasolta a mérések helyszínéül. Ezt a véleményt támogatta, sőt konkrét terveket dolgozott ki ilyen mérőhelyek felállítására (2.36 ábra) Kakas and Mezősi (1956). Munkájuk kitűnő összefoglalása az addigi kutatásoknak. Martonvásár - Erdőhátpusztai méréseik (átlagos szélerő 3,5 m/s volt) következtetése, hogy a lassújárású szélerőgépek a mi szélviszonyaink között is alkalmasak vízszivattyúzásra. Összességében optimista a szélerő hasznosítás terén, ezért sürgeti a további részletes klimatológiai feldolgozásokat. A szélerő tartamgyakorisága alapján meghatározták a várható elméleti szélerőteljesítményt kWh/m^2 -ben Budapest térségére.

A magyarországi szélerőhasznosítás lelkes támogatói sorában az ötvenes években jelent meg Ledács Kiss Aladár neve, aki műszaki végzettsége révén kellő szakértelemmel tanulmányozta a téma külföldi szakirodalmát. Tanulmányaiban (Ledács Kiss, 1955; Ledács Kiss, 1962b; Ledács Kiss, 1962a), előadásaiban korát megelőzve népszerűsítette a szélerő alkalmazását, komoly perspektívát látva abban hazai viszonyok között is. Ő vezetésével alakult meg az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesületen belül a Szélerő Munkabizottság, az 1954-ben Rio de Janeiróban ren-

dezett energetikai konferencia - ezen foglalkoztak először hivatalosan a szélenergia hasznosításával - inspirációja nyomán (Ledács Kiss, 1955). Tevékenységük eredményeképpen az Országos Meteorológiai Intézet újabb mérőhelyeit energetikai célú mérés szempontjából is megfelelően telepítette, sőt elkészült egy 200 kW-os szélerőmű tervtanulmánya, amely azonban végső soron mégsem valósulhatott meg.

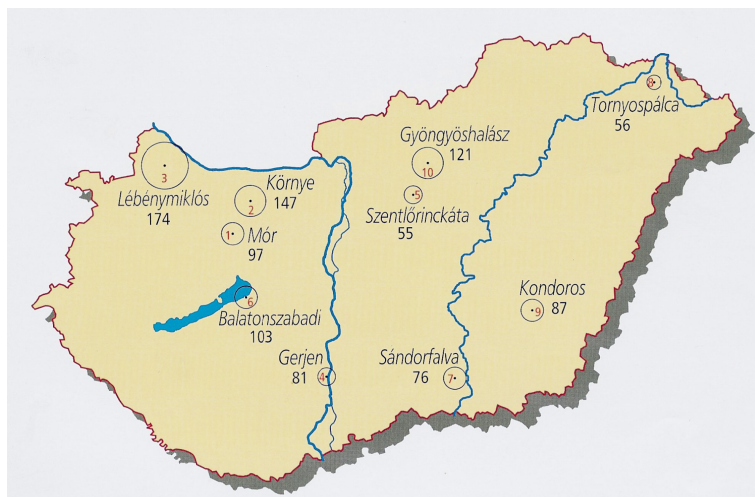
Szokol (1964) 10 állomás 30 év 262.000 órájának széladatát dolgozta fel a hasznosításra összpontosítva. Szerinte Budapest, Keszthely és Siófok közepes szélenergiával, míg a Mátra térsége a hegység szélárnyék hatása miatt nagyon kevés energiával rendelkezik. Hasznosításra alkalmasnak Szombathely környékét ítélte, itt is elsősorban kis teljesítményű gépek működtethetők, ezeket is rossz hatásokkal (Kovács, 1996).

Ledács Kiss a már említett ETE Szélenergia Munkabizottságának tagjai közreműködésével több tanulmányt készített a magyarországi lehetőségekről az OMSZ által rendelkezésre bocsátott szélstatistikák energetikai szempontú feldolgozásával. Első tanulmányuk 1976-77-ben készült, azonban hivatalosan csupán az 1980-82 időszakban átdolgozott II. tanulmányuk hozzáférhető (Ledács Kiss, 1982). Az OMSZ szélstatistikáin alapuló kiértékelés célja az volt, hogy meghatározzák az ország szélenergia hasznosításra alkalmas vidékeit. Elsősorban olyan megfigyelőhelyek adatait használták, amelyek síksági helyzetűek, illetve ahol a szélmérések elég nagy szabad magasságban történtek. Ily módon 1972-73 évre vonatkozóan Pápa - Kisacsád, Szombathely - Reptér, Szentgotthárd, Keszthely, Siófok, Iregszemcse, Pécs - Reptér, Debrecen - Reptér, Szeged - Reptér, Békéscsaba - Reptér; 1977-78 időszakra Budapest - Óbuda Mgtsz mérőhely, illetve Szarvason 1 éves, 1973-ra vonatkozó adatsorát elemezték. Az óránkénti értékeket 3 szélsébség kategóriába sorolták (meddő <8m/s; kihasználható 8-12 m/s; korlátozottan hasznosítható >12m/s), majd meghatározták gyakoriságukat, illetve a kategóriák energiartalmát. Végeredményként az adott év során hasznosítható szélenergia nagyságát kWh/m^2 -ben a szélmérések magasságában.

Legkedvezőbb megítélésük szerint a Kisalföld 200 m tengerszintfeletti magasságú területei, azaz főként déli területei, amely jellemzően $900kWh/m^2$ fajlagos szélteljesítménnyel rendelkeznek. A pápai és szombathelyi adatsorhoz hasonló kedvező értékeket nyertek a siófoki adatsorból, ezért a Balaton déli része is jó adottságokkal bíró terület, azonban a $840kWh/m^2$ potenciál csupán korlátozottan lehet érvényes, mivel a Siófoktól néhány kilométerrel délre fekvő Iregszemcse adatai messze elmaradtak a várakozásoktól. A Dunántúl déli részét és a Nagy-Alföldet $300 - 400kWh/m^2$ potenciális szélteljesítménnyel jellemezték, így álláspontjuk szerint ezekben a térségekben csak korlátozottan hasznosítható a szél energiája. A nagyjából 6 m szabad magasságban mért értékeket ezt követően műszaki gyakorlatban gyakran használt $v_2 = v_1 \cdot \sqrt[5]{\frac{h_2}{h_1}}$ összefüggéssel számították át nagyobb magasságokra, illetve 35%-os hatásokkal határozták meg a kinyerhető szélteljesítményt.

A tanulmány igen nagy alapossággal elemzi a rendelkezésre álló adatokat. Az OMSZ 1971-80 évekre meghatározott átlagos értékekkel is összevetik az 1972 és 1973 éveket és megállapítják, hogy a szélsébség értékekben $\pm 15\%$ -os eltéréssel lehet számolni. Összességében a szerzők hatalmas lehetőséget látnak a szélenergia magyarországi hasznosításában, és már akkor számos ötlettel oldanák meg az energiátárolás ismert problémakörét.

Komplex statisztikus szélklimatológiai elemzést adott Tar (1991) 13 magyarországi



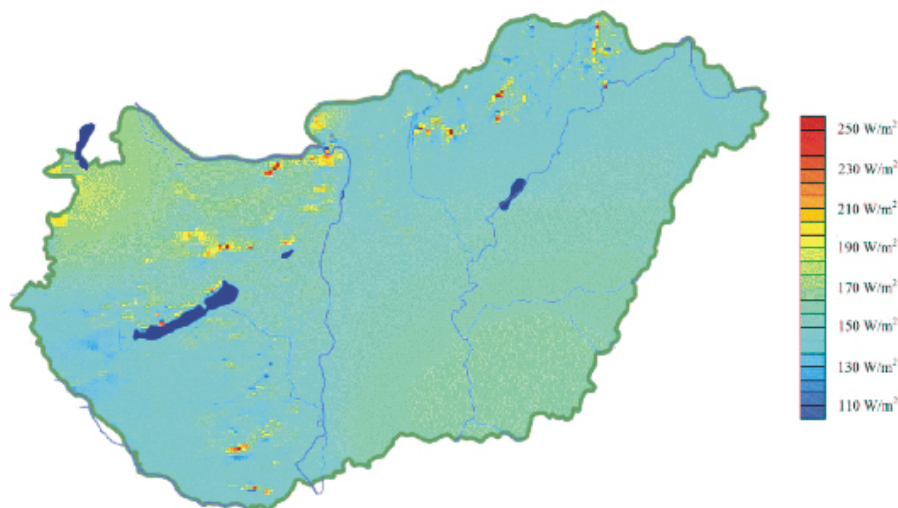
2.37. ábra. MVM Rt megbízásából végzett energetikai szélmérés helyszínei és eredményei (Kht, 2000)

állomás 5 éves, 1968-72 közötti adatsorából. Fontos kutatási területe a szélenergia statisztikus vizsgálata (1983), idő- és térbeli modellezése (1989). Későbbi munkáiban vizsgálta a szélesebbesség, a szélirány és a szélenergia kapcsolatát a makroszinoptikus helyzetekkel és a szél időbeli változását a globális felmelegedéssel összefüggésben (Tar, 1998a; Tar, 1998b; Tar et al., 2000; Tar et al., 2001), miközben bővítette az elemzésbe bevont állomások számát, illetve a vizsgált időtartam hosszát. Jelenleg különböző magasságban a rendelkezésre álló fajlagos szélteljesítmény napi menetét vizsgálja statisztikai módszerekkel, illetve elemzi a szeles napok és a szélenergia potenciál időjárási helyzetektől függő tulajdonságait (Tar, 2006a; Tar, 2006b; Tar, 2007; Tar, 2008).

Az ötvenes évek óta sürgetett energetikai szélmérés 1991 augusztusától valósult meg és egy évig tartott. Az ország 10 pontján (2.37 ábra) nagyfeszültségű távvezetéken 30 méter magasságban a MVM Rt. megbízásából készült adatgyűjtés (Kht, 2000). Az elkészült tanulmány a nagy teljesítményű szélgépek felállítási lehetőségeire koncentrált. A gazdaságossági számítások szerint tett megállapítás az volt, hogy nálunk nem kifizetődő nagy szélerőműveket építeni, ellenben kisebb teljesítményű szélerőgépek működtetéséhez az ország nyugati felén van elég potenciális szélteljesítmény.

A '90-es évek második felében Magyarország is megindult az érdeklődés a megújuló energiaforrások hasznosítása iránt. A szélenergiába befektetni szándékozók a várható nagy haszon reményében az ország különböző térségeiben energetikai szélmérésekre adtak megbízásokat, melyek gyakorlata kezdetben sok szempontból volt megkérdőjelezhető. Egyre nagyobb igény mutatkozott lokális szélenergiapotenciál felmérésére, jövőbeli szélerőmű parkok terveinek, engedélyezésének megalapozásához. Magyarországon több, mint 1000 MW névleges teljesítményű szélparkhoz készültek energetikai szélmérések, tanulmányok, hatásvizsgálatok.

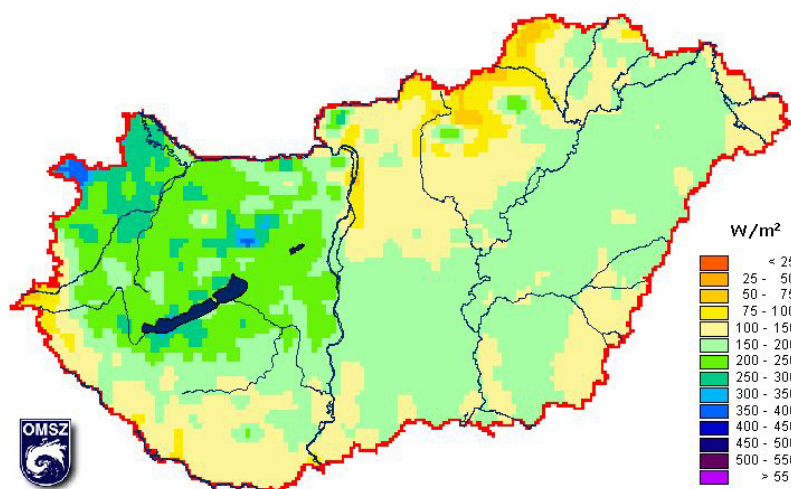
Európai ajánlásoknak megfelelő szélenergetikai vizsgálatokat Radics (2004) végzett



2.38. ábra. A domborzat áramlásmódosító hatásának figyelembevételével 80 m felszín feletti magasságra modellezett rendelkezésre álló szélenergia-mező (Radics, 2004).

29 magyarországi meteorológiai állomás 5-6 éves (1995 - 2000 között) adatai alapján a dán fejlesztésű Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP) segítségével. Elemzéseit Hegyhátsálon 1995 - 2002 között végzett 10 m, 48 m, 82 m, 115 m magasságban mért szélsébség adatok egészítették ki, melyek segítségével az empirikus szélprofil-formulák különböző hibáinak és a légköri stabilitási viszonyoknak a kapcsolatát elemezte (Bartholy and Radics, 2005). A szinoptikus meteorológiai állomások széladatainak elemzéséből megállapította, hogy 10 m magasságban Szentkirályszabadja a legszelesebb, míg Jósvalő a legkevésbé szeles. Hazánkban a legnagyobb átlagos éves energiát a 4-9 m/s-os szelek hordozzák (átlagosan 20-120 kWh/m²). A szélenergia hasznosítására leginkább alkalmas térség Magyarországon az északnyugati országrész, de a délkeleti területek is jelentős szélenergia-kincsrel rendelkeznek. Az ország regionális szélenergia-viszonyait finom felbontású térképek (2.38 ábra) segítségével mutatta be, melyek négy szinten (10 m-en, 40 m-en, 80 m-en és 120 m-en) ábrázolták a modellezett szélviszonyokat és a rendelkezésre álló szélteljesítmény mennyiségét.

Hazai szélenergia-potenciál felmérése egységes módszertannal az Országos Meteorológiai Szolgálat koordinálásával valósult meg 2005-ben (Wantuchné Dobi et al., 2005). A kutatáshoz felhasználták a hazai meteorológiai mérőhelyek rögzített adatait, a Szent István Egyetem kutatói által megbízásból készített 1-1 éves energetikai szél-mérések eredményeit (Tóth et al., 2006), illetve helyszíni mérések történtek az ország néhány pontján egy erre a célra beszerzett SODAR berendezéssel (Varga et al., 2006). A kutatás eredményeként elkészült egyrészt statisztikai módszerrel 600 x 900 m felbontással 10 m magasságra (Szentimrey et al., 2006), másrészt dinamikus leskalázási technikával 25 m, 50 m, 75 m, 100 m, 125 m, 150 m magasságra, 5 km x 5 km területegységekre vonatkozó potenciális fajlagos szélteljesítmény területi eloszlását bemutató



2.39. ábra. Fajlagos szélenergia potenciál Magyarországon 75m magasságban (Wan-tuchné Dobi et al., 2005)

térképlapok (Szépszó et al., 2006) (2.39 ábra).

Az országon belül jelentős különbségek vannak, azonban már 75 m magasságban az ország területének 43%-án eléri a gazdaságilag megfontolható 5,5 m/s éves átlagos értéket a szél sebessége (Hunyár et al., 2006). Nagyobb magasságokban a lehetőségek sokkal kecsegtetőbbek.

Az MTA Energetikai Bizottság Megújuló Energia Albizottság gondozásában 2006 nyarán megjelent "Magyarország megújuló energetikai potenciálja" című tanulmány egy fejezetben tárgyalja hazánk gyakorlati szempontból elérhetőnek tekinthető szélenergia potenciálját. A szélenergiát képviselő szerzők (Tar et al., 2006) munkájukban 60 m magasságban közel 20 TWh/év kinyerhető (>5.5 m/s szélsébség osztály esetén) potenciállal számoltak. Technikai korlátként egy 60 m tengelymagasságú, 50 m rotor átmérőjű 600 kW névleges teljesítményű szél-turbina lehetséges termelési adatait alkalmazták, de figyelembe vették a jogi, környezetvédelmi korlátozó tényezőket, illetve a park elhelyezés és hálózatra csatlakozás lehetséges veszteségeit is.

A számításoknál és így a rendelkezésre álló potenciálok meghatározásánál nagyon fontos szempont, hogy milyen magasságot veszünk figyelembe, milyen korlátozó tényezőkkel kalkulálunk, mely évek szélmérési adatainak átlagát vesszük alapul. A magyarországi szél-térkép készítésének munkálataihoz kapcsolódva hasonló módszerrel elkészült 75 m, 100m tengelymagasságú, illetve 75m és 100m rotorátmérőjű szél-erőműre modellezett technikai potenciál (Hunyár et al., 2006). 75 m magasságba 56,85 TWh/év, azaz 204,7 PJ/év szélenergia potenciál adódott, míg 100m magas és 100m rotorátmérőjű turbinákat használva 38%-kal nagyobb kinyerhető potenciált számítottak.

Össességében a fenti kutatások is azt bizonyítják, hogy objektívan van ipari méretű, villamos hálózatra csatlakozó szélérőművek számára is elérhető, gazdaságosan hasznosítható szélenergia potenciál Magyarország területén (2.39 ábra).

3. fejezet

Anyag és módszer

3.1. Nagytérségű szélklimatológiai vizsgálatok

A nagytérségű szélklimatológiai vizsgálatokhoz használt adatbázisunk a NCEP / NCAR reanalízis projekt 1956-2005 közötti 50 éves $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ fok felbontású északi negyedgömbre vonatkozó meridionális és zonális szélvektorok napi adatsora (Kalnay et al., 1996) volt, melyet kiegészítettünk a 2006-os mérési sorral. Az u és v szélvektorok a reanalízis előállításához használt modell legalsó, ún. 995 σ szigma szintre vonatkoznak. Ez a szint domborzatkövető, azaz orográfiai viszonyoktól függetlenül a talaj felszíne felett kb. 80 m magasság szélviszonyairól tájékoztat (Kalnay et al., 1996). A modell horizontális felbontása T62, azaz 2.5° meridionális és zonális irányban. Ez a Föld gömb alakjából következően az Egyenlítő felé egyre nagyobb területű grideket jelent, amelyek meridionális irányú oldalai kb. 280 km hosszúak. A reanalízis modell területi felbontása nem túl részletes, azonban az egész földgömbre vonatkozik. Másik előnye, hogy a modell 1948-tól napjainkig biztosít egységes módszerrel készített homogén adatsort, ismert rácshálózatra a légkör szinte minden paraméteréről 28 magassági szintben.

A reanalízis adatbázis és a naponta futó numerikus előrejelző modell kiinduló ún. "analízisének" alapja minden operatíván végzett földfelszíni, tengeri, magas légköri és műholdas mérés, amely egy módszertanilag változatlan, modern adatasszimilációs technikával kerül feldolgozásra. Az időjárás előrejelzéshez használt numerikus előrejelző modellek háromdimenziós térbeli rácson oldják meg a légköri folyamatokat közelítve leíró hidro- és termodinamikai egyenletrendszert (Szépszó et al., 2006) véges időtartamra. Az előrejelzések pontossága a kiinduló analízistől függ, ezért az adatasszimilációs technika tökéletesítése mindig igen fontos volt. A '90-es években ennek a technikának az alkalmazásával a múltbeli adatok újraanalizálása is megkezdődött. A reanalízis előállítása során a mérésekből származó mezőadatokat figyelembe véve pontosítják ugyanarra a napra, a Föld egészére készülő numerikus előrejelző modell eredményeit. A numerikus modell lehetővé teszi, hogy olyan területekről is van információ, ahonnan elvileg nagyon kevés eredeti mérés áll rendelkezésre. Az egységes adatasszimiláció miatt a nagy területre vonatkozó légköri adatok térben és időben homogének, míg gyakran a földfelszíni mérések gyakran önállóan egyáltalán nem, vagy

körülményesen homogenizálhatóak. A reanalízis adatbázisoknak azonban létezik egy időfüggő hibája, amely elsősorban abból ered, hogy a '70-es éveket megelőző idők-ből lényegesen kevesebb tényleges mérési adat áll rendelkezésre, amelyet nem lehet pótolni (Trenberth et al., 2007). A meteorológiai megfigyelő hálózatok '70-es éveket követő fejlesztése, illetve a műholdas mérések elindulása fontos mérföldnek tekinthetők a reanalízis adatbázisok pontosságát illetően is.

A Földön több numerikus előrejelző modellel és egyben szuperszámítógéppel rendelkező központ indított ún. reanalízis projektet. Európában az Európai Középtávú Előrejelző Központ (ECMWF) részletesebb, 1.8° pontosságú adatsora ERA-15 és ERA-40 néven ismert, az általuk előállított adatsorok hossza alapján. A magyarországi szélenergia potenciált feltáró munkának is az ERA-40 1992 - 2001 közötti adatsora nyújtott alapot (Szépszó et al., 2006), amelyhez a részletes szélmezőket a Magyarországon futó ALADIN modell segítségével, dinamikus leskálázással állították elő.

A reanalízisek nagy jelentőségűek éghajlati és egyéb modellezéssel kapcsolatos kutatások terén (Trenberth et al., 2007). A globális reanalízisek számos mezoskálájú modell (pl. MM5, WRF) kezdeti és peremfeltételeként használatosak, illetve gyakran alkalmazzák globális girkulációs modellek verifikációjára, hiszen a hasonló háromdimenziós rácsra vonatkozó adatokat egyszerűbb összevetni, mint a térben gyakran inhomogén eredeti felszíni mérősorokat. Az amerikai és az európai globális reanalízis adatai között az eltérő módszer és felbontás miatt van némi különbség, amely azt is okozhatja, hogy felszíni mérésekkel összehasonlítva hosszú időskálán ellentmondó következtetések vonhatóak le (Smits et al., 2005).

Azért választottuk mégis az amerikai National Center for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research (NCEP / NCAR) reanalízisét, mert zárt rendszeren kívül is hozzáférhető, illetve naponta operatíván frissül az amerikai szerveren. A napi u és v szélvektorokat évenként egy 73 oszlopból és 37x365 sorból álló mátrixban töltöttük le a Climate Research Unit (CRU) adatbázisából (Harris, 2006). Adataink a nyugati és keleti hosszúság -90° és 90° közötti, illetve az Északi-sark és az Egyenlítő közötti területre, összesen 2701 gridre vonatkozik. A felbontás léptéke miatt elemeztük a északi negyedgömböt, így hazánkon kívül a teljes európai kontinens és tágabb környezetének szélklímája összefüggéseiben tárgyalható és áttekinthető.

A szélklimatológiai elemzéshez a szélvektorokból (u , v) vektorszámítás szabályai szerint számított szélsébség adatokat használtuk fel (3.1), azaz a napi átlagos szélsébséget ($wspd$) m/s mértékegységben az alábbi képlettel határoztuk meg:

$$wspd[m/s] = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.1)$$

A napi adatsorokból állítottunk elő havi, évszakos, éves és sokéves átlagokat, melyeket felhasználva számítottunk szélindexeket.

Az 1956-2005 közötti 50 év idősorának vizsgálatához regresszió-analízist végeztünk. Az idő és a szélsébség változása között lineáris összefüggést feltételeztünk, ahol a X a független változó az idő, míg Y a függő változó az éves átlagos szélsébség volt. A regressziós koefficiens, azaz a meredekséget (b) az alábbi képlettel számítottuk:

$$b = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{\sum x_i^2}{n}} = \frac{SS_{XY}}{SS_X} \quad (3.2)$$

Az idősorra illesztett lineáris trendegyenes meredekségének (b) nullától való eltérését t-próbára visszavezetett vizsgálattal ellenőriztük (3.3, 3.4, 3.5).

$$t_s = \frac{b}{S_b} \quad (3.3)$$

$$S_b = \sqrt{\frac{S_{YX}^2}{SS_X}} \quad (3.4)$$

$$S_{YX}^2 = \frac{SS_Y - SS_{Y'}}{n-2} = \frac{\left(\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}\right) - \left(\frac{SS_{XY}^2}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}\right)}{n-2} \quad (3.5)$$

Végeredményben t_s (3.3) t-eloszlást követ $n-2$ szabadságfokkal, így ha t_s nagyobb, mint a t eloszlás táblázatában szereplő t értéke 0,05 valószínűség esetén, akkor számított egyenesünk meredeksége szignifikánsan eltért nullától (Précsényi et al., 2000).

Az északi negyedgömb mind a 2701 gridjének időbeli változékonyságának jellemzéséhez használtuk a variációs együtthatót (V_x), amely a minta szórását s_x a minta átlagához $\bar{x}$ viszonyítja:

$$V_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \quad (3.6)$$

A V_x mértékegység nélküli szám. Ha értéke $0 \leq V_x < 0.1$ közötti érték, a minta állandóságára következtethetünk, azaz a minta homogén. Ha értéke $0.1 \leq V_x < 0.3$ közé esik, a minta változékonny. A $V_x \geq 0.3$ értéknél a minta igen erősen változékonny, azaz erősen ingadozik.

A napi szélebbesség adatokból különböző időszakra átlagolt értékeket úgynevezett szélindexek [%] előállításához is felhasználtuk. A szélindex minden esetben úgy állítható elő, hogy az adott időpontban megfigyelt értéket egy sokéves átlaghoz viszonyítjuk. A sokéves átlag első lépésben mindenképpen a rendelkezésre álló 1956-2005 közötti 50 éves átlag volt ($wspd_{5605}$), így például egy adott grid 2006-os szélindexe az alábbi formulával számítható:

$$index_{2006} = \frac{wspd_{2006}}{wspd_{5605}} \quad (3.7)$$

Hasonló logikával készítettünk a hónapok és napok jellemzéséhez egy - egy szélindexet.

Európában több országban is használnak a gyakorlatban ún. szélenergia indexet az egyes hónapok és évek jellemzéséhez, azonban a legtöbb helyen szélérőművek termelési adataiból származtatják (Langenbach, 2008). Ebben az esetben az országok szélenergia indexei objektív okokból is különbözőek, hiszen szélérőművek nem túl régóta üzemelnek, így nincs kellő hosszúságú "sokéves átlag", másrészt a szélérőművek száma évről évre változik. A dán szélenergia index az egyik legrégebbi, 1979-től

teszik közzé. Számításához az adott hónapban a szélérőművek által termelt [kWh] energiát a sokéves átlagos termeléshez viszonyítják (Nielsen, 2004). Az első vonatkoztatási időszak 1976-78 termelési átlaga volt ($1976 - 78 = 100\%$), mostmár 1979-89 közötti időszakhoz történik a számítás. Finnországban 1987-2001 periódus felel meg 100%-nak, Németországban (Mengelkamp and Sperling, 2005) az utolsó 14 évet veszik referencia időszakként. Az Egyesült Királyságban referencia meteorológiai állomások utolsó 10 éves adatait is felhasználják a számításához. A százalékban kifejezett szélindexek előállítása akár meteorológiai, akár szélérőművek termelési adatain alapulnak azért történik, hogy segítségével objektívan jellemezni tudják az egymást követő éveket, és hónapokat. Ez az információ segíti az új fejlesztéseket, az 1 éves energetikai szélmérések eredményeinek pontosítását, fontos információ a hitelfolyósító bankoknak, de elképzelhető, hogy befolyásolhatja akár az energiatőzsdén folyó kereskedést, ha kereslet-kínálat szabja meg az értékesítési árakat.

Az NCEP / NCAR reanalízisból származó, 1956-2005 időszakra vonatkozó nagy mennyiségű adat optimális kezeléséhez egy saját fejlesztésű Delphi nyelven írott programot, a "SZEL"-t használtuk, melyet Nagy Tibor programozó készített. Az adatok feldolgozását (SPSS, Statistica, Excel) illetve térinformatikai programok (GeoMedia 5.1 Professional) segítségével végeztük. A szöveg tördelését L^AT_EX 1.5.3 verziójú L^AT_EX for Windows szövegszerkesztő programmal, az irodalomjegyzéket Java környezetben futó JabRef 2.3b verziójú programmal készítettük.

3.2. SODAR mérések

Magyarország nap és szélenergia potenciálját felmérő kutatás keretében kiemelt szerepet kapott a szél magassággal történő változásának részletes tanulmányozása (Varga et al., 2006; Bíróné Kircsi and Tar, 2007). Az Országos Meteorológiai Szolgálat a kutatási cél megvalósítása érdekében egy közepes teljesítményű SODAR (SONic Detection And Ranging) berendezést szerzett be. A SODAR olyan távérzékelési eszköz, amely a földfelszínről képes közvetlen szélprofil mérést végezni a légkör legalsó néhány 100 méteres régiójában. Működési elve arra épül, hogy a műszer által 6 s időtartamú ciklusokban kiadott 1875 Hz frekvenciájú, 340 m/s terjedési sebességű hallható rövid hangimpulzusok a légkör különböző magasságban lévő ún. mikro turbulenciákról, mint határfelületekről visszaverődnek, miközben fáziseltolódást szenvednek. Tehát a visszaverődő hangok földfelszínre való visszaérkezésének időtartama és a Dopplereffektus segítségével mérjük a talajfelszín fölött 30 métertől közel 300 méterig terjedő magasságban a szél horizontális összetevőit, a szélvektorokat. Az új mérőeszköz egy adott helyszínen akár 20 különböző magassági szintben 30-315 m magasság között operatíván közvetlenül méri a légmozgás tulajdonságait (Bíróné Kircsi, 2006).

A SODAR mérések pontosságáról és elsősorban a szélprofil egyszerű leírásához használt Hellman-kitevő tulajdonságainak vizsgálatáról a magyarországi szélenergia potenciált felmérő kutatás keretében számos tanulmány íródott (Varga, 2005; Varga et al., 2006). A SODAR mérések során nyert magyarországi tapasztalatok párhuzamba állíthatóak a nemzetközi irodalomban fellelhető hasonló témában nyert eredményekkel. A mérés technika sajátossága az, hogy a magasság növekedésével párhuzamosan egyre kevesebb értékelhető adat kerül rögzítésre, amelynek napi és évszaki változékony-

3.1. táblázat. A SODAR mérések helyszínei és időpontjai

Mérés helye	Adatsor kezdete	Adatsor vége
Budapest (Marczel Gy. obszervatórium)	2003. 04. 01	2003. 06. 30
Paks (meteorológiai állomás)	2003. 11. 01	2004. 02. 29.
Szeged (meteorológiai állomás)	2004. 06. 01	2004. 09. 30.

sága arra utal, hogy szoros kapcsolat van a légkör tulajdonságaival, a meteorológiai helyzetekkel. Főként extrém erős szél és alacsony talajközeli inverzió esetén romlik a műszer hatékonysága. Intenzív csapadék, vagy vastag hótakaró is akadályozhatja a hangszórók és vevők szabályos működését, továbbá a környezet háttér zajszintje is mérvadó lehet a műszer elhelyezésénél figyelembe veendő szempontoknál (Baumann and Piringer, 2001).

Egybehangzó a szakirodalomban, hogy a SODAR műszerek igen nagy pontosságú adatokat szolgáltatnak, ezért nagy pontosságot igénylő szélenergia felmérésekhez is használható berendezés. Több, különböző teljesítményű SODAR és toronymérések összehasonlítása alapján Vogt and Thomas (1995) megállapították, hogy a kanalas szélebességmérők gyakran magasabb értékeket mérnek, mint a SODAR berendezések, mivel erősen turbulens áramlás során a kis méretű kanalak hajlamosak ún. "túlpörgésre". Seibert (1998) 0,94 - 0,97 korrelációs értékeket talált a toronymérések és SODAR által mért szélebesség adatok között, nagyobb eltérést összetett domborzatú helyszínek vizsgálata során találtak. Budapesten és Pakson kanalas szélmérővel és SODAR-ral mért szélebességek hasonló eloszlása alapján Varga, 2005 szerint a magyarországi tapasztalatok kedvezőek. Tóth et al. (2006) szerint a hazánkban számos helyszínen végzett energetikai szélmérésekkel összehasonlítva is kimutatható, hogy a SODAR kisebb értékeket mér.

A eddig zajlott SODAR megfigyelések Magyarországon expedíció jellegűek voltak 2003 és 2004 folyamán (3.1 ábra, 3.1 táblázat). Budapest adatsora 2003. április 1. és június 30. közötti nyár eleji időszakot öleli fel. A berendezést Budapest délkeleti oldalán, Pestszentlőrincen található Marczell György Obszervatórium mérőkertjében helyezték el. A környék jórészt sík, noha maga az obszervatórium egy kisebb dombon helyezkedik el. Környezete kertes családi házas övezet. A Pakson végzett megfigyelések 2003. októberétől 2004 februárjáig, jórészt télen zajlottak, míg a szegedi adatsor az itt feldolgozott formában 2004. júniusától szeptemberéig tartó négy hónapban állt rendelkezésünkre. A SODAR berendezést Pakson az atomerőmű közelében található OMSZ meteorológiai főállomáson, Szegeden a város nyugati oldalán található regionális OMSZ központ műszerkertjében helyezték üzembe.

A megfigyelőhelyek szélklímájára vonatkozó következtetéseink időben korlátozott érvényűek, más - más évszakra, adott évre lehetnek jellemezőek. A megfigyelhető különbségek származhatnak abból, hogy mérések térben és időben nem párhuzamosan zajlottak. Térbeli korlátot az jelenti, hogy a mérések pontszerűek voltak, azonban a műszer elhelyezésekor figyelembe vették, hogy nagyobb térségre vonatkozóan legyen reprezentatív a mérés.

A Budapesten, Pakson, Szegeden 2003-2004 között SODAR-ral végzett expedíciós mérések néhány hónapig tartottak ugyan, azonban Berge et al. (2008) kutatásai



3.1. ábra. SODAR mérések helyszínei

szerint 3 hónap időtartamú SODAR mérés is elegendő egy helyszín átlagos szélprofiljának a meghatározásához, mivel ilyen hosszú időszak alatt iránszektorok szerint kisebb mint 0,5% szórással jellemezhetjük a terület átlagos szélprofilját. A SODAR-al megfigyelt szélprofil elméleti összefüggésekkel (2.1, 2.2 egyenletek) közelítettük. Az elemzések jelentős részét a rendelkezésre álló 30 m magasságtól az onshore szélergia hasznosítás igényeinek megfelelően 120 m magasságig, 7 szint adatai alapján végeztük. A SODAR mérések hazai tapasztalatai szerint ettől magasabban akár 60 % alá is csökkenhet az értékelhető adatok száma, amely jelentős statisztikai bizonytalanságot jelent.

A SODAR mérések részletes klimatológiai és energetikai elemzésének egy része a Mistaya Engineering Inc. által fejlesztett Windographer 1.04 verziószámú programmal, más része a Lakes Environmental WRPLOT View 5.2.1 verziójú szélrózsa megjelenítő programjának segítségével készültek. A három helyszínen a szélirányok gyakorisági eloszlása 12 db, egyenként 30°-os széliránszektoroként lett kalkulálva, ugyanakkor a szélrózsa megjelenítő program lehetővé tett, hogy egyúttal ezekben a szektorokban a szélsébség gyakorisági eloszlását is ábrázoljuk 1 m/s pontossággal.

A szélergia villamosenergia-rendszerbe illeszthetőségének segítéséhez egyúttal vizsgáltuk a SODAR mérésekből származó különböző magasságban mért szélsébség és a magyar villamosenergia-rendszer (VER) terhelésének napi menetét. Jelenleg a MAVIR Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító ZRt felügyeli teljeskörűen a magyar villamos energiarendszert. A MAVIR adatpublikáció keretében napi rendszerességgel teszi elérhetővé az interneten (www.mavir.hu) a rendszerterhelés adatokat 60 percre átlagolva, melyeket vizsgálatunkhoz felhasználtunk. A rendszert-erhelés adatsorok megegyeztek a SODAR mérések idejével (3.1 táblázat).

A két adatsor, a szélsébség napi menete 30 - 315 m magasságban és a VER napi terhelési profiljának összehasonlításához korrelációs analízist alkalmaztunk. A korrelációs koefficiens (r) próbájához a nullhipotézisünk az volt, hogy $H_0 : r = 0$. A számításához használt $t_s = r \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$ próbastatisztika t-eloszlást követ n-2 szabadsági fokkal, így ha számított értékünk kisebb a t-eloszlás táblázatában 0,05 valószínűséghez

tartozó kritikus értékénél, akkor nullhipotézisünket megtarthatjuk, mivel ebben az esetben a vizsgált változók között valószínűleg nem feltételezhetünk kapcsolatot (Préc-sényi et al., 2000).

4. fejezet

Eredmények

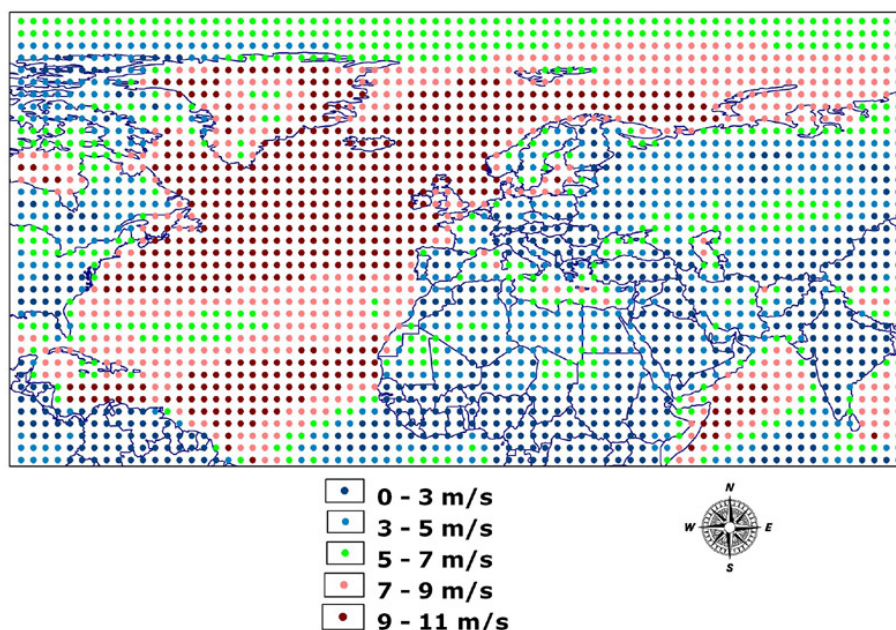
4.1. Makroskálájú szélklimatológiai vizsgálatok

A vizsgálat célja az volt, hogy a NCEP / NCAR reanalízis 1956-2005 közötti 50 éves időszaka alapján áttekintsük az északi negyedgömb szélviszonyait térben és időben kifejezetten a szél energetikai hasznosítása szempontjából.

A vizsgált területünk magába foglalja az észak-amerikai kontinens keleti felét, Közép-Amerikát, a Karib szigeteket, Dél-Amerika északi részét, az Atlanti-óceán Egyenlítőtől északra fekvő térségének jelentős részét, illetve az teljes európai kontinenst, a vele egybefüggő Ázsia nyugati felét, beleértve Indiát. Vizsgálhattuk az afrikai kontinens északi 2/3-át, és az Indiai-óceán északnyugati területeit. A terület hatalmas, az emberiség fele él itt, és nem utolsó sorban ezeken a földrészeken található a már üzemelő szélenergia kapacitások meghatározó része.

Az 4.1 ábrán mutatjuk be az 50 éves időszak átlagos szélességének területi eloszlását. Az északi negyedgömbön a legerősebb szelek ($\overline{wspd}_{5605} \geq 9m/s$) a mérsékelt és poláris öv óceáni területein jellemzőek. Az európai kontinens éghajlatát meghatározó, az Atlanti-óceán felől érkező ciklonok fő keletkezési helye ez a régió. A Ráktérítőtől északra, a szubtrópusi magasnyomású terület (Azori maximum) térségében az óceáni területeken is gyengébbek a szelek. A passzát szelek övében mind az Atlanti-, mind az Indiai-óceánon vannak élénken szeles területek. Az Atlanti-óceánon a Karibi-térségben az oly gyakori hurrikánoknak köszönhetően, míg az Indiai-óceánon, Szomália partjainál a monszun cirkulációhoz kapcsolódóan. A legerősebb szelek ismert tengeráramlásokat mozgatnak és szoros kapcsolatban állnak a légnyomás ismert földgömbi eloszlásával.

Szembeötlő, hogy markáns különbség figyelhető meg a szárazföldek és a vízfelszínnek fölött uralkodó szélességben. A szárazföldek belsejében a nagyobb felszíni súrlódás miatt a szél erőssége gyengébb, mint a közvetlen tengerpartokon. Néhány esetben viszont főként domborzati hatás miatt, a magasabban fekvő térszínnek élénk szélességgel tűnnek ki. Az 4.1 ábra alapján ilyen a Tibeti-magasföld, Afganisztán nyugati része, Kazahsztán északi területei, Afrikában Csád, illetve Mauritánia területe. A kontinensek belsejében található tavak, beltengerek minden esetben szélesség növelő hatásúak. Így Észak-Amerikában felismerhető a Nagy-tavak

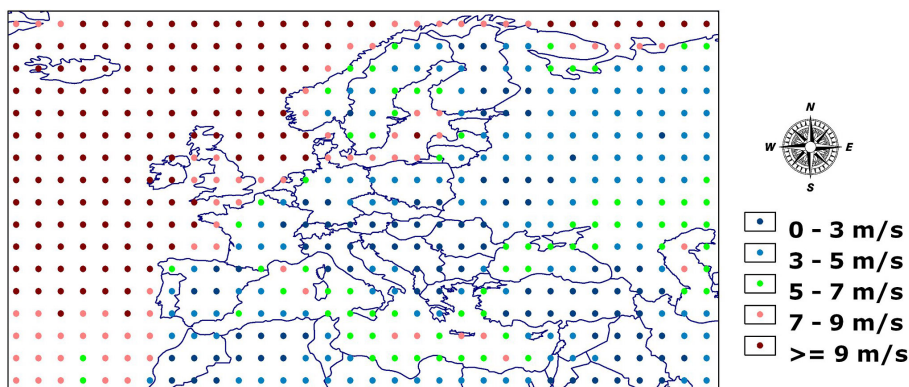


4.1. ábra. A szélesebbség eloszlása 1956-2005 közötti 50 év átlagában a NCEP / NCAR reanalízis alapján 80 m magasságban

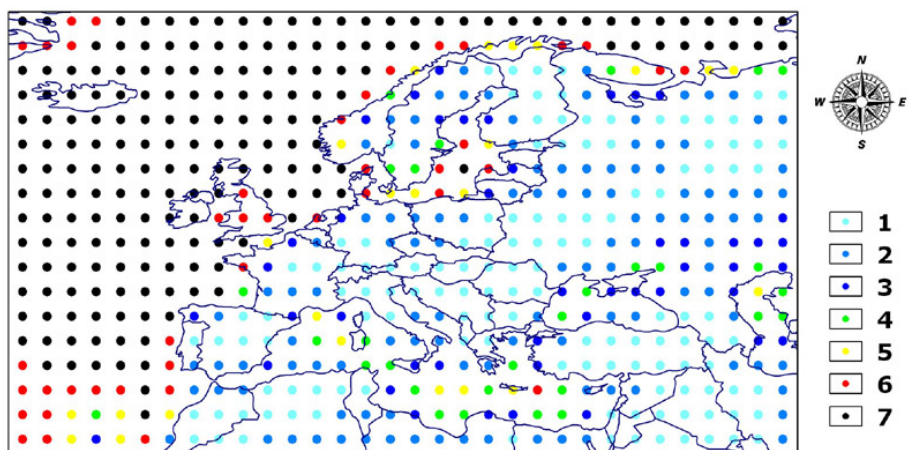
vidéke, vagy hasonló Európában a Földközi-, Fekete- és Kaszpi-tenger térsége. Sajátos képet mutat Grönland, amely az általunk vizsgált régió szárazföldjei közül a legszelesebb területnek találtuk. A belföldi jégtakaró északi és általában a tengerekhez közelebb eső oldalán erős a szél. Az északi Jeges-tenger összefüggő jéggel fedett és állandó tengerjéggel nem borított területei közötti különbségek is felismerhetők csupán szélesebbség alapján.

A 4.2 ábrán mutatjuk 50 év átlagában a szélesebbség eloszlását Európában, amely nagyban megfelel a dán Riso laboratórium által készített áttekintő európai onshore és offshore széleenergia térkép területi eloszlásával (2.32). Az ábránk átlagosan 80 m magasságban mutatja a szélesebbség eloszlását ellentétben az európai áttekintő térképpel, mely 50 m magasságra készült, azonban ez alapján információt szerezhetünk Kelet-közép- és kelet-európai országok sokéves átlagos szélviszonyairól is. Az általunk készített térkép (4.2 ábra) az európai kontinentet övező tengerek környezetére készített offshore széleenergia-potenciál térkép kiegészítője is lehet.

Az USA-ban alkalmazott szélesebbség osztályokat felhasználva (2.6 táblázat) elkészítettük Európa áttekintő térképét az 1956-2005 átlagsebesség alapján (4.3 ábra). Az ipari méretű, hálózatra csatlakozó szélerőművek számára legjobb adottságú helyszínek (3.-7. kategória) ez alapján is tengerparttal rendelkező országokban vannak, így érthető miért nagyon fontos az európai széleenergia kapacitások jövőbeli fejlesztése terén az offshore piac. A kontinens belső területein fekvő országokban nyilván soha sem fog tudni akkora szerepet játszani a széleenergia a villamosenergia-termelésben, mint számos tengerparti országban. A kontinens belsejében fekvő országokban is vannak



4.2. ábra. A szélesebbesség területi eloszlása 1956-2005 között Európában



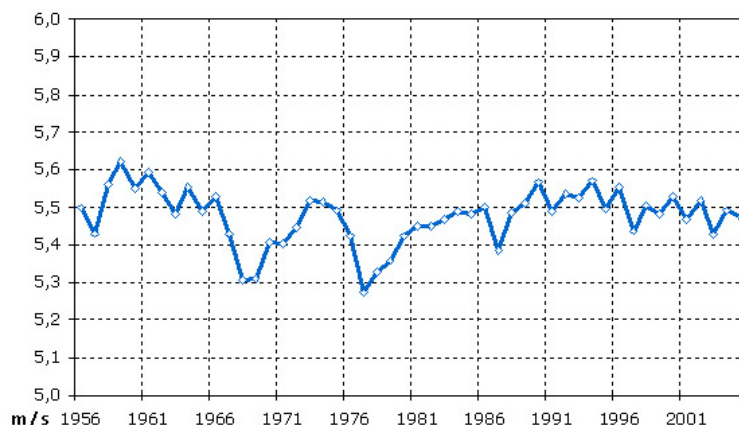
4.3. ábra. Szélesebbesség osztályok Európában 50 év átlagában

előnyös vonások: ritkábban számíthatunk extrém erősségű szélre, lényegesen olcsóbb a beruházás megvalósítása, lassújárású szélérőgépek számára is kedvezőek az adottságok.

4.1.1. Éves szélesebbesség átlagok

A szélenergia energetikai hasznosítása szempontjából nélkülözhetetlenül fontos az az információ, hogy a levegő mozgási energiájára hosszú idő távlatában hogyan lehet számítani. Ennek érdekében vizsgáltuk, hogy 50 év alatt különböző időskálán és területen hogyan változott a szél sebessége.

Az 1956 - 2005 közötti 50 év éves átlagos szélesebbességét számítottuk ki első lépésben, hogy jellemezni tudjuk az elmúlt évtizedeket és az egyes éveket. A teljes északi negyedgömbre vonatkozó átlagos szélesebbesség meghatározásához a gridek területével



4.4. ábra. Az északi negyedgömb átlagos szélsébségének alakulása 1956- 2005 között

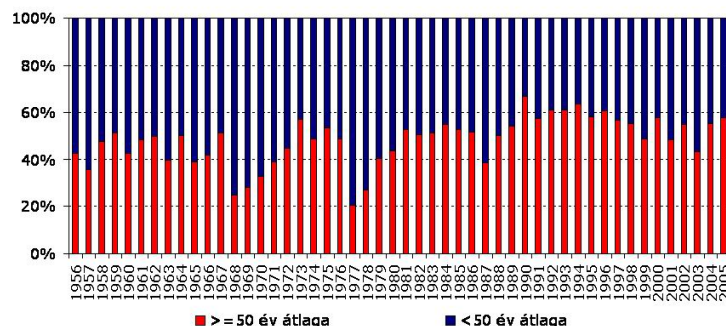
4.1. táblázat. A 10 legszelesebb, tipikus és gyengén szeles év 1956-2005 között

Szeles év		Tipikus év		Gyengén szeles év	
1.	1959	1.	2005	1.	1977
2.	1961	2.	1999	2.	1968
3.	1994	3.	1985	3.	1969
4.	1990	4.	1963	4.	1978
5.	1958	5.	1988	5.	1979
6.	1996	6.	2001	6.	1987
7.	1964	7.	1983	7.	1971
8.	1960	8.	1984	8.	1970
9.	1962	9.	1965	9.	1976
10.	1992	10.	1991	10.	1980

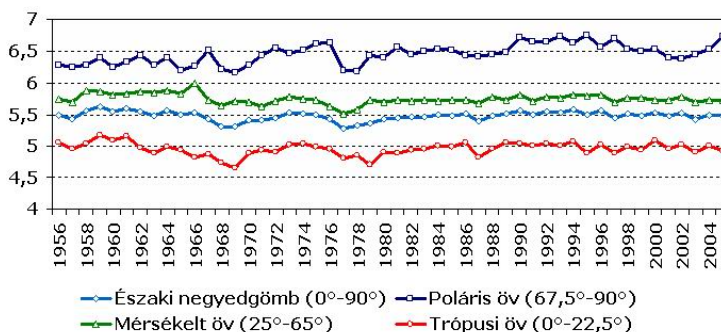
súlyozott átlagát használtunk. Az ötven év negyedgömbi átlagára 5,47 m/s adódott, amelyhez az egyes évek adatait viszonyíthatjuk.

A 4.4 ábrán látható, hogy a teljes vizsgált területen a szélsébség éves átlaga néhány évtizedtől eltekintve alig változott az 50 év alatt. Voltak szelesebb és gyengébben szeles évek, évtizedek, így is a negyedgömbi átlaghoz viszonyítva a köztük lévő különbség alig néhány tized m/s. Az alapján, hogy az egyes évek átlagos sebessége mennyire tér el az 50 éves negyedgömbi átlagtól 3 kategóriába soroltuk az 1956 - 2005 közötti éveket. A 10 legszelesebb év negyedgömbi átlagban azok lettek, amelyek sorrendben a legnagyobb arányban tértek el pozitív irányban a negyedgömbi átlagos szélsébségtől. Gyengén szeles éveket hasonló elven választottuk ki, csak a legnagyobb negatív eltérést kerestük, míg a tipikus évek esetén abszolút értékben 10 legkisebb eltérést mutató évet jelöltük ki (4.1 táblázat).

Az 50-es évek vége, néhány év a 90-es évekből jellemezhető átlagosnál nagyobb szélsébséggel, míg alapvetően a 70-es évek bizonyultak a legkevésbé szeles periódusnak.



4.5. ábra. A negyedgömb átlagos szélebségénél erősebb és gyengébb szélebségű gridek aránya évenként 1956-2005 között



4.6. ábra. A átlagos szélebség változása éghajlati övenként 1956-2005 között

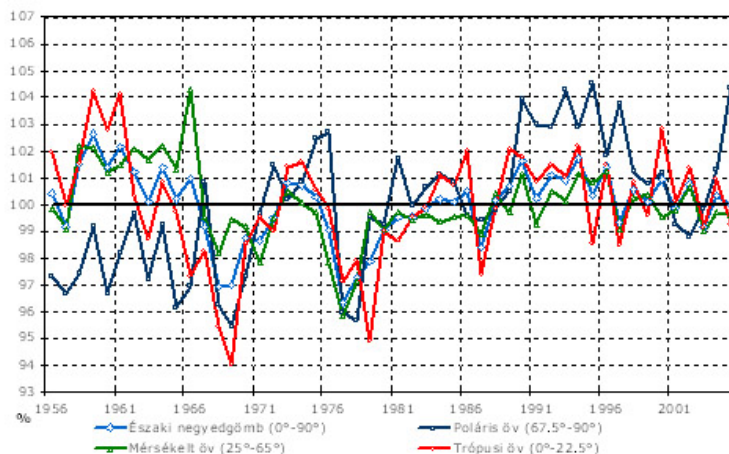
A két legszélcsendesebb év az általunk vizsgált területen és időszakban 1977 és 1968 volt, amikor a szél erőssége mintegy 3%-kal maradt el az átlagtól, míg 1959-ben és 1961-ben 2-3 százalékkal volt erősebb.

Kiszámítottuk mind a 2701 gridre az 50 éves átlagos szélebséget és megvizsgáltuk, hogy az egyes években a gridekre jellemző átlagszél hogyan viszonyul ehhez. Megállapíthattuk, hogy nincs olyan év, amikor a terület egészén minden egyes grid átlagosnál nagyobb szélebségű lenne, még a legszelesebb években sem. Az 4.5 ábra évente mutatja, hogy a gridek hány százaléka volt az 50 éves átlagnál erősebb, illetve gyengébb. A legkevésbé szeles 1977-ben a gridek 20%-ában erősebb volt a szél, míg a szeles 1990-ben a 2071 grid közel 30%-a maradt el az 50 éves gridátlagtól.

Természetesen a nagytérsegre vonatkozó átlagos értékek változatlansága nem jelenti azt, hogy kisebb területen nem lehetnek ettől eltérő tendenciák.

Első lépésben vizsgáljuk meg éghajlati övenként a szélebség évek során történő változását (4.6 ábra). Az NCEP / NCAR adatbázis $2,5^\circ$ felbontású, így az éghajlati övek határait adatbázisunk adottságaihoz voltunk kénytelenek igazítani.

A 4.6 diagramon a gridek területtel súlyozott átlagait ábrázoltuk. A mérsékelt és



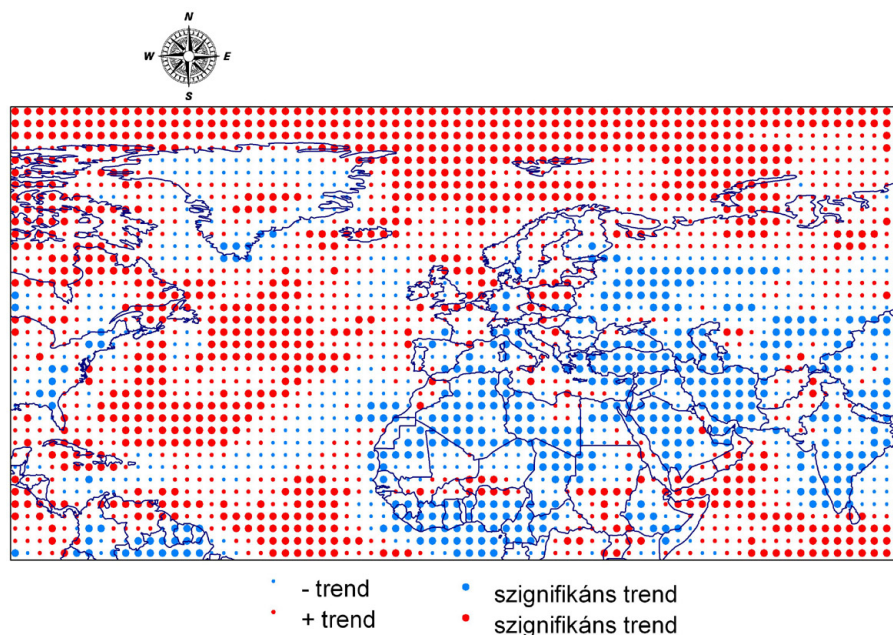
4.7. ábra. Relatív szélesebesség (%) változása éghajlati övenként 1956-2005 között

poláris övbe tartozó területek szélesebessége a negyedgömbi átlagot meghaladja, míg a trópusi öv ettől relatívan gyengébb. A diagramon látszik, hogy a negyedgömbi átlagos szélesebesség alakulását ennek ellenére nagymértékben befolyásolja az Egyenlítőhöz közeli gridek szélesebessége. Itt leginkább szeles évek az 50-es években voltak, míg rendben 1969, 1979 és 1987 volt egy - egy gyengén szeles év. A közel 10 éves periódusok háttérben a térségre jellemző természetes cirkulációs változások állhatnak (ENSO). A sarkkörön túli területek is érdekesek, hiszen itt ugyan magasabb az átlagos sebesség, de az évek között jóval nagyobb különbségek adódnak. A legkiegyensúlyozottabb az éves átlagos szélesebesség alapján mindenképpen a mérsékelt öv.

Minden éghajlati övbe sorolt gridek 50 éves átlagos szélesebességéhez viszonyított relatív értékeket összehasonlítva (4.7 ábra) megállapíthatjuk, hogy a trópusi gridekben az '50-es évek vége után mérséklődött szél. Majd az 1969-es mélypont után erősödött, noha évtizedes periódusokban hirtelen esett vissza. Az általunk poláris övbe (67,5°-90° szélességi körök) sorolt gridek szélesebessége 1956 óta közel 5%-kal erősödött, ellenben ezen az időszoron is nyomonkövethetőek a közel évtizedenkénti markánsabb változások. A poláris övben főként a '90-es évek bizonyulnak relatívan szelesebbnek. A mérsékelt övben a '70-es évekig tartó változékonny időszakok után a '70-es évek második felétől a szélesebesség viszonylag egyenletes, az évek közötti változások nem túl jelentősek, bár a '90-es évek után tapasztalható némi gyengülés.

Hozzá kell tennünk, hogy elképzelhető, hogy az NCEP / NCAR reanalízis időfüggő hibájának eredője lehet az, hogy az '50-70 évek időszaka rendkívül változékonynak tűnik. Összességében a '70 évek közepétől fejlődött rendkívül sokat a megfigyelések időbeli és térbeli felbontása, amely az adatokon is tükröződött (Trenberth et al., 2007).

A éves szélesebességben történő változások részletesebb jellemzéséhez minden egyes grid 50 éves idősorát elemeztük. A 2701 grid éves adatainak idősorára lineáris regressziós egyenest illesztettünk és meghatároztuk az egyenes meredekségét. A 4.8 ábra összefoglalóan mutatja, hogy 50 év távlatában mely gridekben volt pozitív, il-

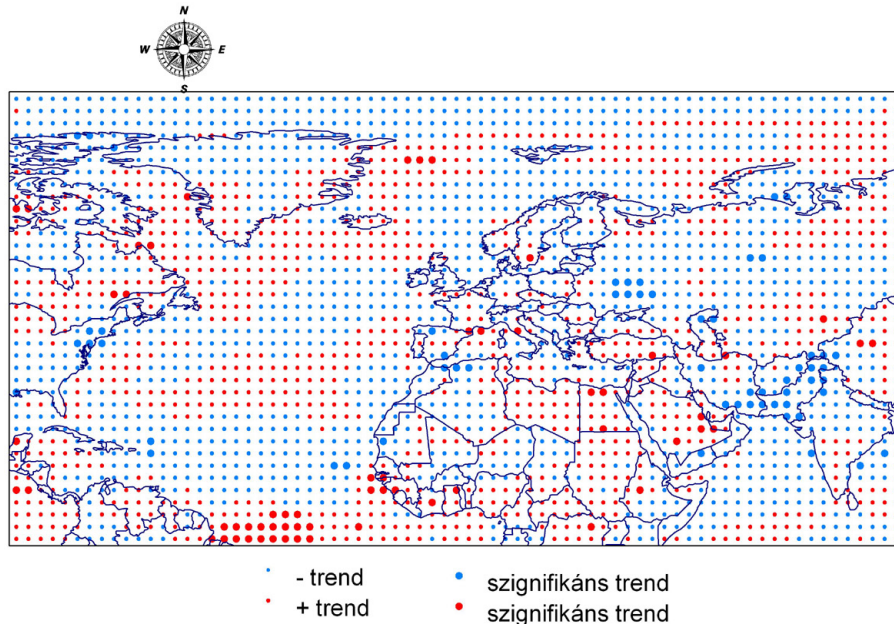


4.8. ábra. A éves átlagos szélesebbesség változásának iránya 1956-2005 között

letve negatív irányú az éves adatokra fektetett trendvonal. Az 50 év alatt csak néhány területen gyengült a szél sebessége, elsősorban a szárazföldi területeken (India, Afrika északi régiói, Arab-félsziget, Kisázsia, stb.) , míg az Jeges-tenger és az Atlanti-óceán jelentős részén erősödött. A változások értékükben nagyon csekélyek, nem minden gridben szignifikáns. Ennek eldöntéséhez statisztikai próbával vizsgáltuk meg, hogy reális-e trendegyes meredeksége, azaz szignifikánsan különbözik-e nullától. A 4.8 ábrán a statisztikai próba eredménye is látható, vagyis mely területeken volt 95%-os valószínűségi szinten szignifikáns valamilyen irányú változás.

Összehasonlításként az évek adataira illesztett trendvonal meredekségének vizsgálatát elvégeztünk évtizedenként, de az utolsó 10 (1996-2005) (4.9 ábra), 20 (1986-2005) (4.10 ábra) és 30 (1976-2005) (4.11 ábra) éves periódusra vonatkozóan is. A választott időszak hosszúságától függött egyrészt, hogy találtunk-e szignifikáns változást az egyes gridek éves szélesebbesség adataiban, másrészt milyen volt a változás iránya.

Az évtizedekben tapasztalható változások csak néhány területen voltak 95% valószínűségi szinten szignifikánsak, így 1956-65 között szignifikáns volt Törökország, Írország és nyugati parvidékének és Grönland északi részén a szélesebbesség erősödése, míg Egyiptom déli, Szudán északi területein annak gyengülése. 1966-75 között Dél-Amerikában a guyanai partvidéken, a Baffin-sziget keleti oldalán, míg az Arab-tengeren a Maldív-szigetek térségében erősödött szignifikánsan az éves átlagos sebesség. 1976-85 közötti 10 évben Csád déli részén, a Szomáliai-félszigetnél, illetve az Atlanti-óceánon volt pozitív irányú tendencia, 1986-95 között pedig a Grönlandi-tenger, a



4.9. ábra. A éves átlagos szélesebség változásának iránya 1996-2005 között

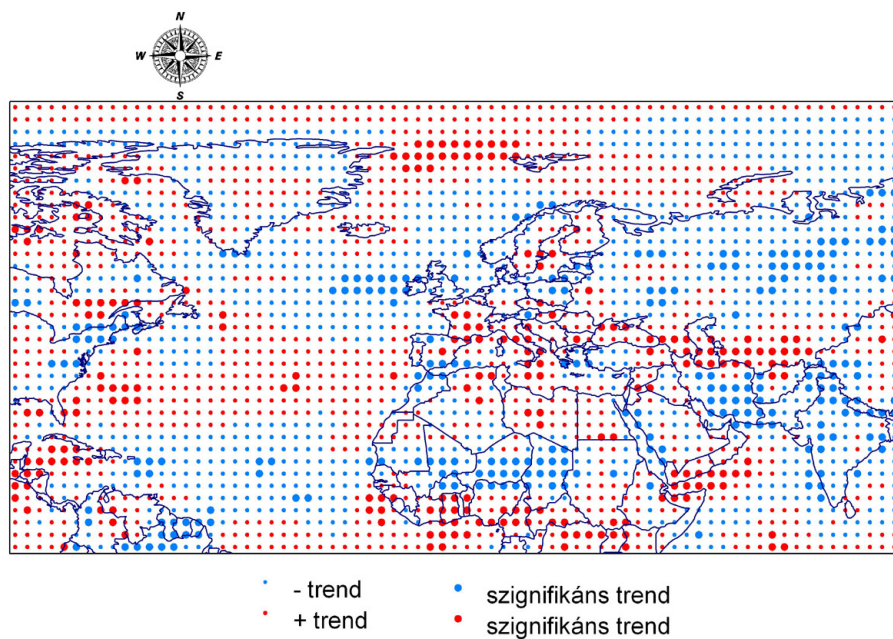
Balti-tenger, néhány közép-európai gridben. Az utolsó évtizedben (1996-2005) (4.9 ábra) szignifikáns volt az Pakisztán térségében tapasztalható szélerősség gyengülés, míg Brazília keleti partjainál az egyenlítői Atlanti-óceán felett a szélesebség növekedése. Európában az utolsó évtized alatt tapasztalható változások nem voltak szignifikánsak, kivéve Franciaország déli részének pozitív irányú változását.

Amennyiben az utolsó 20 éves időszakot tekintjük, akkor jóval változatosabb a kép (4.10 ábra). Ebben az időtávlatban Nyugat-Európában jó néhány országban csökkentek az éves szélesebség átlagok, kivétel volt Svédország, Franciaország, és Olaszország főként déli tájai. Hatalmas területen Iránban, Pakisztánban, számos szaharai országban, illetve Dél-Amerika északi országaiban, USA keleti partján inkább negatív tendencia mutatkozik.

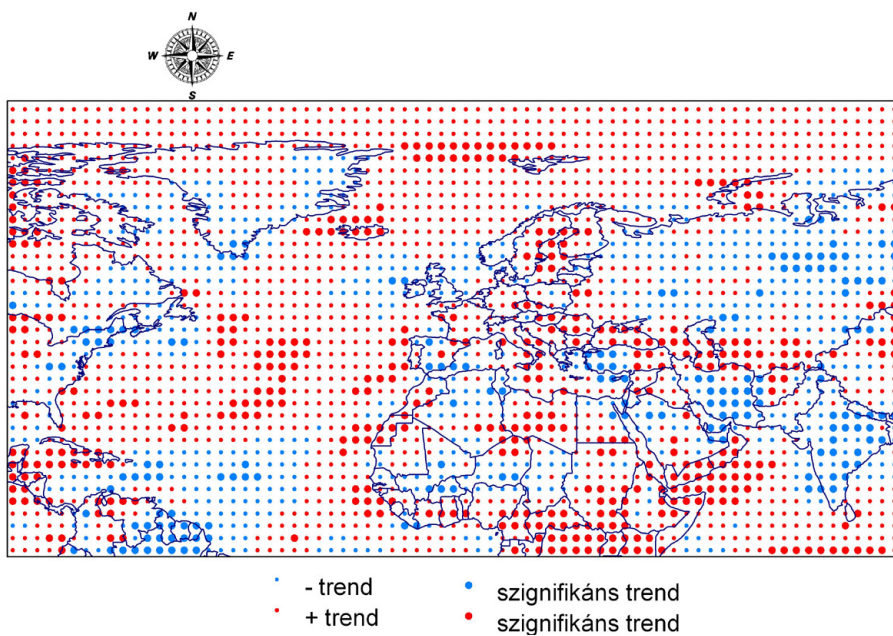
Az elmúlt 30 év távlatában (4.11 ábra) India, Irán, Törökország és Dél-Amerikában Guyana szélesebség csökkenését emeljük ki, de számos helyen tapasztaltunk erősödést az éves átlagos szélesebség értékében, így kelet - közép - európai országokban is.

A 4.12 ábrán gridenként vizsgáltuk a variációs tényező (relatív szórás) értékeinek területi képét. A relatív szórás az 50 éves időszakra vonatkozó szórás és a szélesebség átlag hányadosa ($\frac{s}{\bar{x}}$ egyenlet). Ez a paraméter az adatok homogenitása mellett tájékoztat az értékek változékonyságáról. A variációs tényező értékében nagyságrendi különbség figyelhető meg a trópusi és a magasabb szélességek között, illetve a szárazföldek és a tengerek között. A legnagyobb értékeket a szárazföldek esetében Dél-Amerikában, Afrikában, Nyugat-, és Közép-Ázsiában tapasztaltuk, míg Észak-Amerikában és Európa jelentős részén az értékek nagyon alacsonyak.

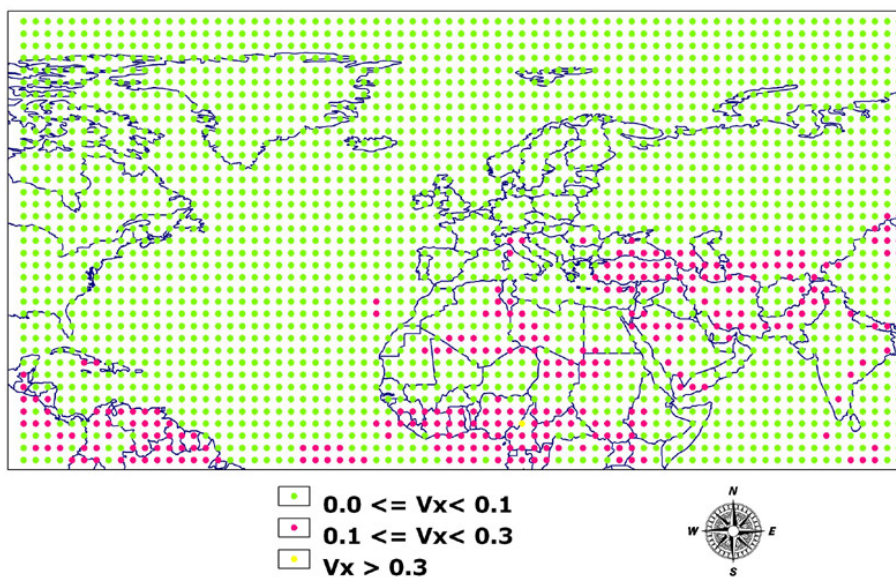
Egy - egy év jellemzését úgynevezett szélindex segítségével is megtehetjük, amely



4.10. ábra. A éves átlagos szélesség változásának iránya 1986-2005 között



4.11. ábra. A éves átlagos szélesség változásának iránya 1976-2005 között



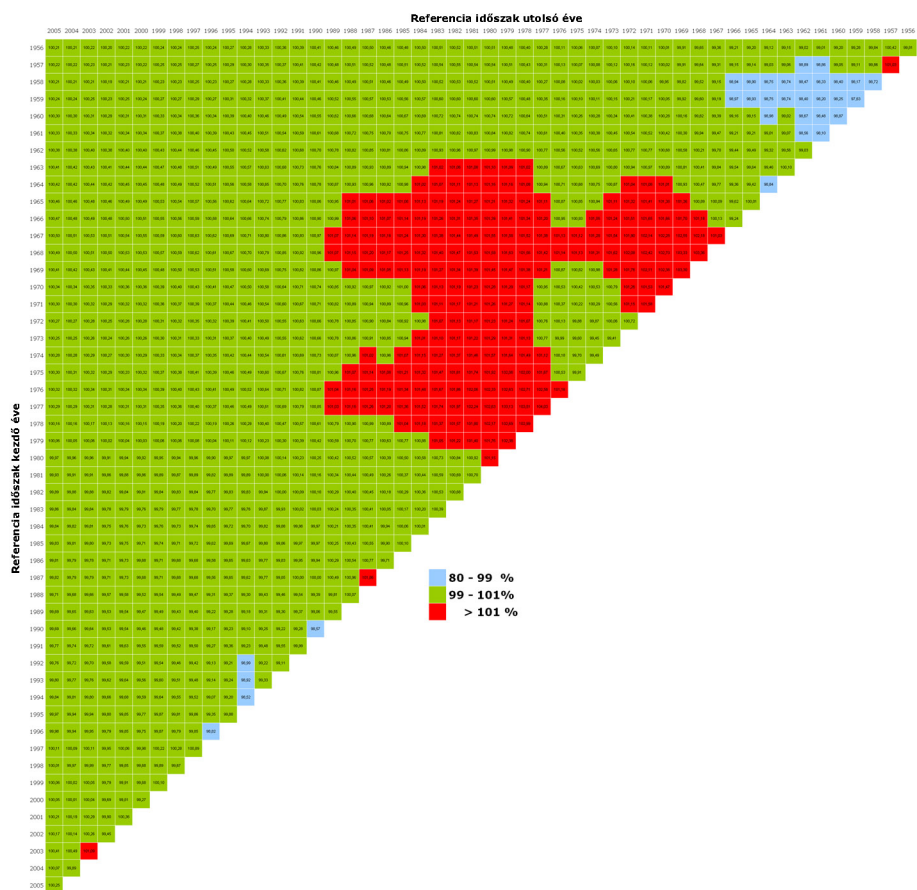
4.12. ábra. Relatív szórás (variációs tényező) területi eloszlása 1956-2005 között

A 2006. év átlagos negyedgömbi szélindexének szélső értékei különböző időszakból

Vizsgált időszakok		számolva		
		Szélindex [%]	Melyik időszak	Különbség
10 év	Max	101,41	1968-1977	2,27%
10 év	Min	99,14	1957-1966	
20 év	Max	101,20	1968-1987	1,43%
20 év	Min	99,77	1983-2002	
30 év	Max	100,67	1963-1992	0,4%
30 év	Min	100,23	1973-2002	

során az adott év adatait sokéves átlaghoz viszonyítjuk (3.7 egyenlet). Felmerül a kérdés, hogy vajon milyen hosszú időszakból álljon a sokéves átlag, illetve mely időszakot válasszunk a szélindex előállításához? Példaként vizsgáljuk meg a 2006-os év negyedgömbre vonatkozó szélindexét különböző időszakból számolva (4.13 ábra). A teljes vizsgált északi negyedgömb esetén 2006 év szélindexe elég nagy biztonsággal határozható, még viszonylag rövid időszakot alapul véve is, de a 4.1.1 táblázatban is látható, hogy minél hosszabb időszak átlagos értékéhez viszonyítva állítjuk elő, annál kisebb a számított index értékek közötti különbség. Legnagyobb hibát az 1968-1977 évtized szélsőérték átlagával számított szélindex esetén tapasztaltunk.

Természetesen a grideket egyedileg is vizsgálhatjuk, azaz az indexet az adott területre jellemző sokéves átlagból származtathatjuk. Megállapítottuk, hogy a szélindex értéke valójában a választott terület nagyságával is összefüggésben van és mindenképpen a választott terület földrajzi helyzetével. A Magyarországot érintő három grid példáján látható, hogy (4.2 táblázat) 10 éves átlaghoz viszonyítva átlagosan 16-



4.13. ábra. A 2006-os év negyedgömbi átlagos szélindexének értéke különböző időszakokhoz viszonyítva

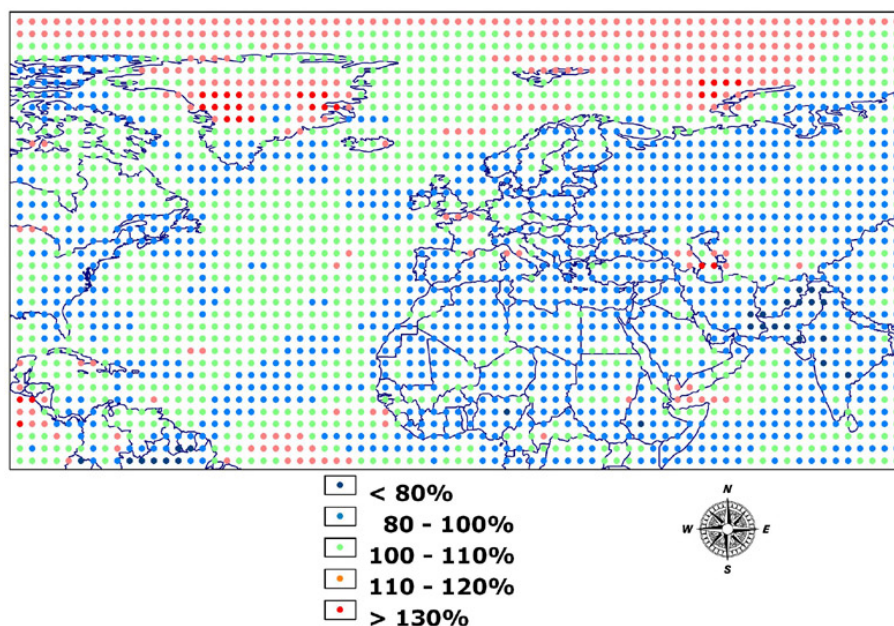
4.2. táblázat. Magyarországi grillek ($Ny \Rightarrow K$ irányba) 2006-os szélindexének szélsőértékei különböző időszakból számolva

Vizsgált időszakok		Szélindex [%]	Melyik időszak	Különbség
É47,5°K17,5° 10 év	Max	112,46	1969-1978	16,57%
É47,5°K17,5° 10 év	Min	95,89	1993-2002	
É47,5°K17,5° 20 év	Max	106,54	1967-1986	8,73%
É47,5°K17,5° 20 év	Min	97,80	1986-2005	
É47,5°K17,5° 30 év	Max	104,54	1956-1985	5,19%
É47,5°K17,5° 30 év	Min	99,34	1976-2005	
É47,5°K20° 10 év	Max	115,93	1969-1978	17,60%
É47,5°K20° 10 év	Min	98,33	1995-2004	
É47,5°K20° 20 év	Max	110,97	1968-1987	8,91%
É47,5°K20° 20 év	Min	102,05	1986-2005	
É47,5°K20° 30 év	Max	108,99	1965-1994	5,17%
É47,5°K20° 30 év	Min	103,82	1976-2005	
É47,5°K20,5° 10 év	Max	107,99	1969-1978	18,78%
É47,5°K20,5° 10 év	Min	89,20	1956-1965	
É47,5°K20,5° 20 év	Max	104,84	1968-1987	8,12%
É47,5°K20,5° 20 év	Min	96,72	1956-1975	
É47,5°K20,5° 30 év	Max	103,89	1968-1997	5,24%
É47,5°K20,5° 30 év	Min	98,65	1956-1985	

18%, 20 éves átlag esetén 8%, míg 30 éves átlaggal számított szélindex bizonytalansága 5%. Általunk kapott értékek és annak bizonytalansága igen jól egyezik a 1970-2003 időszakra, Németországra számított átlagos szélenergia-termelésen alapuló szélindex értékével és annak bizonytalanságával. Mengelkamp and Sperling (2005) szerint 10 éves periódusnak 14% volt a bizonytalansági terjedelme, 20 éves periódus esetén 8%, míg 30 éves periódust alkalmazva durván 2% felelt meg.

Megállapíthatjuk, hogy egyrészt az európai kontinens belseje felé egyre nagyobb a bizonytalanság, másrészt legalább 20 évből számított sokéves átlagot érdemes használni a szélindex pontos meghatározásához. Végül miután a szélerőművek villamosenergia-termelése elsősorban a szélesebbesség függvénye, nem csak erőművek adataiból, hanem nagytérre vonatkozó átlagos szélesebbesség segítségével is hasonló szélindex képezhető. A 4.14 térképen a 2006-os év az 1956-2005 közötti 50 év átlagból készített szélindexének területi eloszlását mutatjuk be.

Összefoglalva az éves adatok szerint a szél sebességében nem mutathatók ki olyan egyirányú tendenciák 1956 - 2005 időszak folyamán az északi negyedgömbön, mint a felszín közeli levegőhőmérséklet alakulásában. Az IPCC 2007-ben kiadott jelentése (Trenberth et al., 2007) egyedül a mérséklet öv nyugati szeleinek erősödését fogalmazza meg tényként az északi félgömbön megfigyelt cirkulációs változások terén. Mindezt az Észak-Atlanti Oszcilláció (NAO) különböző fázisainak változásával, illetve az ENSO jelenségkör lehetséges távkapcsolataival magyarázzák. Ezek a változások az éghajlati rendszer természetes belső változékonyságának eredményei.



4.14. ábra. Szélindex területi eloszlása 2006-ban

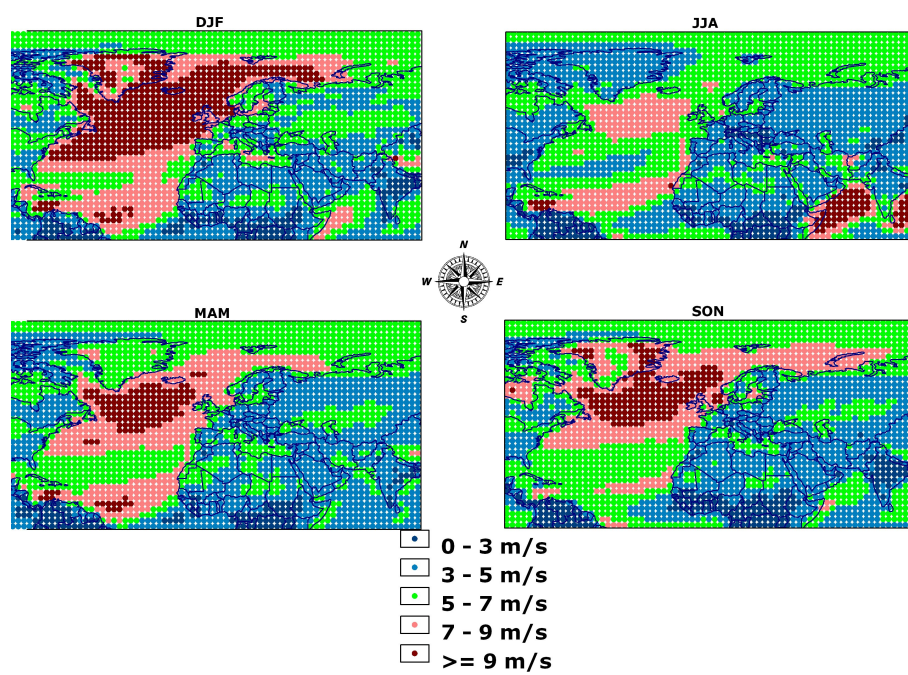
A szélesebesség éves változékonysága 50 év távlatában a mérsékelt övi területeken a legkisebb, így a széleenergiába befektetők számára ez a régió nyújthatja hosszútávon a legnagyobb biztonságot. Nem véletlen, hogy ezen a területen terjedt el leginkább a széleenergia ipari méretű hasznosítása. Az általunk vizsgált időszak alapján nem lehet egyértelmű előrejelzést tenni a jövőre, mégis úgy tűnik, hogy jelentősebb változásra nem kell számítanunk hosszú távon a levegő mozgási energiájának rendelkezésre állását illetően, amely a széleenergiába globálisan beruházókat megnyugtathatja.

4.1.2. A szélesebesség éven belüli változása

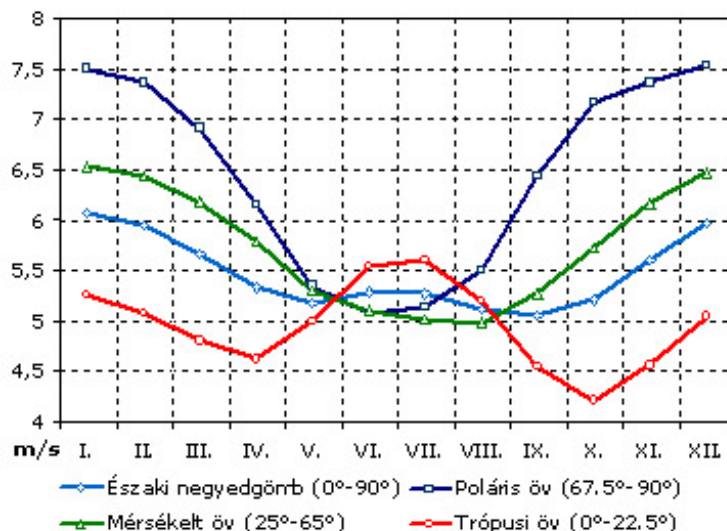
A szélesebesség nem csak évek során, hanem a Föld legtöbb részén éven belüli is változik. A széleenergia konverterek kihasználtsága és az általuk termelt energia, illetve az ebből származó bevételek évszakonként és havonta ingadozik. Ebből ered, hogy a széleenergia önmagában energiatárolás és kiegészítő energiaforrás nélkül nem képes egy régió energiaigényét teljes mértékben kielégíteni.

Az 1956-2005 NCEP / NCAR reanalízis napi adatsorából készítettünk ábrasoportot az évszakai és havi változásokról a teljes északi negyedgömbre (4.15 ábra). A számításokhoz területtel súlyozott átlagokat használtunk.

Az észak-atlanti térségben, az Atlanti-óceán mérsékelt övi területein tél végén - tavasz elején igen erős a szél, amely nyárra fokozatosan legyengül. Ezt követően az őszi hónapokban a szél újra megerősödik. Ez a változás az Atlanti-óceánt övező szárazföldi területeken is érvényesül, így Európa nyugati felén az Atlanti-óceán partvidékén. Itt a téli, tavaszi erős szelek nyárra a kontinensen kiépülő anticiklonok hatására fokozatosan



4.15. ábra. A szélsébség átlagos évszakos változása (1956-2005)
(DJF - Tél, MAM - Tavasz, JJA - Nyár, SON - Ősz)



4.16. ábra. A szélesség havi átlagos értékei éghajlati övenként

veszítene erejükből.

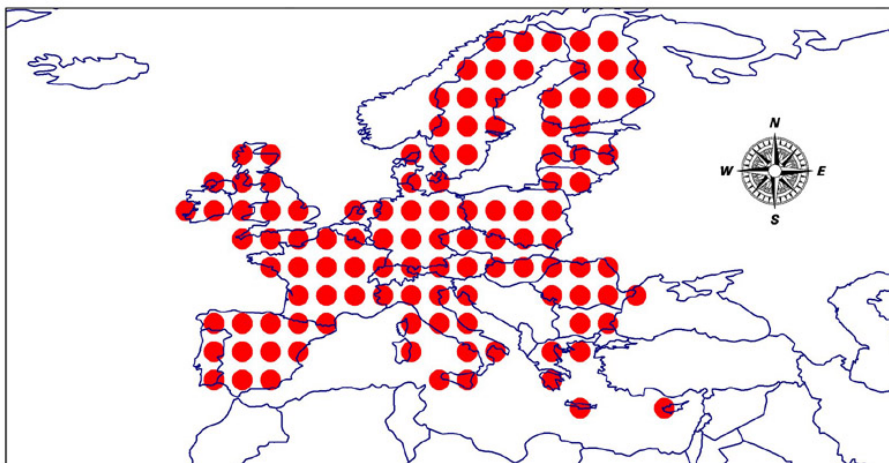
A másik évszakonként dinamikusan változó terület a vizsgált negyedgömbön az Indiai-óceán térsége, a Szomáliai félsziget keleti előterében. A hagyományosan monszun hatás alatt álló térségben a szélesség a mérsékelt övi Atlanti-óceánon megfigyelttel csaknem ellentétesen változik. A szélesség elsődleges maximuma az északi félgömb nyári hónapjaira esik, másodlagos maximuma a téli hónapokban alakul ki, míg az átmeneti hónapokban, tavasszal és ősszel gyenge a szélessége.

Havi szélesség átlagok alapján is látszik, hogy a szél éves menete jellemzően más a mérsékelt és a poláris övben, mint a trópusokon (4.16 ábra). A mérsékelt és hideg övben a szélességnek egy téli maximuma és egy nyári minimuma figyelhető meg a vizsgált területen. Ezzel szemben a Ráktérítőtől délre a szélességeknek két maximuma és két minimuma van. A fő maximum az északi félgömb nyári időszakára esik, míg a másodlagos maximum a téli hónapokra. A minimumok az átmeneti, tavaszi és őszi hónapokra jellemzőek és ezen belül is általában az ősz a gyengébb (4.16 ábra). A legszelesebb a Sarkkörtől északra fekvő, illetve a mérsékelt öv északi területei. A legszelesebb terület mindig az Egyenlítő térsége.

Összességében a mérsékelt öv ideális hely a szélenergia hasznosítására, hiszen a viszonylag nagy szélesség mellett az éven belüli különbség kisebb, illetve a hidegebb levegő nagyobb sűrűsége miatt magasabb a szél fajlagos teljesítménye, mint a trópusi éghajlati övben.

4.1.3. Kiválasztott területek szélklímája

A szélenergia hasznosításban vezető pozíciót betöltő Európai Unió területét és az északi negyedgömb egészéről néhány kisebb térséget részletesebb vizsgálat alá von-



4.17. ábra. Kiválasztott grillek Európában

tunk.

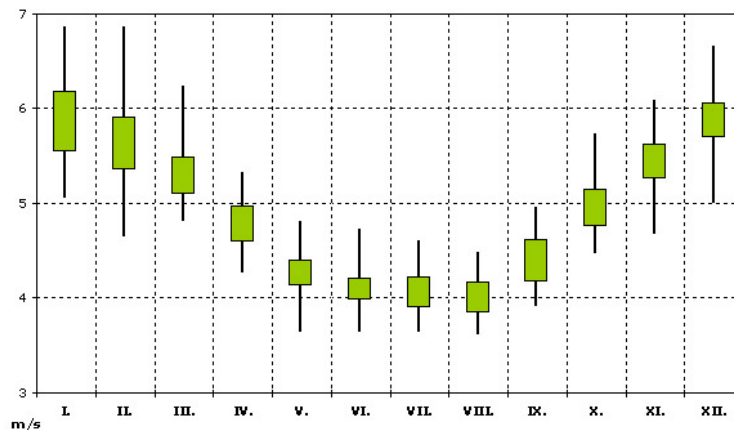
Európa

Az Európában kiválasztott területegységeket a 4.17 ábra mutatja. Elsősorban kontinentális grilleket választottunk az EU-27 országok és vele szoros kapcsolatban álló Svájc területéről, de a nagyobb szigetek is figyelmet kaptak.

A kiválasztott 114 európai grid területtel súlyozott 50 éves (1956-2005) átlagos szélebsége 4,89 m/s. Az évek legnagyobb és legkisebb szélebsége között 11%-os a különbség 1956-2005 között, azonban ha a fajlagos széltejesítménnyel arányos köbös értéket tekintjük ez a különbség már 38%. Ez azt is jelenti, hogyha az Európai Unió területén egyenletes területi eloszlásban szerelnénk fel hálózatra csatlakozó szélérőműveket, akkor a sokéves átlaghoz képest majdnem 20%-os bizonytalansággal termelnének elektromos áramot ezek a berendezések éves szinten.

Az éves átlagos szélebség a vizsgált időszakban az EU főként szárazföldi területein gyakorlatilag nem változott meg statisztikailag kimutatható mértékben. A szélérőművek 25 éves élettartama alatt ekkora területen a kihasználható szélenergia potenciál igen stabilnak tekinthető. Sokkal biztosabb, mint a fosszilis energiahordozók ára (főként kőolaj világpiaci ára), vagy akár az elektromos áram árára vonatkozó törvényi szabályozás.

Elemeztük a szélebség havi menetét 50 éves időtávban, melynek eredményét a 4.18 ábra foglalja össze. A $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ felbontású reanalízis adatsor európai adatai alapján a mérsékelt éghajlati övben téli-tavaszi szélebség maximum, illetve nyári szélebség minimum állapítható meg. Ez a vizsgált terület minden évben igaz volt. A 4.18 ábrán az egyes hónapok 50 év alatt előfordult legnagyobb, legkisebb és alsó és felső kvartilis értékei is láthatók. Érdekes módon február és általában a téli hónapok havi adatainak terjedelme nagyobb, mint nyáron. Február speciális helyezete valószínűleg vissza vezethető arra is, hogy ez a legrövidebb hónap. A 4.18 ábrából lev-



4.18. ábra. Havi szélesség maximális, minimális és 25% és 75% valószínűségi szinthez tartozó értékei Európában 1956-2005 között

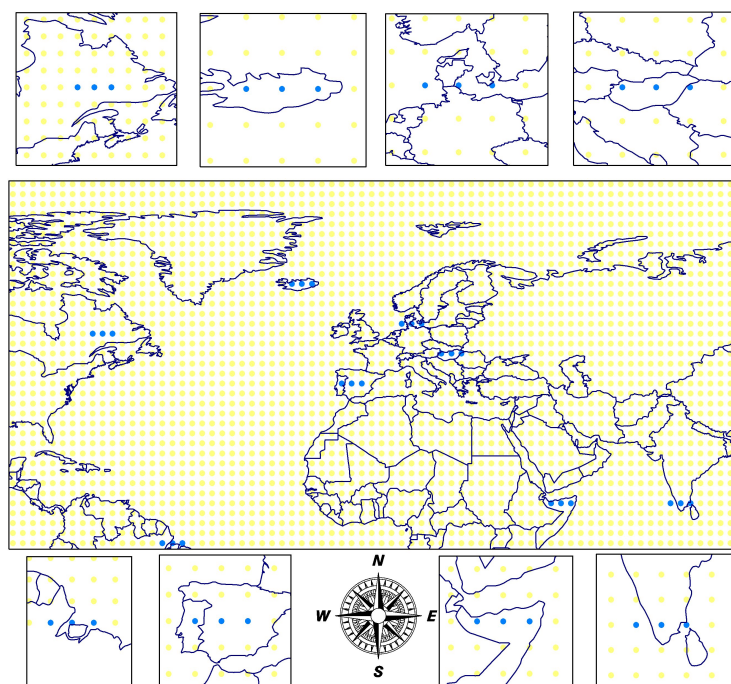
onható az a következtetés, hogy statisztikusan a nyári hónapok átlagos szélessége kisebb hibával kalkulálható előre, mint az erősebb szélességű téli hónapoké. Nyilván a szél erőművek által adott hónapban megtermelhető villamos energiájának becslése mérlegkörüli menetrend készítéséhez a köbös összefüggést miatt nehezebb. Tovább nehezíti a problémát az, hogy ezt a kalkulációt jóval kisebb területre, esetleg 1-1 szél erőműre kell készíteni.

Az északi negyedgömb 2701 gridjéből kiválasztottunk 8 jellemzően szárazföldi régiót (4.19 ábra), ahol egyenként 3 gridből álló területen részletesen jellemeztük a változások tendenciáit. A szélerő energia hasznosítás napjainkban főként a szárazföldön, illetve az azzal közvetlenül határos tengerparti övezetben történik. A választott régiók egyrészt szélklimatológiai szempontból különleges helyszínek, vagy a globális szélerő piacon is kulcsfontosságú térségek, elsősorban az itt üzemelő szél erőművek beépített kapacitásának nagyságrendje alapján. A következő régiókat vizsgáltuk: Dánia, Portugália-Spanyolország, Izland, Brazília északkeleti partvidéke, Szomália, Dél-India, Kanada, és természetesen a Magyarországot érintő gridek.

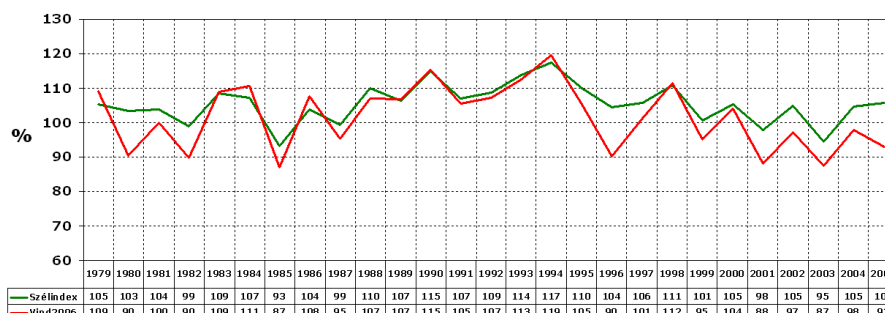
Dánia

Dánia a világ szélerő energia hasznosításában nagy tapasztalatokkal rendelkezik. Mind a telepített szél erőművek, mind a szél villamosenergia-termelésben betöltött arányát figyelembe véve. A kiválasztott három, egymás melletti grid középpontjai az északi szélesség 55° fokán, és a keleti hosszúság 7,5°, 10° és 12,5°-on találhatóak.

Az ország területén nagy számban található szél erőművek termelési adatai ismertek. Ebből származtatják a dán szélerő energia indexet (Nielsen, 2004), amely nyilvánvalóan szoros kapcsolatban áll az egyes dán régiók szélviszonyaival is. A szélerő energia index Dániában 1979-től hozzáférhető (www.ens.dk), ahol a kezdeti referencia időszakot 1976-78 szélesség adatai szolgáltatták (100%). A referenciaidőszak körütekintő megválasztásához környező hatásoktól mentes pontos méréseket és nagytérségű szélk-



4.19. ábra. Részletes elemzéshez kiválasztott gridek elhelyezkedése a Földön



4.20. ábra. Az NCEP / NCAR reanalízisből származó szélindex és a dán szélerőenergia index összehasonlítása

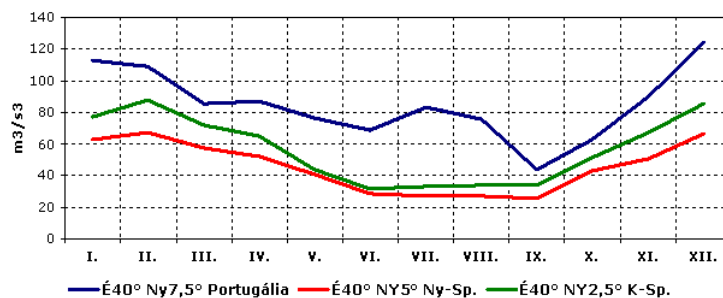
limatológiai vizsgálatokat alkalmaztak. A viszonyítás alapjául szolgáló sokéves átlagnak klimatológiai szempontból legalább 30 évesnek kellene lennie, de még Dániában sincs ilyen hosszú időszakra visszamenőleg termelési adat.

Dánia szélviszonyait szélindex segítségével jellemezzük. Szélindexet különböző időskálán értelmezhetünk. Egy adott hónap, vagy év során mért értékeket egy sokéves átlaghoz viszonyítva adjuk meg %-ban kifejezve. Az NCEP / NCAR reanalízis éves szélebség adatsorból mi is előállítottunk havi és éves szélindexeket, a Dánia térségét jellemző három gridre vonatkozóan, amelyet összehasonlítottunk a dán szélerőenergia indexel. Az 4.20 ábrán a 1979 - 2005 időszak éves szélerőenergia index értékeit vetjük össze az NCEP / NCAR reanalízis hasonló időszakra számolt éves szélindexével. Annak ellenére, hogy a két diagram nem pontosan ugyanarra (egymást csak részben átfedő) a területre vonatkozik, mégis nagymértékű a hasonlóság közöttük, amely bizonyítja a makroléptékű modell széladatainak használhatóságát és pontosságát akár szélerőművek termelésének a becsléséhez. Természetesen azt hangsúlyoznunk kell, hogy a nagytérségű széladatokból készített klimatológiai szélindex nem egy-egy szélerőmű termeléséről tájékoztat, hanem egy nagyobb területen található szélerőművek összességéből származó energiatermelést jellemez.

Az általunk számított szélindexek alapján Dániában a '90-es évek elején voltak átlagosnál szelesebb évek, azonban 1996 és 1997 elmaradt az átlagtól. 2000 után egy-egy hónap, így 2002 február, 2003 december és 2005 januárja volt kiugróan szeles, amely az éves átlagokat is befolyásolta.

Dániában a szeles téli és a mérsékleten szeles nyári hónapok között számszerűen 38 - 40% a szélebségbeli eltérés 50 év átlagában a szárazföldi területeken. A legnyugatabbra fekvő, tengeri gridben azonban az éven belül jelentősebb különbségre kell számítani. A havi szélindex szerint a téli hónapok légmozgásainak energiataralma jellemzően 3x nagyobb, mint a nyári hónapoké, amely azt jelenti, hogy a megtermelt villamos energia között is körülbelül legalább ugyanekkora a különbség. Ezzel a problémával szembe kell néznie a helyi villamosenergia-rendszer résztvevőinek és irányítóinak.

Adataink szerint Dániában 1956-2005 között extrém kiugró szélebségű hónapok is előfordultak, például ilyen volt 1993 januárja, amikor a szélindex értéke



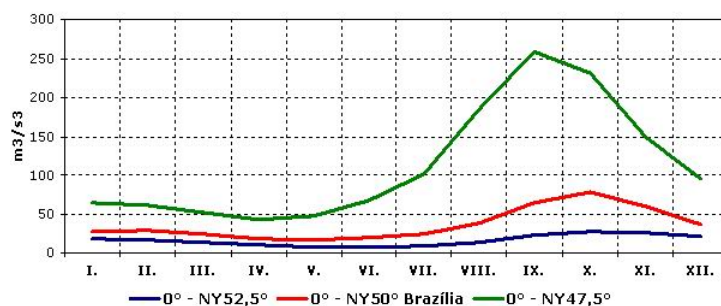
4.21. ábra. Átlagos havi szélesség köbök Portugáliában és Spanyolországban

mindegyik vizsgált gridben elérte a 180%-ot. A szélérőművek számára az extrém erős szelek sem kedvezőek, ugyanis a biztonság érdekében inkább kifordulnak a szél irányából és leállítják termelésüket. Dánia 50 éves havi szélesség időszora alapján elmondhatjuk, hogy itt szinte minden évben számítani kell egy szélviharos hónapra. A rendszerirányítóknak ezzel tisztában kell lenniük, hiszen komoly felkészülés kell ahhoz, hogy a termelésből kilépő szélérőművek ne okozzanak fennakadást akár más országok villamosenergia-ellátásában.

Portugália-Spanyolország

Következő lépésben az Ibériai-félszigeten, a 40° szélességen fekvő 3 grid szélesség adatait vizsgáltuk meg. Első lépésben ezeket összevetettük a dániai hasonló adat-sorokkal. Megállapítottuk, hogy az Ibériai-félszigeten a szél sebessége lényegesen kisebb. Ezt a klimatológiai adottságot műszakilag úgy lehet kiküszöbölni, hogy az azonos rotorátmérőjű és teljesítményű szélérőművek gondolait magasabb oszlopra helyezik. A Dániában és az Ibériai-félszigeten vizsgált 3-3 grid éves szélességének időszora összehasonlítva jelentős eltéréseket láthatunk, azaz ritkán fordul elő, hogy mindkét helyszínen egyszerre legyen átlag feletti, vagy átlag alatti szélességű egy év. Ez a tény is bizonyítja, hogy érdemes a befektetőknek földrajzilag nagyobb lép-tékekben gondolkodniuk.

Portugáliában és Spanyolország nyugati területein magasabb a szél sebessége, mint a keletre fekvő területen. A vizsgált ötven éves időszakban az '50-60-as évek voltak a legváltozékonyabbak. Az ötven év legszelesebb és legszélsőségebb éveinek szélessége között a különbség nyugatról keletre haladva, 25-20-23 százalékos mértékű, amely el-marad a dániai három grid hasonló adataitól (24-24-27%). Hasonló következtetések vonhatóak le az 50 éves időszak éves szélességeinek szórásának vizsgálatát követően. A szélesség szórásai a szárazföld belseje irányába csökkenek. Elmondható tehát az, hogy hiába alacsonyabb az Ibériai-félszigeten a szél sebessége Dániához képest, a szél sebességének évek közötti változékonyasága kisebb. Az itt található szélérőművek éves szinten kisebb bizonytalansággal termelik az elektromos áramot, mint Dániában. Véleményünk szerint a szélesség hasznosítás esetén nem csak azt kell figyelembe venni, hogy hol milyen az átlagos szélesség nagysága, hanem azt is, hogy a szélesség éves szinten milyen biztonsággal áll a rendelkezésünkre.



4.22. ábra. Átlagos havi szélesség köbök menete Braziliában (1956-2005)

Az éven belül havonta a vizsgált brazil gridekben rendkívül egyedi a szél energia-tar-tal-má-nak el-osz-lása (4.22). A szélerőművek igazából a csapadékos őszi hónapokban, kifejezetten szeptemberben termelnek jelentős mennyiségű energiát, míg az év nagyrésztében alacsony lehet a kihasználtságuk. Az átlagos havi szélindex szerint Braziliában a gyengén szeles április - május, illetve szeptember - október hónapok között 40% az eltérés.

Az országban a villamosenergia-termelés 90%-át vízerőművek biztosítják, azonban más kiegészítő energiaforrások lehetőségeit azért vizsgálják, mert az energiaellátás ilyen módon nagyon szoros kapcsolatban van a lehulló csapadék mennyiségével. Az atlanti parton koncentrálódó szélparkok energiatermelése időben biztosan a csapadékeloszlásához illeszkedik, tehát a szélerőenergia ipari méretű alkalmazása nem fogja az ország ilyen jellegű problémáit megoldani.

Szomália

A Szomáliai-félszigeten kiválasztott területek Izlandhoz hasonlóan szélklimatológiailag különleges helyzetűek (É10° K45°, É10° K47,5°, É10° K50°). A szárazföld előterében, az Arab-tengeren az év nagy részében igen erős passzát szél fúj, amely az év során irányt változtat. A monszun hatás alatt álló térségben az éves szélindexek szórása más területekre összevetve igen kicsi (közel 3%), ami kedvező vonás. Az utóbbi 20 és 50 év tendenciája pozitív, azaz a kihasználható szélenergia potenciál igazából növekvő. A havi szélindexeknek azonban itt rendkívül nagy a szórása (35%). A „középső” grid esetén a legszelesebb és a legkevésbé szeles hónapok szélességének köbei között több, mint harmincszoros eltérés mutatható ki. Az év egyes időszakában túl gyenge a szél energiája, más időszakokban pedig túl erős. A szélerőenergia hasznosítás szempontjából mindkét vélet hátrányosnak tekinthető.

India

India a szélerőenergia hasznosításban példaértékű fejlődő ország, szélerőenergia piaca a 4. legnagyobb volt 2006-ban. Csak abban az évben 1800 MW-nyi új szélenergia kapacitás létesült, tehát fejlődése dinamikus (GWEC, 2007). Indiában két helyszínen koncentrálódnak a szélenergia-erőművek, egyrészt az ország északnyugati területén, a Kutch-

öböl térségében, Gujafat tartományban, illetve a Dekkán-félsziget déli részén, Kerala tartomány keleti, míg Tamilnadj tartomány nyugati oldalán. A hatalmas területű országban az általunk választott régió a szubkontinens déli részének szélviszonyairól tájékoztat. Ez három grid ($\text{É}12,5^\circ \text{K}75^\circ$, $\text{É}12,5^\circ \text{K}77,5^\circ$, $\text{É}12,5^\circ \text{K}80^\circ$) hiába van egymáshoz nagyon közel, mégis lényegesen eltérőek a szél tulajdonságai. A középső (a szárazföldre eső) és a keleti grid (Bengáli-öböl) esetén a szél sebességének évi két maximuma, és két minimuma van. Az elsődleges maximum júliusban, a másodlagos januárban van, míg gyengén szelesek az átmeneti hónapok. Ezzel szemben az Arab-tenger felőli oldalon a szél csak a nyári monszun idején (július) erősödik meg, az év többi időszaka szélcsendes. A legszélcsendesebb hónap a Dekkán-fennsík nyugati oldalán január, a szárazföldön április, míg a keleti területen október. Ezen területeken, ezekben a hónapokban nagy valószínűséggel nem használják ki teljes névleges kapacitásukat a szélérőművek.

A szubkontinens déli részén az 50 éves átlaghoz számított éves szélindex szórása Brazília után itt a legnagyobb, eléri a 10%-ot a választott 3 grid közül a középsőben. Évről évre, de láttuk havonta is nagy különbségek lehetnek a szélérőművek hozamában. A kiugróan magas szélesebségű hónapok szélindexe eléri a 200%-ot. Összeségében Indiában a szélenergia ipari méretű hasznosítása kockázatosabb üzlet, mint akármelyik általunk elemzett mérséklet övi ország területén, azonban a kontinens méretű országban a szélesebségben mutatkozó területi különbségek a hálózat egészének szabályozása terén akár kedvező vonás is lehet.

Kanada

Kanada azon néhány ország sorába tartozik, ahol a szélérőmű kapacitás meghaladja az 1000 MW-ot. Nagyon gyors fejlődését példázza, hogy ebben az országban csak 2006-ban 768 MW-nyi szélérőművet állítottak üzembe. A legtöbb szélérőmű sorrendben Alberta, Ontário és Quebec tartományban üzemel. A kiválasztott grillek a Labrador - félszigeten, a Szent-Lőrinc folyó torkolatától északra találhatók ($\text{É}52,5^\circ \text{NY}70^\circ$, $\text{É}52,5^\circ \text{NY}72,5^\circ$, $\text{É}52,5^\circ \text{NY}75^\circ$) Quebec tartományban. A jövőbeli fejlesztések első sorban erre a területre fognak koncentrálni. Ez nem csak a kedvező adottságoknak köszönhető, hanem a tartomány igen ambíciózus támogatási programjának. Quebec ugyanis 2015-ra 4000MW-nyi szélérőmű kapacitás elérését tűzte célul.

Választott gridjeinkben Dániával összevetve az átlagos szélesebség ugyan alacsonyabb, azonban az éves szélindexek szórása az eddig vizsgált térségek közül itt a legkisebb, alig 3%. A szélenergia-potenciál igen biztosan áll rendelkezésre, szélérőművek villamosenergia-termelése rendkívül egyenletes. Az éves szélindexek 1986-2005 közötti tendenciája pedig nagyon kis mértékű, de pozitív irányú változást mutat. Ezen túl a kanadai szélenergia piac azért is kedvező, mert az éven belül az általunk vizsgált területek közül itt a legkisebb a szélesebség ingadozása. Ez az adottság a beruházások megtérülésének kalkulációjánál rendkívüli előny. A szél januárban a legerősebb és júliusban a leggyengébb. A kiugróan extrém szeles hónapok a havi szélindex alapján a sokéves átlag alig kétszerese. Ezzel szemben Dániában, vagy Izlandon az ehhez hasonló érték jóval nagyobb.

Összegezve megállapíthatjuk, hogy Kanada jövőbeli fejlődése a szélenergia hasznosítás terén egyáltalán nem megalapozatlan, hiszen a kihasználható erőforrás igen meg-

4.3. táblázat. Kiválasztott területek éves szélindexének szórása és az idősorra illesztett trendegyenes meredeksége 1986-2005 között

Ország	Koordináták	Szélindex szórása [%]	Trend
Dánia	É55°K7,5°	5,66	-0,0091
Dánia	É55°-K10°	5,71	-0,0216
Dánia	É55°-K12,5°	5,87	-0,0270
Portugália	É40°-NY7,5°	5,13	+0,0105
Spanyol	É40°-NY5°	4,20	+0,0161
Spanyol	É40°-NY2,5°	4,90	+0,0031
Izland	É65°-NY20°	5,38	+0,0136
Izland	É65°-NY17,5°	4,92	+0,0209
Izland	É65°-NY15°	4,79	+0,0207
Brazília	0°-NY52,5°	13,62	-0,0219
Brazília	0°-NY50°	10,83	-0,0040
Brazília	0°-NY47,5°	9,28	+0,0190
Szomália	É10°K45°	4,30	+0,0210
Szomália	É10°K47,55°	3,67	+0,0170
Szomália	É10°K50°	3,92	+0,0091
India	É12,5°K75°	8,13	-0,0352
India	É12,5°K77,5°	10,69	-0,0066
India	É12,5°K80°	4,55	-0,0152
Kanada	É52,5°NY70°	3,73	+0,0024
Kanada	É52,5°NY72,5°	3,48	+0,0025
Kanada	É52,5°NY75°	3,38	-0,0026
Magyarország	É47,5°K17,5°	7,41	+0,0100
Magyarország	É47,5°K20°	7,47	+0,0254
Magyarország	É47,5°K22,5°	9,04	+0,0070

bízhatóan áll rendelkezésre és az értékesített villamos energiából származó bevételek hónapról hónapra közel egyenletesek.

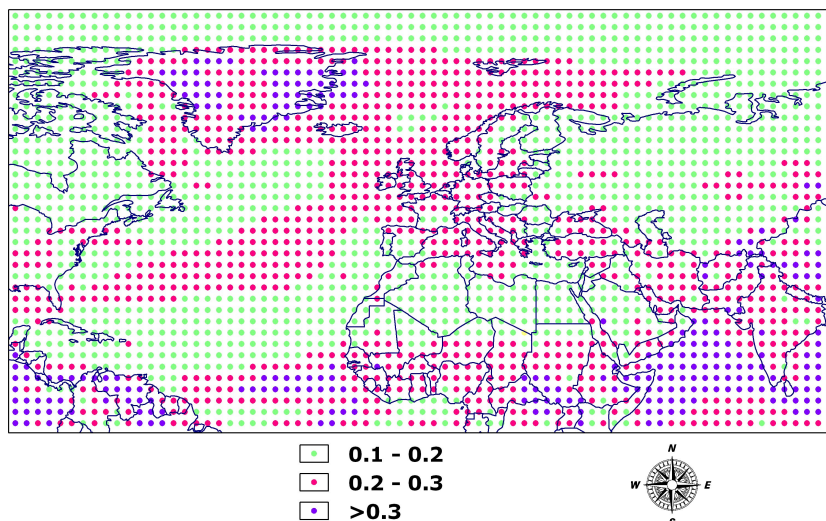
Az eddig tehát 7 olyan régiót emeltünk ki a vizsgált északi negyedgömb területéről, amelyek az szél energetikai célú hasznosítása, vagy egyszerűen klimatológiai jellegzetességei alapján voltak érdemesek részletesebb elemzésre. Alapvetően az általunk 1956-2005 évek átlagához viszonyítva számított éves és havi szélindexek alapján hasonlítottuk össze ezen régiókat. A szélindex relatív értéként (%-ban kifejezve) mutatja meg, hogyan viselkednek az egyes évek és hónapok területük sokéves átlagához viszonyítva. A kiválasztott régiók havi és éves szélindexeinek jellemző értékeit összefoglalóan a 4.3 és 4.4 táblázat mutatja.

A Magyarország területét érintő gridek hasonló adatait a következő fejezetben tárgyaljuk.

Végezetül az 4.23 ábrán az utolsó 20 év, 1986-2005 közötti havi szélebség átlag és szórás értékeiből számított variációs tényező eloszlását mutatjuk be. A variációs tényező (?? egyenlet) kategóriái alapján látható, hogy az északi negyedgömbön gyakorlatilag nincs olyan hely, ahol a havi értékek nincs menete. Ezen túl jól körül-

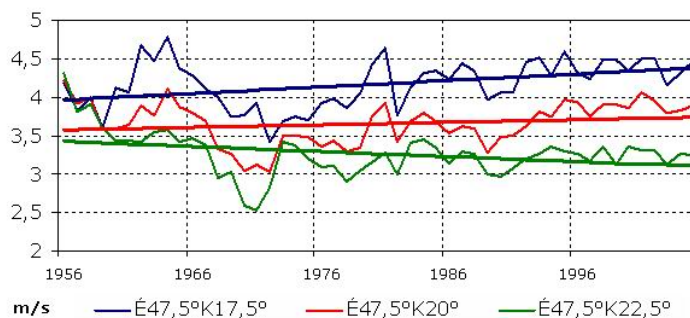
4.4. táblázat. Havi szélindexek jellemző értékei a kiválasztott területeken

Ország	Szórás	Max hónap	Max [%]	Min hónap	Min [%]	Absz.max
Dánia Ny	15,78	január	121	május	82	181
Dánia	14,49	január	120	május	83	179
Dánia K	13,07	január	117	május	84	180
Portugália	9,14	december	114	szeptember	81	171
Spanyolo. Ny	12,20	február	115	szeptember	84	177
Spanyolo. K	12,99	február	117	június	83	174
Izland Ny	18,56	január	123	július	70	160
Izland	18,42	január	122	július	71	157
Izland K	18,39	január	122	július	71	161
Brazília Ny	14,41	október	121	június	80	182
Brazília	17,72	október	133	május	79	191
Brazília K	21,60	szeptember	137	április	76	171
Szomália NY	27,90	július	147	május	56	176
Szomália	32,15	július	162	május	51	199
Szomália K	35,50	július	168	október	55	193
India Ny	37,61	július	156	január	51	214
India	25,92	július	140	április	63	202
India K	16,58	június	122	október	67	156
Kanada Ny	6,91	január	109	július	88	147
Kanada	7,08	január	109	július	88	148
Kanada K	6,89	január	108	július	88	150
Magyarország Ny	13,53	február	116	augusztus	79	177
Magyarország	12,50	február	115	augusztus	81	173
Magyarország K	13,34	február	114	augusztus	80	198



4.23. ábra. 1986-2005 közötti havi szélességből számolt variációs tényező földrajzi eloszlása

határolható térségekben jelentős a havi szélesség és ebből eredően a havi fajlagos szélteljesítmény változékonysága. Főként Közép- és Dél-Amerkában, Afrika nyugati és keleti területein, illetve az Indiai-óceánon és az öt övező szárazföldeken a legnagyobb mértékű. Összeségében akár szigetüzemben, akár villamos hálózatra csatlakozva működő szélenergiahasznosítók használják a légmozgások energiáját, számolni kell azzal, hogy teljeskörű ellátást képtelen lesz megoldani.



4.24. ábra. A szélesebbség éves átlagos értékei Magyarországon 1956-2005 között

4.2. Magyarország szélklímája

Ebben a fejezetben bemutatásra kerülő eredményeink azt a célt szolgálják, hogy az általunk felhasznált adatbázisok sajátosságaiból eredően új megközelítéssel egészítsük ki az eddigi, hasonló tárgyú vizsgálatokat. Célunk volt az, hogy további klimatológiai háttérinformációkkal segítsük elő a magyarországi szélenergia-potenciál hasznosítását, és az ezzel kapcsolatos politikai és műszaki szabályozási döntések meghozatalát. Végül javaslatot tegyünk a szélenergia-hasznosítás jövőbeli fejlesztési lehetőségeire ismerve a szélenergia potenciál lehetőségeit.

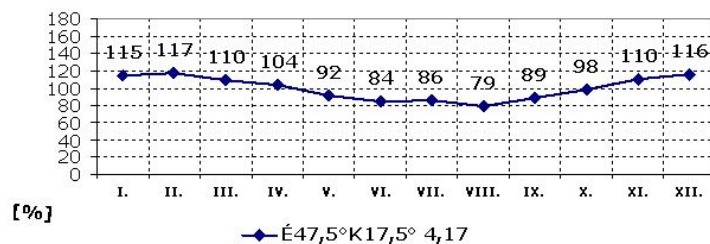
4.2.1. NCEP / NCAR reanalízis alapján

A makroskálájú reanalízis modell 1956-2005 közötti 50 év adatainak felhasználásával következtetéseket vonhatunk le a szél tulajdonságairól Magyarországra vonatkozóan. Célunk, hogy megvizsgáljuk hogyan és milyen mértékben térnek el szélviszonyaink a világ más tájaival összevetve.

A nyugati grid középpontjának földrajzi koordinátája északi szélesség 47,5°, nyugati hosszúság 17,5°, amely grid a Dunántúlt, a középső grid (É47,5° Ny20°) az Alföld területeinek jelentős részét, a keleti grid (É47,5° Ny22,5°) a Tiszántúlt, illetve Magyarországtól keletre található területeket fedi le.

Az általunk vizsgált talajközeli szinten a három grid 50 éves átlagos szélesebbége nyugatról keletre haladva csökken (4,17 - 3,66 - 3,27 m/s.) Értékében és térbeli helyzetét illetően hasonló a Magyarországra vonatkozó korábban készített széltérképek adataival. A szélesebbség ilyen térbeli eloszlása alapján hazánk keleti területein azonos rotorátmérőjű és generátor teljesítményű szélerőműveket célszerű magasabbra építeni, mint az ország nyugati régióiban. Természetesen ezt csak több szintben végzett energetikai szélmérésekkel adataival lehet pontosítani.

Az 50 év éves átlagos szélesebbségének idősorát, illetve annak trendjét az 4.24 diagram mutatja. Látható, hogy az ország nyugati és középső területein a szél éves átlagos sebessége, ha nagyon kis mértékben, de emelkedő tendenciát mutat. Ezzel szemben az ország kelet részein inkább mérsékleten csökken. Az utolsó húsz év esetén,



4.25. ábra. A havi szélindex 50 éves átlagos értékei Magyarországon (1956-2005).

azonban mind a három grid területén az éves átlagsebességekre illesztett egyenes pozitív irányú változást mutat (4.3 táblázat). Véleményünk szerint összességében nincs szignifikáns, egyirányú változás a szélesebesség éves átlagaiban. Az általunk vizsgált 50 éven belül elsősorban a választott időszaktól függ, hogy épp milyen irányú változást találunk.

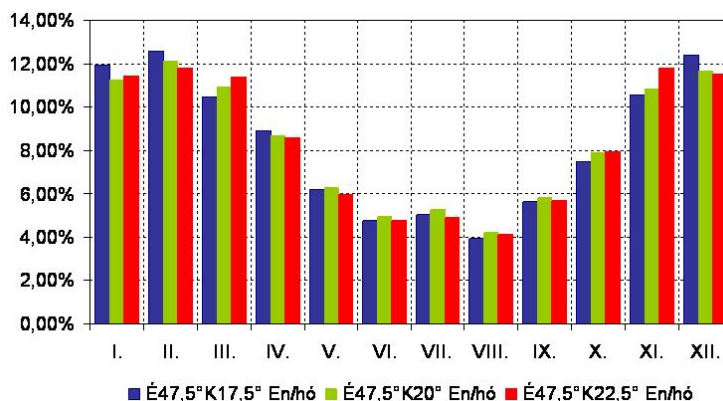
Az ötven év egyes éveinek szélindexének szórása nyugatról keletre haladva nő (4.3 táblázat). Az értékek elmaradnak a trópusi területek hasonló mérőszámaitól, de sajnos magasabbak, mint a dán, illetve portugál-spanyol területek adatai. Úgy gondoljuk, hogy az NCEP / NCAR reanalízis adatai szerint hazánkban évről évre statisztikailag sokkal pontatlanabbul lehet becsülni a szél átlagos sebességét, a légmozgások energiatartalmát, illetve a technikailag kinyerhető hozamokat, mint Dániában, vagy az Ibéria-félszigeten. Ez azt jelenti, hogy hazánkban az 1 éves energetikai szélmérések információtartalma túlságosan kevés annak megítélésére, hogy a tervezett szélerőmű mennyi villamos energiát fog évről évre termelni. Véleményünk szerint ezt a meteorológiai ténytet a beruházóknak, a rendszerirányítóknak, illetve a politikai döntéshozóknak tudomásul kell venniük.

Az éven belüli változásokról a havi szélindex tájékoztat (4.25 ábra).

Hazánkban a szélesebességének havi menete novembertől áprilisig az ötven éves átlagnál magasabb, májustól szeptemberig az átlagosnál gyengébb. Az októberi havi szélesebesség átlaga illeszkedik a legjobban az ötven év átlagos szélesebességéhez.

A havi szélindex szórása a három gridben kedvezőbb, mint a hasonló dán adatok, a Nyugat-Magyarországot jellemző gridben a spanyolországi adatokkal hasonló nagyságrendű. Klimatológiai szempontból a magyarországi szél havi változékonysága kisebb kihívást jelent a magyarországi rendszerirányítóknak, mint a dánoknak. Míg nálunk a szélesebesség éves átlaga változékonyság, addig Dániában a havi értékek között vannak jelentősebb eltérések.

A havi szélindex 50 éves átlaghoz viszonyított maximális értéke nyugatról keletre haladva: 177 - 173 - 198%. Az ország nyugati és középső régióiban ez a relatív érték elmarad a dániai hasonló adatoktól, hazánk középső részén a spanyolországinál is alacsonyabb. Ezzel szemben az ország keleti részén kiugróan magas érték a negyedik legmagasabb volt az általunk részletesen vizsgált nyolc régióban található huszonegy grid közül. A szélesebesség köbével számolva ez azt jelenti, hogy 1958 februárjában majdnem nyolcszor nagyobb volt a szél energiatartalma, mint az 1956-2005 februárjaiban átlagosan.



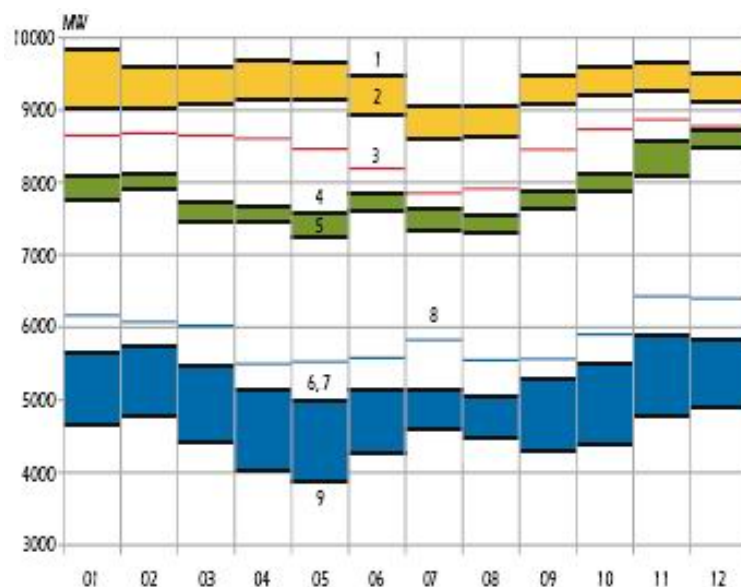
4.26. ábra. A szélesebesség köbeinek relatív havi eloszlása 1956-2005 között Magyarországon (12 hónap = 100%)

A szél energiatartalma a szélesebesség köbével arányos. A magyarországi három grid havi szélesebesség adatainak köbeinek éven belüli eloszlását 4.26 ábra mutatja meg.

Látható, hogy a téli, illetve kora tavaszi hónapokban több, mint kétszer, háromszor nagyobb a szélesebesség köbe, mint a nyári hónapokban. Magyarországi szélviszonyok között egy széleenergia hasznosító berendezés télen havonta több, mint kétszer, háromszor annyi elektromos áramot termelhet, mint nyáron. Az eltérés még nagyobb, ha tekintetbe vesszük azt, hogy télen a levegő sűrűsége nagyobb.

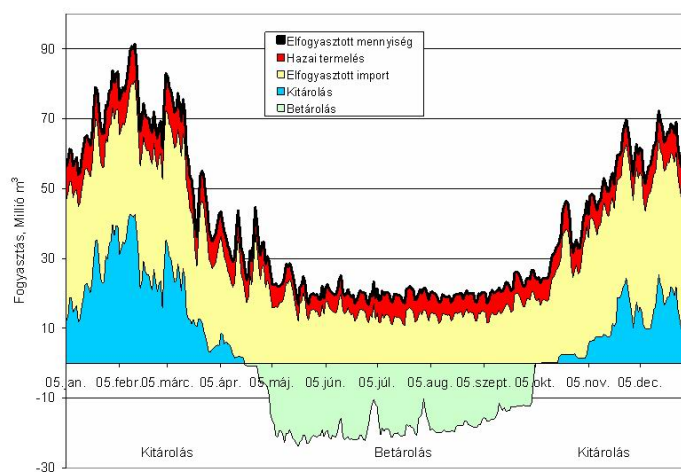
A magyar villamosenergia-rendszer 2005 évi havi terhelési diagramját bemutató 4.27 ábra szerint az elektromos áram fogyasztásban a különböző hónapok között még 10%-os mértékű eltérés sincsen. A fogyasztásnak elsődleges maximuma téli időszakban van, de kimutatható egy nyári másodlagos is. A 4.26 és 4.27 diagramokat együtt vizsgálva megállapíthatjuk, hogy Magyarországon a szélesebesség köbének havi eloszlása - amely nagyjából azonos a széleenergia potenciál havi eloszlásával- és az elektromos áramfogyasztás havi eloszlása nem illeszthető egymással harmonikusan össze. A hazai szélviszonyok között a szélerőművek télen többet, nyáron kevesebbet termelnek, mint amennyire az elektromos áram fogyasztás jelenlegi strukturája szerint szükség lenne. El kell ismernünk, hogy hazai, illetve európai széleenergia-potenciál éven belüli változása nem egyezik a jelenlegi elektromos áramfogyasztás havi ingadozásaihoz.

A magyarországi energiafogyasztásban legnagyobb mértékben felhasznált energia-hordozó a földgáz. A teljes energiafogyasztás több, mint 40%-át teszi ki. A lakások fűtésétől, használati melegvíz előállításától elkezdve elektromos áramtermelésig nagyon sokféle célra használjuk. A földgáz fogyasztásának éven belüli menetét az 4.28 ábra mutatja be. A fűtési energia felhasználás miatt a földgáz fogyasztásnak téli maximuma van. A földgáz fogyasztás éven belüli havi menete és a szélesebességek köbeinek éven belüli havi menete sokkal nagyobb hasonlóságot mutat egymással, mint az villamosenergia-fogyasztás havi menetével. Véleményünk szerint a széleenergia hasznosítását akkor lehetne minden korábbi tervben szereplő értéknél sokkal



4.27. ábra. A magyar villamosenergia-rendszer (VER) havi terhelési görbéje 2005-ben (MVM, 2006)

1. Beépített teljesítőképesség, 2. Rendelkezésre álló teljesítőképesség, 3. Változó rendelkezésre álló teljesítmény, 4. Igénybe vehető teljesítmény, 5. Ténylegesen igénybe vehető teljesítmény, 6. Fogyasztói csúcsterhelések átlaga, 7. Próbaüzem nélküli átlagterhelés, 8. Csúcsterhelések napi maximuma, 9. Csúcsterhelés átlaga hazai erőművekből



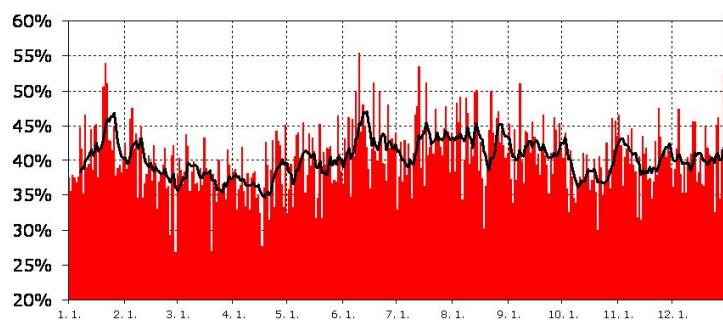
4.28. ábra. Napi földgáz fogyasztás, felhasználás 2005-ben

nagyobb szintre emelni, ha hazánkban, illetve Európában képesek lennénk elterjeszteni olyan technológiákat, amelyek közvetlenül vagy közvetetten fűtésre hasznosítanak a szél energiáját. A diverzifikált energiatermelés egyben azt is jelentené, hogy ösztönözzük az olyan energiatermelő, illetve energiátároló technológiákat, az intelligens energiarendszereket (Bessenyei, 2007; Kádár, 2007), melyek képesek együttműködni az időjárás függő megújuló energiaforrásokkal, és egyben ez tenné lehetővé ezek zökkenőmentesebb villamosenergia-rendszerbe illesztését. Szerintünk mind addig, amíg tudatosan nem alakítjuk át villamosenergia-fogyasztási szokásainkat, addig a szélerő energia hasznosító kapacitások bővítése elé mindig is akadályokat fog gördíteni a VER irányítója.

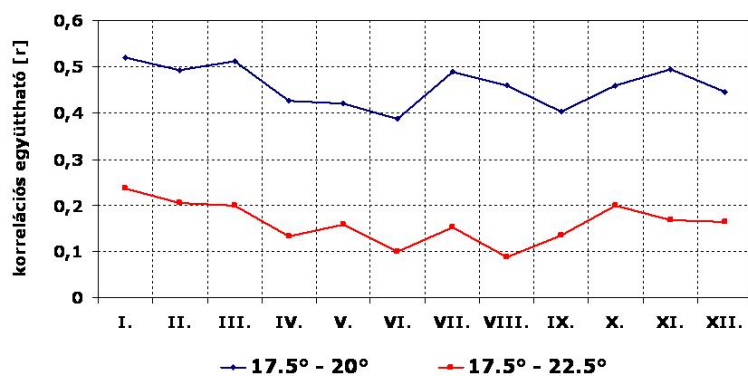
Az NCEP / NCAR reanalízis napi szélesebesség adatsorát 1956-2005 között vizsgáltuk arra a kérdésre keresve a választ, hogy vajon számszerűen átlagosan milyen mértékben térnek el az a napi szélesebesség átlagok az 50 éves napi átlagos szélesebességtől. Ennek a kérdésnek Magyarországon jelenleg a 389 kormányrendelet ad aktualitást. A 2008. január 1.-től érvényes előírások szerint a szélerőmű üzemeltetőknél az új KÁT mérlegkör tagjaként menetrendadási kötelezettségük van. Pénzügyi szankcióval is sújtják azokat, akik a havi menetrendtől $\pm 30\%$ -ban eltér. A napi, heti és havi készítendő menetrend egyik része a szélerőmű üzemeltetők eddigi energiatermelési tapasztalatain alapulhatnak. Ha ez nem áll rendelkezésre (például csak néhány hónapos próbaüzemen van túl az erőmű), akkor esetleg sokéves szélesebesség statisztikákból, illetve időjárási előrejelzések adataiból tehetnek nem túl biztos becslést. Az NCEP / NCAR reanalízis térbeli felbontása révén eredeti formájában alkalmatlan akár egyes szélerőművek energiahozamának kellő részletességű és pontosságú becslésére, azonban összességében a szélerőműveket tömörítő zöld mérlegkör irányítóját tájékoztatja arról, hogy például a nyugat - magyarországi szélerőművek együttesen termelése milyen szabályozási beavatkozást igényel a villamosenergia-rendszer biztonságos üzemeltetése érdekében. A globális reanalízis modelleken és analízis mezőkön alapuló időjárási előrejelzések szélesebességre vonatkozó térbeli felbontása és bizonytalansága révén tehát elsősorban a rendszer irányítóját tájékoztathatja a várható szabályozási eseményekről és nem a szélerőművek üzemeltetőit.

A napi átlagos szélesebességek és a szélesebességek 50 éves napi átlagtól való átlagos eltéréseinek százalékos arányát a 4.29 ábra mutatja be a nyugat-magyarországi grid esetén. 50 éves statisztikai adatok alapján látható hogy az eltérés átlagosan kb. 40%. Csak szélstatisztikai adatokból 40%-os hibahatárral tudnánk megmondani azt, hogy egy igen nagy területű gridben egy adott napon mekkora lesz a szél sebessége. Minél kisebb területre számolunk, illetve a szélesebesség mellett tényleges villamosenergia-termelést is kalkulálni kell, akkor a köbös összefüggés miatt a hiba lényegesen nagyobb lesz. Tehát csak statisztikai adatok felhasználásával csak rendkívül nagy pontatlansággal lehet előrejelezni azt, hogy mekkora lesz a szél energia tartalma naponta. Érdekes és egyben érdemes tudnunk, hogy az eltérést bemutató diagram az élénk légmozgású tavaszi hónapokban minimummal rendelkezik, míg télen és nyáron nő a becslés bizonytalansága.

Végül megvizsgáltuk, hogy milyen kapcsolat van az ország nyugati, középső és keleti oldalát jellemző gridek között 1956-2005 közötti ötven év átlagában havonta (4.30 ábra). Megállapítható, hogy nyugati területek szélesebessége laza kapcsolatban van a középső országrész szélviszonyaival, és igen laza kapcsolat mutatható ki a keleti térségekkel. Az összefüggésnek az éven belül jellegzetes menete van. Általában télen



4.29. ábra. A szélesség napi átlagtól való átlagos eltérése %-ban kifejezve 1956-2005 időszakot alapul véve



4.30. ábra. Összefüggés a magyarországi területek napi szélessége között 1956-2005 között havonta

lehet szorosabb a kapcsolat, amely nyár elejére elenyészővé válik. Ez a megállapítás arra a problémára ad választ, hogy vajon a szélerőművek földrajzilag elszórt telepítése segítheti a VER fogyasztáshoz illeszkedő szabályozását. Összességében válaszunk igen, mert magyarországi területen sem fúj mindenhol egyszerre a szél.

4.2.2. SODAR mérések alapján

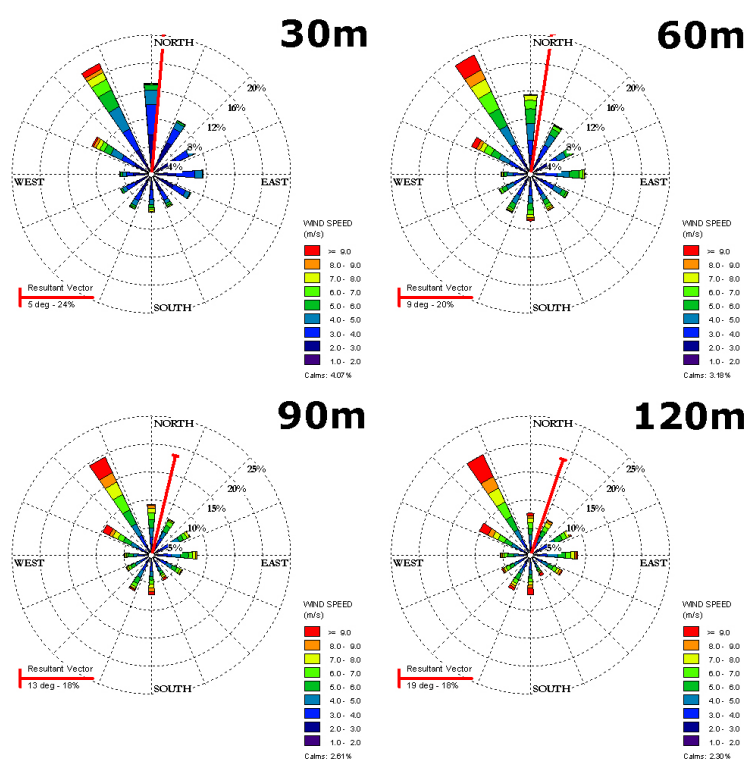
A Budapesten, Pakson, Szegeden 2003-2004 között SODAR-ral végzett expedíciós mérések elemzésével arra a kérdésre kerestük elsősorban a választ, hogy hogyan változnak a magassággal a szél tulajdonságai, milyen tényezők befolyásolják a szélprofilok irányfüggését az adott megfigyelőhelyeken, illetve hogyan változik a szélesebbesség napi menete különböző magasságban összefüggésben a magyar villamosenergia-rendszer átlagos terhelésével.

A szélirány és szélesebbesség változása a magassággal

Az elemzéseket 30 m magasságtól az onshore szélenergia hasznosítás igényeinek megfelelő 120 m-ig, 7 magassági szint adatai alapján végeztük. Európai szabályozás szerint a szárazföldön telepíthető szélerőművek a rotorlapátok hosszával együtt mért teljes magassága nem haladhatja meg a 150 métert, tehát a 120 m magasságban mért széladatok a jelenleg legnagyobb szárazföldön telepíthető szélerőművek tengelymagasságára jellemző légmozgásokról tájékoztatnak. A SODAR mérések a magyarországi szélenergia potenciál felmérését szolgáló kutatás keretében zajlottak és egy-egy helyszínen néhány hónapig tartottak (3.1 táblázat).

A különböző magassági szintek szélirány gyakorisága 12 irányszektorra, egyenként 30°-os intervallum alapján lett kalkulálva (4.31 ábra, 4.32 ábra és 4.33 ábra). Az ábrákon minden irányban a szélesebbesség eloszlását is megjelenítjük 1m/s pontossággal. Ilyen módon nem csupán a leggyakoribb, ún. uralkodó szélirányok rajzolódnak ki, hanem az energetikai szempontból fontos, nagyobb átlagsebességgel jellemezhető, ún. jellemző szélirányok is (Tar, 2004). Ezen túl a szélirány gyakoriság és az irányonként mért átlagos szélesebbeségek segítségével számított eredő szélirány is megjelenik (4.31 ábra, 4.32 ábra és 4.33 ábra).

A Budapesten végzett szélprofil mérések 2003. április és június között zajlottak. A tavaszi, nyár eleji időszakban az északnyugati irányú szelek voltak a leggyakoribbak minden magasságban (4.31 ábra). Egyre nagyobb magasságban az északnyugati szélirány uralkodó jellege még markánsabb, míg a talajhoz legközelebb az északi irány gyakorisága mutatkozik számottevőnek. Műszaki szempontból kedvező adottság, hogy a leggyakoribb szélirányok közel esnek egymáshoz, hiszen kisebb energiaráfordítást igényel a szélerőművek irányba forgatásának művelete. Általában az uralkodó északnyugati szélirány rendelkezik a legnagyobb átlagsebességgel és köbös összefüggés révén a legnagyobb potenciális energiatartalommal. Az irányonkénti szélesebbesség eloszlásból látszik, hogy 120 m-en az egyébként nem túl gyakori délies szélirányú légmozgások energiatartalma számottevő. Az élénk szelekkel jellemezhető április folyamán ezek a szélirányok általában délután - kora esti órákban voltak gyakoribbak. Ezek a szélirányok május, június hónapban elhanyagolható jelentőségűek voltak, noha áprilisban energiatartalmuk vetekedett a délelőtti órákban gyakori északi-északnyugatis



4.31. ábra. A szélirány és -sebesség eloszlás Budapesten 30-120 m között SODAR mérések alapján

irányok energiatartalmával. A szélirány előfordulásának gyakoriságától és átlagos sebességtől függő eredő szélirány Budapesten egyre magasabban az Ekman összefüggést követve összességében 13° -kal fordult jobbra.

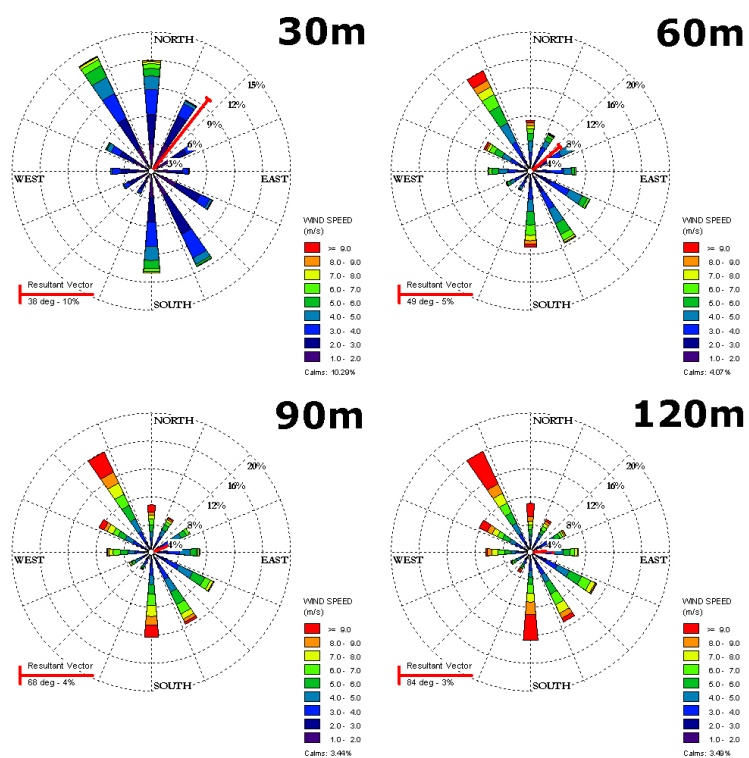
A vizsgált 3 hónap alatt a szélesebbség átlagos értékei között jelentős különbségek voltak. A SODAR mérések alapján energetikailag 2003-ban az április volt meghatározó, míg május és június folyamán mind az átlagos szélesebbség, mind a légmozgások energiatartalma jelentősen mérséklődött. Az NCEP / NCAR reanalízis általunk vizsgált havi szélindex adatsora alapján az ország középső területén 2003 áprilisa 116% volt, május 91%, míg június 66% az 50 éves havi átlaghoz viszonyítva, azaz 2003 áprilisa e szerint is átlagosnál szelesebb volt.

Budapesten a szélcsend és a 3 m/s-nál kisebb szélesebbség tartomány gyakorisága még 120 m magasságban is több, mint 20%, amely talaj közelében (30 m) eléri a 45%-ot is. E szerint a talaj közelében (< 30 m) reálisan csak jóval alacsonyabb indítási sebességű eszközöket alkalmazhatunk gazdaságosan a szélben rejlő energia kinyerésére. Hazánkban a soklapátos, lassújárású szélerőgépek tudják igazán ezt a szélerőpotenciált kihasználni.

A szél fluktuáló jellege mellett a szélerőmű jól körülhatárolható szélesebbség tartományban termel villamos energiát. A szárazföldi viszonyokra fejlesztett modern szélerőművek alacsony indítási sebességűek, általában 3 m/s szélesebbségnél lépnek működésbe, névleges teljesítményüket a terület átlagos szélesebbségének közel kétszeresénél adják le és 25 m/s feletti viharok esetén állítják le termelésüket. A szélesebbség eloszlás és a szélerőmű műszaki tulajdonságai határozzák meg, hogy egy szélerőmű egy év alatt rendelkezésre álló idő hány százalékában fog ténylegesen villamos energiát hálózatra termelni. A szélesebbség eloszlás ismeretében számított kapacitás kihasználtsági tényező (k) értéke döntő paraméter a szélerőmű gazdaságosságának megítélésénél, illetve a beruházás megvalósíthatóságának vizsgálatánál. Az európai kontinensen értéke átlagosan 23-25%, amely még a kiváló offshore telephelyeken sem emelkedik 40-45% felé (IEA, 2005). Amennyiben a vizsgált időszakban a budapesti mérőhely közelében üzemelt volna egy VESTAS V90 1.8 MW névleges teljesítményű, 105 m magas tengelymagasságú szélerőmű, akkor a helyszíni, 105 m magasságban végzett szélmerések alapján éves kapacitástényezője 20% alatt maradt volna (19.2%).

A SODAR felállításának budapesti helyszíne nyilvánvalóan nem csupán energetikai szempontból nem tekinthető a legoptimálisabb telephelynek egy szélerőmű számára. A kalkulált kihasználtság ugyan az európai átlagtól elmarad, de magyarországi tapasztalatok szerint nem a legrosszabb. Mindenesetre, ha pontosan ismerjük a szélesebbség eloszlását, találhatunk olyan optimális szélerőmű típust, optimális tengelymagasságot, amely a helyi adottságokat a legjobban kiaknázza (Hunyár et al., 2002).

A 4.32 ábrán a Pakson 2003 október 10. és 2004. február 29. között SODAR-ral megfigyelt adatsor hasonló módszerű feldolgozásból származó eredményei kerülnek bemutatásra. Pakson a talaj közelében mind az északnyugati-északi, mind a déli-délkeleti szélirányok igen nagy gyakoriságban fordulnak elő. Ez a sajátosság egyrészt a légmozgások szempontjából kulcsfontosságú helyi domborzati elem, a Duna-völgy elhelyezkedésének köszönhető, másrészt hazánk időjárását meglehetősen gyakran déli irányból érkező ciklonok frontjai is alakítják. A légmozgások energiatartalma alapján azonban egyértelmű az északnyugati szélirány meghatározó jellege. A délies légmozgások főként délelőtt kulcsfontosságúak, míg a délutáni és esti periódusban legnagyobb



4.32. ábra. A szélirány és -sebesség eloszlás Pakson 30-120 m között SODAR mérések alapján

fajlagos szélteljesítménnyel az észak-északnyugati szélirányok rendelkeznek.

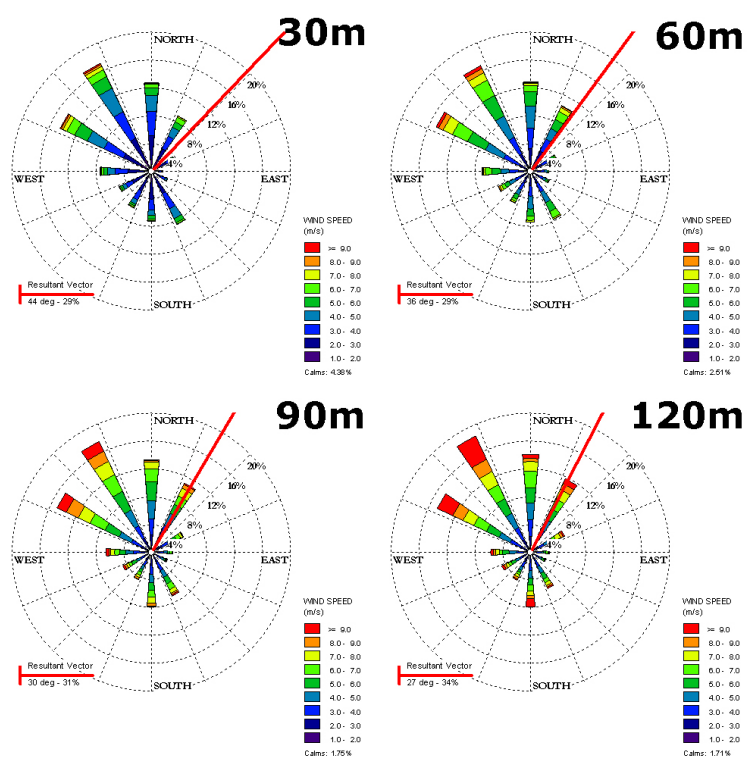
Pakson az átlagos szélesebség 120 m magasságban megközelíti a 6 m/s-ot, míg a talaj közelében az átlagos értékek a budapesti adathoz hasonlóan 3 m/s körül alakul. A paksi mérőhely a budapesti mérésekkel összevetve energetikai szempontból kedvezőbb helyszínnek látszik, mivel 120 m magasságban a szél energiatartalma már meghaladja a 220 W/m^2 nagyságrendet. A Vestas V90 1.8 MW névleges teljesítményű 105 m tengelymagasságú szélérőmű 25%-os kihasználtságot ért volna el, ha az átlagos szélesebség egész évben meghaladja 105 m magasan mért 5.6 m/s értéket. Sajnos a paksi SODAR mérések nem folytak 1 éven át, így a kapacitás kihasználtsági tényezőt csak becsülhetjük. A tapasztalatok szerint a Pakstól északra fekvő kulcsi Enercon E-40 600kW névleges teljesítményű szélérőmű átlagosan szeles évben jellemzően nem ér el 25%-nál magasabb éves kihasználtságot. Magyarázat lehet az, hogy általunk számított makroskálájú havi szélindexek 2003 novembere és 2004 februárja között rendre 114%, 125%, 115%, és 134% volt, azaz ezen hónapok az 50 éves átlagos értékeknél szelesebbek voltak.

A szegedi SODAR mérések adatsorából 2004 június és szeptember közötti mérési eredmények álltak rendelkezésünkre. A mérőműszert az OMSZ szegedi szinoptikus főállomásán helyezték el, a szegedi repülőtér közelében.

A szélirány gyakoriságok alapján jellemzően az északnyugati szelek uralma látszik a 4.33 ábrán. Szegeden a magasság növekedésével a délies irányok aránya csökken, míg az Alföldre jellemző északi, északkeleti légmozgások gyakorisága növekszik. Szélirányonkénti sebesséeloszlás szerint 120 m magasságban az északnyugati irány mellett a délies irányok esetén is relatívan számottevő a 9 m/s kategória gyakorisága. Részletesebb vizsgálatok szerint 2004 szeptemberében és átlagosan a délutáni-esti órákban növekedett meg a délies szélirányoknak a gyakorisága, és ekkor fajlagos energiatartalmuk meghaladta a gyakori északnyugati szelek jellemző 200 W/m^2 energiatartalmát 100 m felett. A szélirány és szélesebség gyakoriság eredőjeként számított eredő szélvektor közel 90 m magasságig az elméleti összefüggéstől eltérően balra fordult.

Szegeden az átlagos szélesebség 120 méteren éppen meghaladja az 5 m/s-ot, amely azt jelenti, hogy a 2004-es nyári hónapok energiatartalma ebben a magasságban elmaradt a Pakson tapasztalt értékektől ($140\text{--}160 \text{ W/m}^2$ 105 m és 120 m magasságban), azonban nagyságrendileg nem különbözött a budapesti adatoktól. Ismert, hogy a nyári periódus kevésbé szeles hazánkban, mint a téli, tavaszi időszak, ezzel is magyarázhatjuk, hogy a vizsgált hónapokban energetikai szempontból Szeged nem tűnt a legmegfelelőbb helyszínnek villamosenergia-hálózatra termelő, ipari méretű szélérőművek számára. A 4 hónapos mérés adatait alapul véve egy Vestas V90 105 méter tengelymagasságú, 90 m rotor átmérőjű, 1.8 MW névleges teljesítményű szélérőmű éves viszonylatban 20% körüli kihasználtságot tudott volna elérni a szegedi helyszínen. A reanalízis adatbázisból általunk számított havi szélindex értékek 2004 nyarán júniusban, augusztusban és szeptemberben átlagosan 15%-kal maradtak el az 50 éves átlagos értékektől, míg 2004 júliusa átlagosnak megfelelő volt.

A szélesebség gyakorisági eloszlásának közelítésére a gyakorlatban elterjedten a Weibull eloszlást használják (Hunyár et al., 2002). Ennek skála és alakparaméterei a rendelkezésre álló adatbázisból kalkulálható átlag és szórás ismeretében minden magassági szinten. A Weibull eloszlás k alakparaméterének magassággal történő változására Justus (1985) lineáris összefüggést alkalmazott, míg Wieringa (1986) felté-



4.33. ábra. A szélirány és -sebesség eloszlás Szegeden 30-120 m között SODAR mérések alapján

telezte, hogy a 60-80 m magasságban lévő szélnyírási zónáig k értéke növekszik, majd egyre nagyobb magasságban csökken (4.1).

$$k(h) = k_a + c(h - h_a)e^{-\frac{h - h_a}{h_m - h_a}} \quad (4.1)$$

ahol $h_m = 80\text{ m}$, $c = 0.022$ (Hunyár et al., 2006).

A SODAR mérések adatai alapján mi is kiszámítottuk a Weibull eloszlás alakparaméterét minden magassági szintre. A 4.34 ábrán mutatjuk be eredményeinket. Megállapíthatjuk, hogy a három helyszín esetében vannak közös vonások, de várakozásainktól merőben eltérő sajátosságok is.

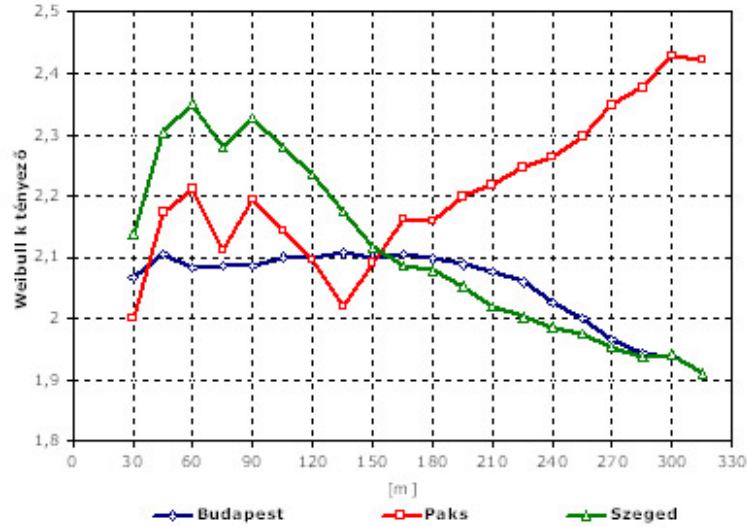
Egyrészt Budapesten a Weibull alakparaméter értéke tapasztalataink szerint $k = 2.1$, és közel 180 m magasságig értéke csak századértékekben változik (4.34 ábra). E fölött általános várakozásainknak megfelelően értéke csökken, azaz a szélesebbség eloszlás egyre szélesebb, miközben a csúcspont nagyobb szélességek irányába tolódik. Megállapíthatjuk, hogy Budapest esetén mintegy 180 m magasságig a szélesség különböző magasságban jellemző gyakorisági eloszlásának közelítésére a Weibull eloszlás $k=2.1$ alakparaméterrel számítva megfelelő. A c skálaparaméter, amely sebesség dimenziójú [m/s], a magasság függvényében növekedett (3.9 m/s - 30 m, míg 5.96 m/s - 120 m magasságban). Ennek eredményeként a 30 és 120 méter között a levegő potenciális fajlagos széltejesítménye közel háromszorosára nő (30 m - 47 W/m²; 120 m - 162 W/m²).

Pakson az alakparaméter magasság szerinti változása részben megfelel Wieringa feltételezésének, azaz értéke kezdetben nő, majd átlagosan 90 m felett csökken. Paks 135 m felett értéke várakozásainktól teljesen eltérően újra emelkedik (4.34 ábra) azaz eloszlás alakja egyre keskenyebb és csúcsosabb. Úgy gondoljuk a Pakson tapasztalt összefüggésben lehetnek a helyszín, a vizsált időszak, illetve a mérés technika sajátosságaival, de elsősorban a 120 m fölötti nagyszámú adatahiánnyal magyarázzuk. Pakson az eloszlás skálaparamétere (c) duplájára növekszik (3.09 m/s 30 m, míg 6.66 m/s 120 m magasságban). A fajlagos széltejesítmény ennek megfelelően 30 méteren 24 W/m²-ről 120 méterre közel tízszeresére, 224 W/m² értékre növekedik.

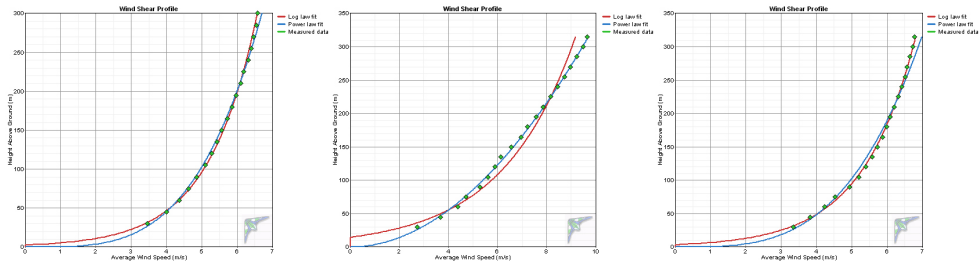
Szegeden az alakparaméter Pakshoz hasonlóan a talajhoz közeli rétegben növekszik, maximumát 60 m-nél veszi fel, másodlagos maximuma 90 m magasságban tapasztaltuk, majd értéke egyre csökken. A skálaparaméter (c) 30 m-en 3.77, 120 méteren 6.09 m/s értéket vett fel. A fajlagos energiatartalom 30 m magasságban Budapesthez hasonló, míg 120 m-en elmarad a Pakson számítottaktól.

A fenti vizsgálat alapján azt a megállapítást tehetjük, hogy általában 90 m magasság felett alkalmazható lineáris összefüggés a k alakparaméter magassággal történő változásának leírására, míg a talajhoz közeli légrétegek esetén célszerű Wieringa összefüggését (4.1) alkalmazni.

Összességében a SODAR által szolgáltatott expedíciós méréseknek köszönhetően Budapest, Paks és Szeged klímájáról lényegesen részletesebb információk állnak ma már rendelkezésünkre, amely új lehetőségeket teremt a terület szélklimatológiai és nem csupán energetikai szempontú értékelése számára.



4.34. ábra. Weibull k paraméter értéke a magasság függvényében



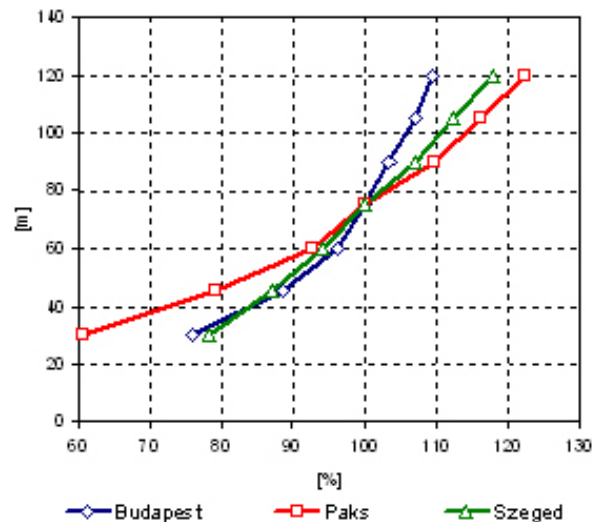
4.35. ábra. Átlagos szélprofil és közelítés függvényekkel Budapesten, Pakson és Szegeden

Átlagos és normalizált szélprofilok

Kétféle módon vizsgáltuk a SODAR mérésekből származó szélsébség adatokat. Egyrészt mind a 20 magassági szint adatai alapján kirajzolódó szélprofilot közelítettük ismert elméleti szélprofil összefüggésekkel: logaritmikus (2.1 egyenlet) és hatványkitevős formulákkal (2.2 egyenlet). Megvizsgáltuk, hogy a SODAR mérésekből meghatározott szélprofilok melyik elméleti összefüggéssel közelíthetők pontosabban.

A szélprofilon tapasztalható markáns töréspontok, vagyis amikor a szélsébség gradiense jellemzően megváltozik, jelzik a planetáris határréteg belső szerkezetét. A talajközeli, hozzávetőlegesen 100 m vastag légréteg az ún. Plandtl-réteg, ahol a felszín érdességéből eredő súrlódás hatása közvetlenül érvényesül. A hatványkitevős formulát gyakran alkalmazzák ebben a magasságban, míg a logaritmikus összefüggés a jellemző érdességi elemek felett nagyobb magasságban adhat jó közelítést.

A teljes adatsorból származtatott átlagos szélprofilok alakja (4.35 ábra) mind-



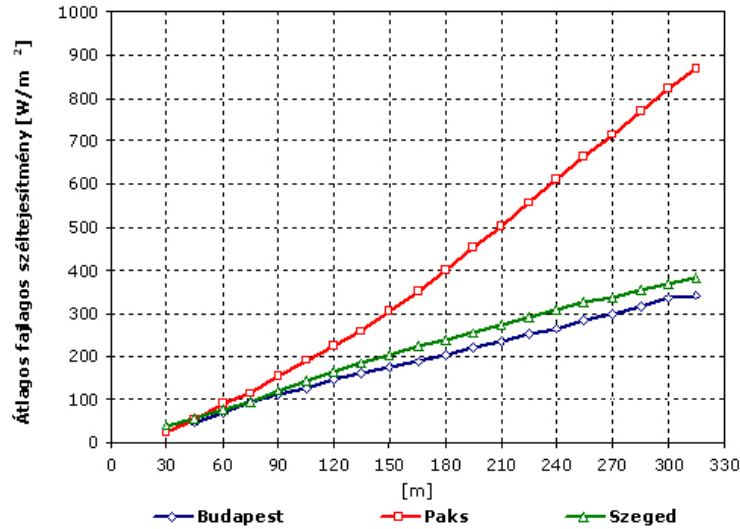
4.36. ábra. Normalizált átlagos szélprofil a leggyakoribb szélirány szektorban (275-315°) Budapesten, Pakson és Szegeden > 4 m/s szélesség esetén

három helyszínen a helyi hatások eredőjeként különböző. Budapesten 60 m magasság felett kiváló a logaritmikus összefüggés, míg Pakson a legrosszabb a logaritmikus megközelítése. Alapvetően minden magasságban, de döntően 120 m feletti magasságban a hatványkitevős összefüggés írja le a legjobban a szélesség változását. A szegedi szélprofil alakjában 75 m felett találunk markáns töréspontot. Itt a talaj közelében 75 méterig ítéltük pontosabbnak a hatványkitevős formulát, míg 90-315 m között 15 méteres lépésközzel a logaritmikus leírást.

A másik megközelítésben normalizált profilokat állítottunk elő a leggyakoribb, uralkodó szélirányokban (Mellinghoff et al., 2000). A normalizálásnál az adott szélirány szektorban a 4 m/s-nál nagyobb erősségű légmozgásokat vettük figyelembe, amely energiatermelés szempontjából kulcsfontosságú. Ezzel a feltétellel ugyanakkor mérsékeljük adataink szórását, így egyenletesebb lefutású profilokat állíthattunk elő. A normalizálást a 75 m magassághoz tartozó szélességhez végeztük, tehát a szélirányfüggő relatív profil (4.36 ábra) ennek segítségével került meghatározásra.

A szélesség kritérium bevezetése gyakorlatilag minden helyszínen az északnyugati, 315-345° szélirányszektor meghatározó jellegét erősítette. Tehát a helyszínek összehasonlítását azonos szélirányok fennállásakor van módunk vizsgálni. Pakson jellemző szélirány még a déli, Szegeden pedig a 275-315° szektor. Ez a módszer a SODAR méréssel nyert szélprofilok objektív összehasonlítását teszi lehetővé.

Az 4.36 ábrán látható, hogy Budapesten északnyugati szél fennállásakor 30 m magasságban a 75 m magassághoz mérten közel 25%-kal kevesebb a szélessége, ugyanakkor 120 méteren csak alig 10%-kal több. A relatív profilban körülbelül 60 m magasságban található töréspont, felette egységnyi magasságváltozás hatására már alig növekszik a szél sebessége.



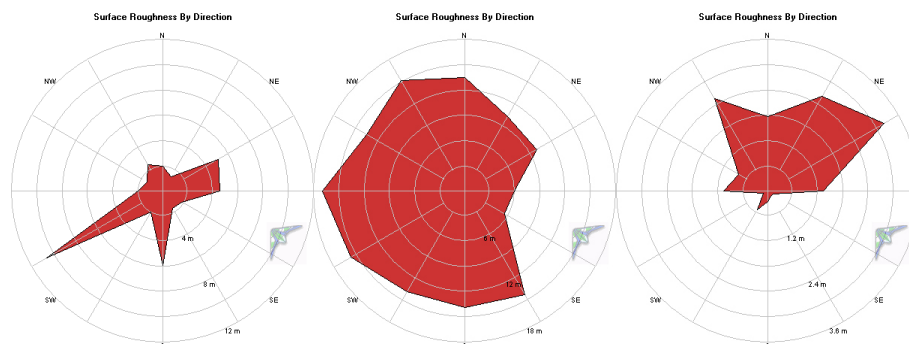
4.37. ábra. Átlagos fajlagos szélteljesítmény SODAR mérések alapján

A szélesebbesség gradiense Pakson a legnagyobb, hiszen a felszínhez közeli szél akár 40%-kal gyengébb, míg a 7. szintben pedig több mint 20%-kal nagyobb. A két szint sebességkülönbsége csaknem dupla annyi, mint Budapest esetében volt. Ez a sebességkülönbség egy 75 m magas, 90 m rotor átmérőjű szélérőmű esetén tekintélyes felhajtó, és forgatóerőt indukál. A rotor lapátok alsó és felső állása között Pakson 60%-os relatív sebességkülönbséget találtunk. Talán ennek is köszönhető, hogy a 3 helyszín közül Paks környéke bizonyul kedvezőbbnek a szél energiájának hasznosításának vonatkozásában. A nagyobb szélesebbesség gradiense, ezáltal kevésbé meredek lefutású relatív profil kedvezőbb energetikai szempontból. Ezt a tényt erősíti a 4.37 ábra, amely a különböző magasságokban rendelkezésre álló fajlagos szélteljesítményt mutatja a három helyszínen.

A szegedi tapasztalatok összességében pozitívabban Budapesthez képest, bár kevésbé jó Pakshoz viszonyítva. A 30 - 120 méter közötti sebességkülönbség közel 40%. A talaj közelében a szélesebbesség csökkenése mérsékeltebb, amely alföldi domborzati viszonyok között inkább a felszín borítottság jellegével lehet kapcsolatban.

A normalizált szélprofilok vizsgálata során felmerülhet a kérdés, hogy milyen tényezők alakítják a függvény alakját. A szélprofil alakját a felszín tulajdonságai (a felszín domborzata, a felszínborítottság, érdesség, mesterséges akadályok) mellett a légkör egyensúlyi állapota, hőmérsékleti szerkezete, a nedvesség eloszlása is befolyásolhatja. A kutatás során a SODAR berendezés kizárólag síkvidéki környezetben került felállításra, így a domborzat komplex hatásától eleve eltekinthettünk. Számottevő tényezővé lépett elő ezáltal a felszín érdessége.

A logaritmikus szélprofil összefüggésben szereplő z_0 érdességi magasság azt az elméleti magasságot jelöli, ahol a logaritmikus összefüggésnek megfelelően a szélesebbesség nullává válna. Ha ismert egy terület szélprofilja, akkor szélirány szektoronként közvet-



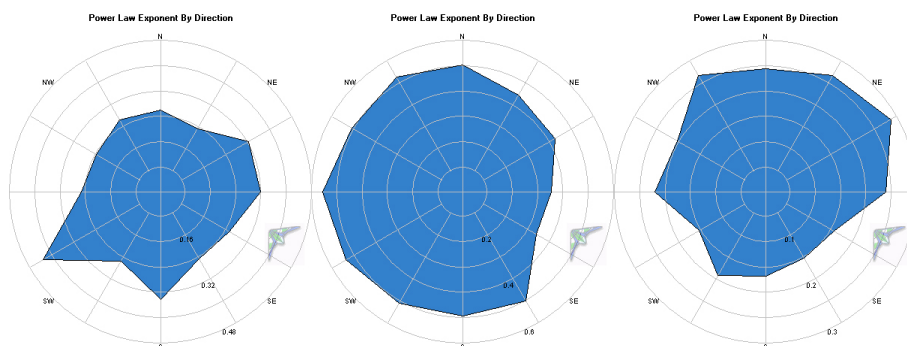
4.38. ábra. A z_0 érdességi magasság szélirányonként Budapesten, Pakson és Szegeden

lenül meg lehet mondani a logaritmikus szélprofil összefüggésben szereplő z_0 érdességi magasság értéke alapján, milyen érdességi tulajdonságú felszín felől érkezik a mozgó levegő a mérőműszerhez. A SODAR mérések tehát egyúttal részletes információt szolgáltatnak a mérőhely közvetlen környezetéről.

Természetesen megvizsgáltuk mindegyik mérőhelyünkön a z_0 érdességi magasság szélirány szerinti eloszlását, melyet a 4.38 ábrán mutatunk be. Budapesten a SODAR mérések alapján ÉK, DNY és D irányban volt a mérőhely környezetében olyan akadály, facsoport, vagy magasabb, jelentősebb érdességi elem, amely befolyásolta a méréseket. Pakson gyakorlatilag szinte mindegyik irányból helyi érdességi elemek hatását mérhettük az adatgyűjtés időszakban. Egyébként ez a helyszín az atomerőmű és a környező védőerdősávok közelségének köszönheti ezeket az eredményeket. A felszín több érdességi kategorizálás szerint is nagyon érdesnek bizonyul, amelyet az energetika értékelések során is figyelembe kell venni, ugyanis az érdesebb felszín felett kialakuló turbulencia kedvezőtlenül hathat a szélenergiátartamára, az energiatermelés biztonságára. A Szegeden azt a sajátosságot vehetjük észre, hogy egyöntetűen az észak - északkeleti szektor magas érdességgel jellemezhető, míg délies irányokból a mérőpont teljesen nyílt.

A profilból meghatározott z_0 érdességi magasság lehetőséget nyújt arra, hogy megmondjuk ezeken a mérőhelyeken szélirány szektoronként a hatványkitevős formulában (2.2 egyenlet), milyen α kitevő értékkel ajánlatos kalkulálnunk. A 4.39 ábra grafikusán, míg az 4.5 táblázat számszerűen mutatja, hogy hogyan változna 30° szektoronként átlagosan a kitevő értéke a 3 megfigyelő helyen. Budapest és Szeged esetében átlagosan $\alpha = 0.2$, míg Paks vonatkozásában $\alpha = 0.4 - 0.5$ értéket találtuk elfogadhatónak.

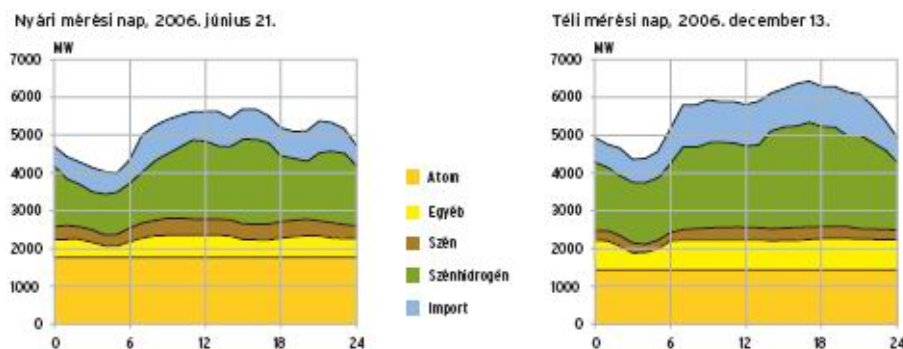
A magyarországi szélpotenciál felmérést szolgáló kutatás során már megállapításra kerül, hogy a Hellmann hatványkitevős szélprofil összefüggésben szereplő kitevő értéke különböző magasságban, sőt napszakok szerint is változik (Varga et al., 2006) a légkör egyensúlyi állapotának megfelelően. A gyakorlati felhasználás szempontjából érdemes figyelembe venni azt is, hogy irányonként is változó az értéke.



4.39. ábra. Az α hatványkitevő értéke szélirányonként Budapesten, Pakson és Szegeden

4.5. táblázat. A hatványkitevő értéke szélirány szektoronként SODAR mérések alapján Budapesten, Pakson és Szegeden

Szélirányszektor [°]	Budapest	Paks	Szeged
0	0.260	0.504	0.244
30	0.235	0.447	0.268
60	0.324	0.427	0.287
90	0.321	0.355	0.238
120	0.252	0.339	0.159
150	0.245	0.501	0.152
180	0.342	0.495	0.168
210	0.256	0.513	0.193
240	0.434	0.539	0.155
270	0.256	0.561	0.222
300	0.239	0.512	0.204
330	0.267	0.526	0.269
α kitevő átlagos értéke	0.29	0.48	0.21



4.40. ábra. A Magyar VER terhelésének napi menete (MVM, 2006)

A szélesebbesség napi menete összefüggésben a VER terhelésével

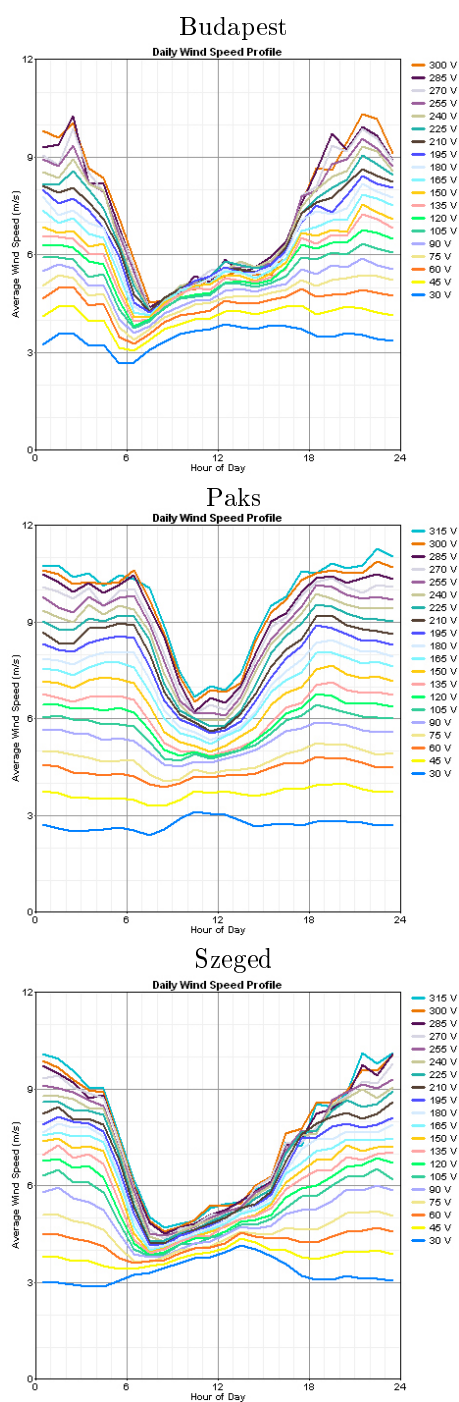
A vizsgálatunk célja az volt, hogy a SODAR-ral különböző magasságban mért szélesebbesség napi menete hogyan illeszkedik a hazai villamos energia fogyasztási szokásokhoz, így választ kapjunk arra, vajon milyen magas szélerőművek hozamát tudná jól kezelni a rendszer. Ehhez egyrészt a magyar villamosenergia-rendszer (VER) 60 percre átlagolt napi terhelési görbáját, illetve a Budapesten, Pakson és Szegeden 2003-2004 folyamán SODAR-ral mért szélesebbesség átlagokat használtuk.

A magyar villamosenergia-rendszer (VER) terhelésének napi alakulását sok tényező közül alapvetően a villamos energia fogyasztók (így a lakosság, ipari fogyasztók, közintézmények) napi tevékenysége, fogyasztási szokásai határozzák meg. A rendszer egyensúlya legegyszerűbben úgy kivitelezhető, ha az erőművek termelése a lehető legjobban illeszkedik a fogyasztók igényeihez, fogyasztási szokásaihoz, mivel a villamos energiát sajnos nem lehet tárolni. A szélerőművek által termelt villamos energia időjárásfüggő. Ha nem fúj a szél, elképzelhető, hogy tartalékokat kell mozgósítani. Hazánkban jelenleg az erőművek igazából szélerőművek nélkül is képesek lennének az igényeket kielégíteni, így nagyobb probléma, ha a szél olyan időszakokban erős, amikor egyébként nagyon alacsony a villamos energia felhasználás. Ekkor a megtermelt villamos energia áron alul kényszerexportra kerül. A VER egyensúlyának megőrzése érdekében extrém esetben olyan erőművek terhelését kellene csökkenteni, amelyeket biztonságuk érdekében célszerű egyenletesen üzemben tartani.

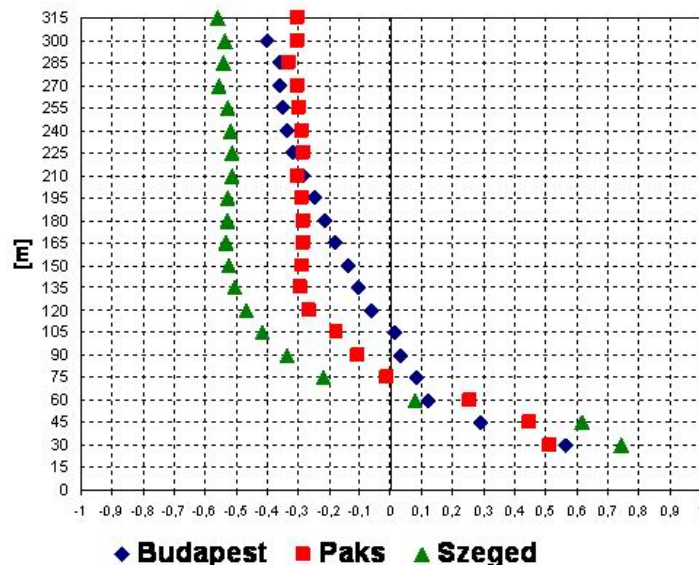
Tekintsük először át hogyan is néz ki a VER terhelésének átlagos napi menete (4.40 ábra). A szélerőművek szempontjából a legkritikusabb időszak minden évszakban a nap során a kora hajnali órák, amikor a háztartási fogyasztók fogyasztása a legalacsonyabb.

A SODAR mérések alapján (4.41 ábra) megállapíthatjuk, hogy a szélesebbesség napi változása a talaj közelében a legkisebb. Minél magasabban vizsgáljuk a légmozgásokat, annál nagyobb a különbség a napon belül. A szélesebbesség napi menete pedig egyértelműen függ a magasságtól.

Budapesten a szélesebbesség minimuma kora hajnalban, illetve napkelte idején tapasztalható minden magasságban. Érdekes, hogy Budapesten 75 m magasságig napközben, kifejezetten a legmelegebb déli órákban lehet élénkebb légmozgásokkal szá-



4.41. ábra. A szélesebbesség napi menete különböző magasságban Budapesten, Pakson és Szegeden



4.42. ábra. A különböző magasságban uralkodó szélesebbesség napi menete és a VER terhelésének kapcsolata

molni, míg magasabban inkább az esti órákban. Egy nap során a legnagyobb átlagsebességű időszak 120 m magasságban 17-22 óra között volt tapasztalható a mérési periódusban.

Pakszon döntően téli időszakban végzett mérések szerint az alsó légrétegekben, 9 m magasságig a szélesebbesség napi menete kevésbé változékony, mint Budapesten. Itt a déli órában tapasztalható erősebb szél, azonban közel 60-75 m magasság felett inkább a délutáni, esti órákban.

Szegeden a magasság növekedésével párhuzamosan a déli - kora délutáni sebességmaximum egyre inkább kora esti - esti maximumok irányába tolódik. A 105 m magassági szint felett a legmagasabb átlagsebességű óra 22-23h, míg 30 méter magasságban 14 óra.

A VER és a szélesebbesség napi menete összefüggésének feltárásához korrelációs analízis alkalmaztunk, melynek eredményét a 4.42 ábrán mutatjuk be. Szoros kapcsolatot több magassági szintben egyedül Szeged esetén találtunk, ahol a talaj közelében pozitív, 120 m felett negatív kapcsolatot mutattunk ki. Szegeden 60-105 m közötti nincs összefüggés a VER terhelésével. Paks és Budapest esetén csak a talajhoz legközelebbi, 30 m magasságban mutattunk ki szignifikáns pozitív kapcsolatot.

A SODAR és a VER adatok összevetése alapján kijelenthetjük, hogy napjainkban széleskörben elterjedt 60 m-nél magasabb oszlopra szerelt szélerőművek nem akkor termelnek elektromos áramot, amikor arra szükség van. Minél magasabb szélerőenergia-hasznosító berendezést állítunk fel, annak energiatermelése annál inkább terhet fog jelenteni az elektromos rendszerirányítók számára.

Kimatológiai szempontból a beruházóknak célszerű lenne egyre magasabb szélergia-hasznosító berendezéseket telepíteni, hiszen a felszíntől távolodva növekszik a szél sebessége, és energiatartalma. Ezzel szemben rendszerirányítói szempontból az lenne a kedvező, hogy egyre alacsonyabb szélérőművek létesülnének az országban. A szélergiával kapcsolatos törvényi szabályozások jelenleg ez utóbbi álláspontot támogatják. A két nézet elsőre összeegyeztethetetlennek tűnik. Véleményünk szerint hazánk szélergia potenciálja olyan kincs, melyet érdemes kihasználni, de tudomásul kell venni, hogy objektív okokból azon változtatni nem lehet. Ebből eredően az elektromos áram fogyasztási szokásaink megváltoztatásán, intelligens energiarendszerek (Kádár, 2007) létesítésének lehetőségein kell elgondolkoznunk.

5. fejezet

Következtetések

A makroskálájú szélklimatológiai vizsgálataink alapján a következő legfontosabb megállapításokat tehetjük:

- Az NCEP/NCAR reanalízis vizsgált 1956-2005 közötti napi szélsébség adata-sora alapján az északi negyedgömbön nem találtunk tartósan egyirányú változást a szélsébség éves átlagaiban. Az 50-es évek vége és a 90-es évek erősebb szelekkel volt jellemezhető, míg általában a 70-es évek voltak a legkevésbé szelesek. A '70-es éveket követő évtizedekben a mérsékelt és poláris öv óceáni területein erősödött a szél sebessége.
- A $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ méretű gridekben 1956-2005 között a szélsébség változásának iránya és nagysága erősen függ a választott térség földrajzi helyzetétől, a vizsgált időszak hosszától.
- Az egyes évek, hónapok jellemzésére olyan szélindexet fejlesztettünk, amely az északi negyedgömb eltérő adottságú területeinek objektív összehasonlítását teszi lehetővé. Dánia példáján kimutattuk, hogy a makroléptékű szélsébség átlagokon alapuló szélindex összhangban áll az országban üzemelő szélenergia termeléséből származtatott szélenergia indexel. Ez bizonyítja, hogy a makroléptékű reanalízis modell széladatai használhatóak nagyobb területen üzemelő szélenergia termeléséből származó energiahozamok jellemzésére.
- Kimutattuk, hogy a szélindex számításához nem mindegy milyen hosszú és milyen időszaktól származó sokéves átlagokat használunk. Megállapítottuk, hogy Magyarországon időszaktól függen 30 éves átlagok használata esetén 5% eltéréssel határozható meg a szélindex értéke.
- Megállapítottuk, hogy a mérsékelt éghajlati öv ideális terület a szél energiájának hasznosítására, mert a szélsébség évek közötti és éven belüli változékonysága itt a legkisebb. Magyarországon az éves átlagos szélsébség változása Európában Dániával és Spanyolországgal összehasonlítva nagyobb. Hazánkban évről évre statisztikailag sokkal pontosabban lehet becsülni a szél átlagos sebességét, a légmozgások energiataralmát, illetve a technikailag kinyerhető hozamokat, mint

Dániában, vagy az Ibéria-félszigeten. Az éves szélindex szórása Magyarországon keleti irányban növekszik, így az éves átlagos szélteljesítmény statisztikailag nagyobb hibával becsülhető hazánk keleti területein.

- Magyarországon a havi szélsébség változása mérsékeltebb, mint Dániában, az extrémén széles hónapok nálunk kevésbé kiugróak a sokéves átlagokhoz viszonyítva. Magyarországi szélviszonyok között egy szélenergia hasznosító berendezés téli félévben több, mint kétszer, háromszor több villamos energiát termelhet, mint nyáron.
- A Magyarország területét érintő 3 grid ($\text{É}47,5^\circ \text{K}17,5^\circ$, $\text{É}47,5^\circ \text{K}20^\circ$, és $\text{É}47,5^\circ \text{K}22,5^\circ$) napi szélsébség értékei között gyakorlatilag nincs szoros kapcsolat. A korrelációs együttható értéke alapján télen erősebb a kapcsolat a területek között, mint tavasszal és nyáron.
- Megállapítottuk, hogy a napi átlagos szélsébségek az 50 éves napi átlagtól átlagosan 40%-ban térnek el a Nyugat-Magyarországot lefedő gridben. A napi szélsébség átlagok statisztikailag télen és nyáron nagyobb, míg tavasszal és ősszel kisebb hibával becsülhető.

A Budapesten, Pakson és Szegeden 2003-2004-ben végzett expedíciós SODAR mérések adatsorait vizsgálva az alábbi megállapításokat tehetjük:

- Magyarországon 120 m magasságig a leggyakoribb északnyugati szélirányú szelek rendelkeznek a legnagyobb energiataralommal. Ezen túl a déli, míg az Alföld déli részén az északkeleti szélirányok energiataralma számottevő.
- A szélirányok magassággal történő növekedése mellett a szélsébség eloszlás alakja is jelentősen átalakul. Budapesten mintegy 180 m magasságig a Weibull-eloszlás $k=2.1$ alakparaméterrel számolva pontos. Nagyobb magasságokban a k alakparaméter értéke csökken. Szegeden és Pakshoz a talajhoz közeli rétegben k értéke növekszik, maximumát 60 m-nél veszi fel, másodlagos maximumát 90 m magasságban tapasztaltuk. Értéke ezt követően általában csökken. Magyarországon tehát közel 90 m magasságig Wieringa összefüggése, majd ettől nagyobb magasságokban Justus lineáris megközelítése használható a k alakparaméter magasság szerinti változásának leírására.
- Paks esetén a hatványkitevős szélprofil összefüggés írja le szinte minden magasságban a legjobban a szélsébség magasság szerinti változását, a többi mérőhelyen csak a talaj közelében. Budapesten 60 m, Szegeden 75 m magasság felett a logaritmikus összefüggés bizonyult jobbnak. Az átlagos szélprofil ismeretben meghatároztuk szélirány szektoronként a z_0 érdességi magasságot, illetve a hatványkitevős összefüggés α kitevőjét, amely a mérőhelyet övező területek érdességének függvényében irányonként is változik.
- 75 m magassághoz normalizált szélprofilok alapján megállapítottuk, hogy Budapesten északnyugati szél fennállásakor 30 m magasságban a 75 m magassághoz mérten közel 25%-kal kevesebb a szélsébsége, ugyanakkor 120 méteren csak alig 10%-kal több. A relatív profilban körülbelül 60 m magasságban található

töréspont, felette egységnyi magasságváltozás hatására már alig növekszik a szél sebessége. A szélesebbség gradiense Pakson a legnagyobb, hiszen a felszínhez közeli szél akár 40%-kal gyengébb, míg 120 méteren több mint 20%-kal nagyobb, mint 75 méteren. Szegeden Budapesthez hasonló szélesebbség különbséget (40%) mutattunk ki 30 és 120 m között.

- A VER és a szélesebbség napi menete összefüggésének vizsgálata során a SODAR mérések helyszínén általában csak a talajhoz legközelebbi, 30 és 45 m magasságban mutattunk ki szignifikáns pozitív kapcsolatot, azaz a szél sebessége akkor volt nagyobb, amikor a fogyasztói igények is megnövekedtek. Egyedül Szegeden volt 120 m felett a negatív kapcsolat szignifikáns volt, míg 60-105 m között egyáltalán nincs kimutatható összefüggés a VER terhelésének napi menetével.

6. fejezet

Összefoglalás

Az értekezés célja az, hogy bemutassa a klimatológia azon területét, amely a légmozgások tulajdonságait vizsgálja kifejezetten a szél energetikai hasznosítása szempontjából. A kutatás során arra törekedtünk, hogy a Magyarországon rendelkezésre álló szélenergia-potenciál jellegzetességeit az északi negyed gömb más térségeinek szélviszonyaival összehasonlítva mutassuk be annak érdekében, hogy segítsük a hazai szélenergia hasznosítás fejlődését. A szélklímára vonatkozó információk a szélenergia-hasznosításban érintettek (beruházók, villamosenergia-rendszer irányítója, mérlegkör felelősök, villamos energiafogyasztók) végső soron súlyos pénzügyi-gazdasági döntéseit tehetik megalapozottakká.

A szélenergia hasznosításának növelése az Európai Unióban, illetve a világ sok országában elsődleges prioritást élvez, hiszen az országok energiapolitikájában kulcskérdéssé vált a klímaváltozás elleni küzdelem. Számos országban az ingyen rendelkezésre álló szélenergia-potenciált az energiaellátás biztonsága érdekében alkalmazzák. A szélenergia jövőbeli fejlődéséhez nélkülözhetetlenül szükség van a szél energiájának térben illetve időben történő rendelkezésre állásának vizsgálatára, illetve a szélenergia potenciál olyan jellegzetességeinek ismeretére, amelyek a szélenergia villamosenergia-rendszerbe történő illesztését segíthetik anélkül, hogy az ellátás biztonságát fenyegetnék.

A szélenergia térbeli és időbeli jellegzetességeinek vizsgálatához az NCEP / NCAR globális reanalízis modell északi negyedgömbre vonatkozó ($E0^{\circ}$ - 90° és $Ny90^{\circ}$ - $K90^{\circ}$ között) 1956-2005 közötti napi szélesség adatsorát elemeztük.

Megállapítottuk, hogy minél nagyobb térbeli skálát vizsgálunk, annál egyértelműbb, hogy nincs egyirányú, trendszerű változás a rendelkezésre álló szélenergia potenciálban. A változások iránya és nagysága erősen függ a választott térség földrajzi helyzetétől, a vizsgált időszak hosszától.

Az egyes évek, hónapok jellemzésére olyan szélindexet alkalmaztunk, amely az északi negyedgömb eltérő adottságú területeinek objektív összehasonlítását biztosíthatja. Egy adott hónap, vagy év átlagos szélesség értékeit egy sokéves átlaghoz viszonyítva adjuk meg %-ban kifejezve. Dánia példáján kimutattuk, hogy a makroléptékű szélesség átlagokon alapuló szélindex összhangban áll az országban üzemelő szélenergia-termelésből származtatott szélenergia indexszel. Ez bizonyítja, hogy a

makroléptékű reanalízis modell széladatai használhatóak szélérőművek termelésének jellemzésére. Természetesen azt hangsúlyoznunk kell, hogy a nagytérű széladatokból készített klimatológiai szélindex nem egy-egy szélérőmű termeléséről tájékoztat, hanem egy nagyobb területen található szélérőművek összességéből származó energia-termelést jellemez.

Megállapítottuk, hogy a szélenergia hasznosítására összességében a mérsékelt éghajlati öv ideális terület, mert a szélsébség évek között és éven belüli változékonysága itt a legkisebb. Magyarországon az éves átlagos szélsébség változása Dániával és Spanyolországgal összehasonlítva nagyobb. Hazánkban évről évre statisztikailag sokkal pontatlanabban lehet becsülni a szél átlagos sebességét, a légmozgások energiatartalmát, illetve a technikailag kinyerhető hozamokat, mint Dániában, vagy az Ibéria-félszigeten. Ez azt jelenti, hogy hazánkban az 1 éves energetikai szélmerések információtartalma valójában túlságosan kevés annak megítélésére, hogy a tervezett szélérőmű mennyi villamos energiát fog évről évre termelni. Az éves szélindex szórása keleti irányban növekszik, így az éves átlagos szélteljesítmény statisztikailag nagyobb hibával becsülhető hazánk keleti területein.

Az országban a havi szélsébség változása mérsékelt, mint Dániában, azaz a rendszerirányítónak kisebb havi különbségekre kell számítnia, sőt az extrém széles hónapok nálunk kevésbé kiugróak a sokéves átlagokhoz viszonyítva. Magyarországi szélviszonyok között egy szélenergia hasznosító berendezés téli félévben több, mint kétszer, háromszor több villamos energiát termelhet, mint nyáron.

Megállapítottuk, hogy a napi átlagos szélsébségek az 50 éves napi átlagtól átlagosan 40%-ban térnek el a Nyugat-Magyarországot lefedő gridben. A napi szélsébség átlagok statisztikailag télen és nyáron nagyobb, míg tavasszal és ősszel kisebb hibával becsülhetők.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) vezetésével zajlott magyarországi szélenergia-potenciált felmérő kutatás keretében SODAR-ral történtek három helyszínen (Budapest, Paks, Szeged) expedíciós szélmerések. Ezek alapján megállapítottuk, hogy Magyarországon 120 m magasságig a leggyakoribb északnyugati szélirányú szelek rendelkeznek a legnagyobb energiatartalommal. Ezen túl a déli, míg az Alföld déli részén az északkeleti szélirányok energiatartalma számottevő.

Vizsgáltuk 30 m és 315 m között 15 m-es lépésközzel a szélsébség eloszlását közelítő Weibull eloszlás k alakparaméterének változását. Budapesten mintegy 180 m magasságig a Weibull-eloszlás $k=2.1$ alakparaméterrel számolva pontos. Ezt követően a k értéke csökken. Szegeden és Pakszon a talajhoz közeli rétegben k értéke növekszik, maximumát 60 m-nél veszi fel, másodlagos maximumát 90 m magasságban tapasztaltuk. Értéke ezt követően általában csökken. Magyarországon tehát közel 90 m magasságig Wieringa összefüggése, majd ettől nagyobb magasságokban Justus lineáris megközelítése használható a k alakparaméter magasság szerinti változásának leírására.

Megvizsgáltuk, hogy a SODAR mérésekből meghatározott szélprofilok melyik elméleti összefüggéssel közelíthetők pontosabban. Paks esetén a hatványkitevős összefüggés írja le szinte minden magasságban a legjobban a szélsébség magasság szerinti változását, a többi mérőhelyen csak a talaj közelében. Budapesten 60 m, Szegeden 75 m magasság felett a logaritmikus összefüggés bizonyult jobbnak.

A profilok összehasonlítására $> 4\text{ m/s}$ szélsébségek és északnyugati szél fennállása esetén a 75 m szinthez normalizált értékeket számoltunk. Budapesten északnyu-

gati szél fennállásakor 30 m magasságban a 75 m magassághoz mérten közel 25%-kal kisebb a szél sebessége, ugyanakkor 120 méteren csak alig 10%-kal több. A relatív profilban körülbelül 60 m magasságban található töréspont, felette egységnyi magasságváltozás hatására már alig növekszik a szél sebessége. A szélesebesség gradiense Pakson a legnagyobb, hiszen a felszínhez közeli szél akár 40%-kal gyengébb, míg 120 méteren több mint 20%-kal erősebb, mint 75 méteren. Szegeden Budapesthez hasonló szélesebességkülönbséget (40%) mutattunk ki 30 és 120 m között a normalizált profil segítségével.

A SODAR mérések segítségével különböző magasságban vizsgáltuk a szélesebesség napi menetét összefüggésben a magyar villamos energia-rendszer terhelésének napi görbéjével. A villamosenergia-rendszer szabályozása szempontjából kihívás, ha a szél olyan időszakokban erős, amikor egyébként nagyon alacsony a villamosenergia-felhasználás. A legkritikusabb időszak minden évszakban a nap során a kora hajnali órák, amikor a háztartási fogyasztók fogyasztása a legalacsonyabb. A SODAR mérések alapján megállapítottuk, hogy a szélesebesség napi változása a talaj közelében a legkisebb. A szélesebesség napi menete egyértelműen függ a magasságtól, a talaj közelében nappali, nagyobb magasságban éjszakai maximum mutatható ki. A villamosenergia-rendszer és a szélesebesség napi menete összefüggésének vizsgálata során szignifikáns kapcsolatot több magassági szintben egyedül Szeged esetén találtunk. A talaj közelében pozitív, 120 m felett negatív kapcsolatot mutattunk ki, míg 60-105 m közötti magasság esetén egyáltalán nincs összefüggés a VER terhelésének napi menetével. Paks és Budapest esetén csak a talajhoz legközelebbi, 30 és 45 m magasságban mutattunk ki szignifikáns pozitív kapcsolatot, azaz a szél sebessége akkor volt nagyobb, amikor a fogyasztói igények is megnövekedtek.

A szélesebesség magasság szerinti növekedése, a szélesebesség eloszlásának alakja a széleenergiába befektetőket arra ösztönzi, hogy egyre magasabb szélerőműveket állítsanak, a szabályozás szempontjából az alacsonyabb szélerőművek kedvezőbbek.

Összességében Magyarország széleenergia potenciálját mindenképpen érdemes hasznosítani akár ipari méretű, hálózatra csatlakozó, akár háztartási méretű szélerőművekkel tesszük is, hiszen hosszú időskálán és makroléptékben rendelkezésre állása stabilabb, mint a szélerőművek élettartama alatt akár a szénhidrogének világpiaci árának változása, vagy a fejlődésének kereteit meghatározó jogszabályi környezet.

Egy terület széleenergia potenciálja objektív adottság, annak tulajdonságain mi nem tudunk változtatni, ezért a széleenergia és más területek bármilyen lehetséges konfliktusát ésszerűen optimalizálva csakis a széklíma ismeretében, ahhoz alkalmazkodva lehet csak megoldani. A széleenergia hasznosítás magyarországi jövőbeli fejlődésére csak ilyen szemlélet mellett látunk esélyt.

7. fejezet

Summary

The aim of the thesis is to describe the particular field of climatology which analyzes air movement characteristics regarding utilization of wind for energy generation. The thesis describes features of wind energy potential available in Hungary compared to wind conditions in other areas of the northern quarter sphere in order to assist the wind energy use development in Hungary. Information on wind climate gives a solid basis for financial and economic decisions of stakeholders in the field of wind energy utilization: investors, transmission system operator, leaders of balance circles, energy users.

Increase of wind energy utilization in the European Union and many other countries has priority as fight against climate change has become a key issue of national energy policies. In several countries the free wind energy potential is used for security of energy supply. For future development of wind energy potential it is essential that we study temporal and spatial availability of wind energy and also that we know those characteristics of wind energy potential which can assist to include wind turbines into the electricity network without disturbing security of supply.

To study temporal and spatial characteristics of wind energy the daily wind velocity data of NCEP / NCAR global reanalysis model were analysed relative to the northern quarter sphere (between N0°-90° and W90°- E90°) from 1956 to 2005.

It can be stated that the larger scale is analysed the more positive the fact is that there is no linear, systematic change in the available wind potential. Direction and extent of changes strongly depend on the geographic position of the selected area and the length of the analyzed period.

To characterize the particular years and months such a wind index was applied that assures objective comparison of diverse areas of the northern quarter sphere. Average wind energy velocity of any particular month or year is given in comparison to long-term means, in %. Using Denmark as an example it is demonstrated that the wind index based on macro-scale wind velocity averages is in harmony with the wind energy index from the power generation of wind turbines in the country. This proves that wind data of a macro-scale reanalysis model can be used to characterize power generation of wind turbines. Naturally it must be emphasized that the climatological wind index derived from large-scale wind data does not provide details of power

generation of single wind turbines but it features aggregated energy generation of turbines within a major area.

The conclusion is that temperate climate zone is an ideal area for wind energy utilization as variability of wind velocity is the minimum both within a year and on long-term basis. Variation of average annual wind velocity in Hungary is bigger compared to Denmark and Spain. In Hungary average wind velocity, energy of air movements and technical potential can be estimated with a lesser punctuality than in Denmark or on the Iberian Peninsula. This means that in Hungary the information received from one-year-long wind energy measurements is insufficient to define how much energy will be generated by any given planned wind turbine. Deviation of annual wind index increases in eastern direction so the annual average wind capacity can statistically be estimated with less accuracy in the eastern areas of the country.

In Hungary variation of monthly wind velocity is more moderate than in Denmark so the system operator can expect lesser monthly differences moreover the extremely windy months are less prominent compared to long-term average. Given wind conditions in Hungary a wind energy power plant can generate twice or three times more energy in the winter half-year than in the summer.

Daily mean wind velocity differ from the 50-year daily average by 40% on the average in the grid covering Western Hungary. Statistically daily wind velocity averages can be estimated with bigger mistakes in winter and summer; with lesser mistakes in spring and autumn.

Under the direction of the Hungarian Meteorological Service a survey was conducted to measure the Hungarian wind energy potential. Short-term wind measurements took place by SODAR at three venues (Budapest, Paks, Szeged). Based on these measurements it can be stated that up to 120 m altitude the most common northwestern winds have the biggest energy capacity. In addition to these southern winds have substantial wind capacity, also northeastern winds at the southern parts of the Hungarian Great Plain. Changes in shape parameter k of Weibull distribution, approximating distribution of wind velocity were studied between 30 and 315 m with 15 m divisions. In Budapest up to 180 m altitude Weibull distribution is accurate calculated with $k=2.1$. Besides this the value of k decreases. At Szeged and Paks near the ground the value of k increases reaching the maximum at 60 m and secondary maximum at 90 m. Above this its value generally decreases. Therefore in Hungary up to 90 m altitude Wieringa correlation, while at higher altitudes Justus linear approach are applicable to describe changes by altitude of shape parameter k .

It was analyzed which theoretical equation can define more accurately the wind profiles defined by SODAR measurements. At Paks the changes by altitude in wind velocity can be defined best by exhibitor equation at almost all altitudes. At other measurement stations this statement is true only near the ground. Logarithmic function proved to be more accurate in Budapest above 60 m, at Szeged above 75 m.

To compare profiles values normalized to 75 m level were calculated in case of northwest wind and wind velocity $> 4\text{m/s}$. In Budapest when there is northwestern wind the wind velocity is less by 25% at 30 m compared to 75 m but at 120 m the velocity is more only by 10%. The cut-off point in the relative profile is at 60 m, above this wind velocity hardly increases by a unit of altitude change. Wind velocity gradient is biggest at Paks as the wind is weaker sometimes by 40% near ground while

at 120 m is stronger by 20 % than at 75 m. At Szeged differences in wind velocity similar to Budapest were defined (40%) between 30 m and 120 m with the normalised profile.

By the help of SODAR measurements we studied the daily course of wind velocity in connection with the daily load curve of the Hungarian electricity network. From the point of electricity network regulation it represents a challenge when there is strong wind in periods when electricity demand is very low. In every season the most critical period of the day is early dawn when energy demand of households is the lowest. Based on SODAR measurements we found that daily variation of wind velocity is minimum near the ground. Daily course of wind velocity unequivocally depends on altitude with maximum values being near the ground by day and at higher altitudes by night. During analysis of connection between the Hungarian electricity system and daily course of wind velocity we found significant coherence at several altitudes only at Szeged. Near the ground positive, above 120 m negative coherence was found while between 60-150 m there was no coherence at all with the daily course of electricity system load. In case of Budapest and Paks significant positive coherence was found only very near to the ground, between 30-45 m, i. e. wind velocity was maximum at the time when customer demand increased.

Increase of wind velocity by altitude and curve of wind velocity distribution drive investors to install higher and higher turbines, however shorter turbines are more favourable from the point of system regulation.

To summarize the above it can be claimed that Hungarian wind energy potential is worthy for utilization by both industrial size turbines connected to the network and by household size smaller turbines as its availability is more stable during long time periods and on a large scale than either world market cost of hydrocarbons or legal conditions of development during the turbines' lifetime.

Wind energy potential of an area is an objective fact, its features cannot be changed, accordingly any possible conflict between wind energy and other areas can be solved optimally only knowing and complying with the wind climate. Future development of wind energy utilization has a good chance only with implementation of such an approach.

8. fejezet

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Dr. habil Tar Károlynak, a Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszékének vezetőjének, témavezetőmnek a munka elkészítéséhez nyújtott tanácsaiért, illetve a Tanszék minden munkatársának segítségéért és támogatásáért.

Köszönöm a NKFP-3A/0038/2002 számon nyilvántartott "Magyarország légköri eredetű megújuló energiaforrásainak vizsgálata, a meglévő potenciálok feltérképezése és felhasználásuk elősegítése meteorológiai mérésekkel és előrejelzésekkel" című kutatási program támogatását, elsősorban a program keretében végzett SODAR mérési adatok hozzáférhetősége miatt. Külön köszönet illeti a konzorcium vezetőjét, Dr. Major György akadémikust és Dr. Wantuchné Dr. Dobi Ildikót.

Köszönöm Bíró Zoltánnak és családom minden tagjának, hogy ösztönzték és mindenben segítettek a munka elkészülését.

Irodalomjegyzék

- 2001: 2001. évi cx. törvény a villamos energiáról. 2007. július 31.
URL <http://www.complex.hu/external.php?url=3>
- 2007: 2007. évi lxxxvi. törvény a villamos energiáról.
URL <http://net.jogtar.hu/jr/gen/getdoc.cgi?docid=A0700086.TV>
- 2007: 389/2007. (xii. 23.) korm. rendelet a megújuló energiaforrásból vagy hulladékból nyert energiával termelt villamos energia, valamint a kapcsoltan termelt villamos energia kötelező átvételéről és átvételi áráról.
- Archer, C. L. and M. Z. Jacobson, 2005: Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, **110**, pp. 1–20, doi:10.1029/2004JD005462, 2007. július 17.
URL <http://www.stanford.edu/group/efmh/winds/2004jd005462.pdf>
- Aujeszky, L., 1951: A szélesebbesség négyzetes és köbös átlagainak kiszámítása energia-hasznosítási kérdések megítéléséhez. *Időjárás*, **55**, pp. 79 – 81.
- AWEA, 2001: Fact sheets. 2007. július 17.
URL <http://www.awea.org/pubs/factsheets.html>
- Bacsó, N., J. Kakas, and L. Takács, 1953: *OMI kiadványa, XVII. kötet*, OMI, chapter Magyarország éghajlata. pp. 45 – 59.
- Baranka, G., T. Weidinger, R. M. R. Mészáros, and R. Kovács, 2001: *A légköri erőforrások hasznosításának meteorológiai alapjai. Meteorológiai Tudományos Napok 2001. Budapest. 2001. november 15-16.*, Országos Meteorológiai Szolgálat, chapter A planetáris határréteg szerkezete, szél és hőmérsékleti profilja. pp. 109–119.
- Barta, E., 1984: *A napi maximális szélökés időpontjának, nagyságának és irányának statisztikai elemzése..* Ph.D. thesis, Kossuth Lajos Tudományegyetem, Debrecen.
- Bartholy, J., R. Pongracz, and M. Pattantyus-Abraham, 2006: European cyclone track analysis based on ecmwf era-40 data sets. *International Journal of Climatology*, **26**, pp. 1517–1527., doi:10.1002/joc.1392, 2007. július 17.
URL <http://www.scopus.com/>
- Bartholy, J. and K. Radics, 2000: *Erdő és Klíma Konferencia III. 2000. június 7-9., Debrecen.*, DE Meteorológiai Tsz., chapter Természetes felszínek áramlásmódosító hatásai. pp. 121 – 131.

- 2005: Wind profile analyses and atmospheric stability over a complex terrain in southwestern part of Hungary. *Physics and Chemistry of the Earth*, **30**, pp. 195–200, doi:10.1016/j.pce.2004.08.013, 2007. július 17.
URL <http://www.scopus.com/>
- Bartholy, J. and T. Weidinger, 2002: *Magyarország földje. Kitekintéssel a Kárpát-medence egészére.*, Magyar Könyvklub, Budapest, chapter Az éghajlat, a vizek, a talaj és az élővilág följajza. Napsugárzás, felhőzet, szél. 242–243.
- Bartzokas, A. and D. Metaxas, 1996: Northern hemisphere gross circulation types. climatic change and temperature distribution. *Meteorologische Zeitschrift*, **5**, pp. 99–109, 2007. július 17.
URL <http://www.scopus.com/>
- Baumann, K. and M. Piringer, 2001: Two-years of boundary layer measurements with a sodar - statistics and application. *Phys. Chem Earth*, **26**, pp. 205–211.
- Berge, E., O. Undheim, and E. Karlsen, 2008: *For how long must data be collected to establish the average vertical wind profile?*. 2008. Január 15.
URL <http://www.ewec2008.org>
- Bessenyei, T., 2007: Kommunikáció az intelligens háztartási készülékekkel. *Intelligens Energiarendszerek Konferencia avagy a villamosenergia-ellátás új technológiai lehetőségei. Budapest, 2007. november 27.*, pp. 27–34.
URL <http://www.bmf.hu/conferences/energia2007>
- Bial, M., 2005: Declaration of UCTE concerning the challenges and risks of integrating booming wind power in a reliable electricity system of continental Europe. press release 2005. 05. 31. 2005. május. 31.
URL <http://www.ucte.org>
- Bohoczky, F., 2004: Megújuló energiaforrások magyarországi felhasználása, energiatakarékossági helyzetkép. *Megújuló energiaforrások felhasználása, szakmapolitikai keretek és a fejlődés lehetőségei Magyarországon és az Európai Unióban. Budapest, 2004. május 17.*
- Ábrahám, I., Z. Birinyi, T. Körösi, A. Mörcz, C. Oberczán, T. Tóth, and . Vajdovich, 2007: Tájékoztató a magyar energia hivatal 2006. évi tevékenységéről. Budapest.
- Bíróné Kircsi, A., 2006: *Meteorológiai műszerek*, Kossuth Egyetemi Kiadó, chapter A levegő mozgásának mérési elvei és eszközei. pp. 77–101.
- Bíróné Kircsi, A. and K. Tar, 2007: *Erdő és klíma V. kötet.*, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, chapter Profilvizsgálatok a szél energetikai hasznosításához. pp. 83–103.
- Commission, E., 2001: Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the electricity produced from renewable energy source in the internal electricity market. *Official Journal of the European Communities*, **L 283**, pp 33–40., 2006.03.08.

- URL <http://europa.eu.int/eur-lex/pri/en/oj/dat/2001/l-283/l-28320011027en00330040.pdf>
- Czelnai, L., 1953: A szélenergia felhasználásának néhány elméleti kérdése és lehetőségei hazánkban. *Időjárás*, **57**, pp. 221–227.
- Czelnai, R., G. Götz, and Z. Iványi, 1994: *Bevezetés a meteorológiába II. A mozgó légkör és óceán..* Nemzeti Tankönyvkiadó, 403 pp.
- Dobesch, H. and G. Kury, 1997: *Wind Atlas for the Central European Countries..* Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna.
- Dobi, I. and J. Mika, 2007: *Kedvező széllel Kunhegyestől Debrecenig. Tiszteletkötet Dr. Tar Károly 60. születésnapjára..* Magyar Szélenergia Társaság, chapter Adalékok a nap- és a szélenergia felhasználásához, az IPCC 2007. évi negyedik jelentéséhez kapcsolódva. pp. 101–109.
- Dobosi, Z. and L. Felméry, 1994: *Klimatológia..* Nemzeti tankönyvkiadó, 500 pp.
- Elliott, D., C. Holladay, W. Barchet, H. P. Foote, and W. Sandusky, 1986: *Wind Energy Resource Atlas of the United States..* DOE/CH 10093-4, Dep. of Energy, Washington, D. C., DOE/CH 10093-4, Dep. of Energy, Washington, D. C.
URL <http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/>
- Eurobarometer, 2007: Energy technologies: knowledge, perception, measures. eurobarometer special surveys no. 262. 2007. július 17.
URL <http://ec.europa.eu/public-opinion/archives/ebs/ebs-262-en.pdf>
- EUROSTAT, 2007: Themes: Environment and energy. 2007. július 31.
URL http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?_pageid=1090,30070682,1090-33076576-dad=portal-schema=PORTAL
- EWEA, 2006: Wind can deliver 23 2007. július 31.
URL <http://www.ewea.org/>
- 2007: European market for wind turbines grows 23 (01/02/2007). 2007. július 31.
URL <http://www.ewea.org/index.php?id=180>
- Filgueiras, A. and T. M. V. Silva, 2003: Wind energy in brazil—present and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **7**, pp.439–451, doi:10.1016/S1364-0321(03)00068-6.
URL <http://www.sciencedirect.com>
- Fischer-Bruns, I., H. von Storch, J. Gonzalez-Rouco, and E. Zorita, 2005: Modelling the variability of midlatitude storm activity on decadal to century time scales. *Climate Dynamics*, **25**, pp. 461–476.
- Foken, T., 2001: *Micrometeorology and Applications. Short course for PhD and graduated students in English. Budapest. 2001. február 26. - március 2..*
- Frisnyák, S., ed., 1975: *Magyarország földrajza.* Tankönyvkiadó.

- GKM, 2002: 56/2002. (xii. 29.) gkm rendelet az átvételi kötelezettség alá eső villamos energia átvételének szabályairól és árának megállapításáról. 2006. július 31.
URL <http://net.jogtar.hu/jr/gen/getdoc.cgi?docid=a0200056.gkm>
- 2003: Alternatív (megújuló) energiaforrások európai és hazai alkalmazása. 2004. január 14.
URL <http://www.gkm.hu/>
- 2007a: 115/2007. (xii. 29.) gkm rendelet a villamosenergia-piaci egyetemes szolgáltatás árképzéséről, valamint az egyetemes szolgáltatás keretében nyújtandó terméksomagokról.
- 2007b: 119/2007. (xii. 29.) gkm rendelet a villamos energia rendszerhasználati díjakról.
- GmbH, A., 2000: Wind measurement for accurate energy predictions.
URL <http://www.ammonit.de>
- GWEC, 2007: Global wind 2006 report. 2007. július 17.
URL <http://www.gwec.net>
- Harris, I., 2006: Data available from cru. ncep/ncar reanalysis data. Technical report, Climate Research Unite.
URL <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncp/>
- Hau, E., 2003: *Windkraftanlagen..* Springer-Verlag, Berlin, 792 p. pp.
- Hegyfok, K., 1894: *A szél iránya a Magyar Szent Korona országában..* Királyi Magyar Természettudományi Társulat.
- 1904: A szél fordulása néhány állomásunkon. *Időjárás*, **8**, 285–301.
- 1913: A szélirány évenkénti változékonysága és évi periódusa a nagy-alföldön. *Időjárás*, **17**, 285–300.
- Hunyár, K. s. T. P., M. és Tar, 2004: Magyarország szélenergia potenciálja. *Energiagazdálkodás*, **45**, 20–25.
- Hunyár, M., I. Schmidt, K. Veszprémi, and G. Vincze, 2002: *A megújuló és környezetbarát energetika villamos gépei és szabályozásuk..* Műegyetemi Kiadó, 339p. pp.
- Hunyár, M., K. Veszprémi, and G. Szépszó, 2006: *Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei*, Országos Meteorológiai Szolgálat, chapter Újdonságok Magyarország szélenergia potenciáljáról. pp. 94–113.
- IEA, 2002a: Renewable energy. Paris: IEA/OECD 2002 november 14.
URL <http://www.iea.org/textbase/papers/2002/renewable.pdf>
- 2002b: Renewables in global energy supply- an ie a fact sheet. Paris: IEA/OECD 2002 november 14.
URL <http://library.iea.org/dbtw-wpd/textbase/papers/2002/leaflet.pdf>

- 2005: Variability of wind power and other renewables - management options and strategies. Paris: IEA/OECD 2006. augusztus 17.
URL <http://www.iea.org/textbase/papers/2005/variability.pdf>
- 2006a: Iea energy statistics 2006. Paris: IEA/OECD 2007. július 17.
URL www.iea.org/statist/index.htm
- 2006b: Key world energy statistics 2006. Paris: IEA/OECD 2007. július 17.
URL <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/key2006.pdf>
- 2007: Renewables in global energy supply- an iea fact sheet. Paris: IEA/OECD 2007. július 17.
URL <http://www.iea.org/textbase/papers/2006/renewable-factsheet.pdf>
- Imre, L., 2003: A megújuló energiaforrások hasznosítása az európai unió tagállamaiban. *Magyar Energetika*, **11**, 2007. július 17.
URL <http://www.energiamedia.hu/menu/meguj/meguj012.html>
- Justus, C. G., 1985: *Handbook of applied meteorology*, John Wiley and Sons, chapter Wind energy.
- Justyák, J., 1998: *Magyarország éghajlata*. Kossuth Egyetemi Kiadó, 118 p pp.
- Kakas, J., 1947: Repülőterek szélirány-gyakorisága. *Időjárás*, **51**, pp. 58–68.
- 1952: Adatok hazánk évszakonkénti széliránygyakoriságaihoz. *Időjárás*, **56**, pp. 22–35.
- Kakas, J. and M. Mezősi, 1956: Szélviszonyaink vizsgálata és az országos energiagazdálkodás. *Időjárás*, **60**, pp. 350 – 364.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, L. Deaven, D. and Gandin, and D. Iredell, M. Joseph, 1996: The ncep/ncar 40 reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, pp. 437–471.
- Kádár, P., 2007: Intelligencia az erőáramú hálózatokban. *Intelligens Energiarendszerek Konferencia avagy a villamosenergia-ellátás új technológiai lehetőségei. Budapest, 2007. november 27.*
- Kht, E., 2000: Villamosenergia-termelés szélenergiával. csináljuk jól! no. 8. 15p. pp.
- Kircsi, A. ., 2001: *A szélenergia hasznosítás klimatológiai aspektusai Magyarországon.* Master's thesis, Debreceni Egyetem Mezőgazdaságtudományi Kar.
- Kircsi, A., 2003: *Proceedings CD-ROM of the 2nd International Conference on Applications of Natural-, Technological- and Economical Sciences, Szombathely 10. May 2003.*, Berzsényi Dániel Főiskola, chapter Napi maximális széllelőkések jellemzői Magyarországon.
- 2004: *Földtudományi tanulmányok. Tiszteletkötet Dr. Justyák János 75. születésnapjára.*, Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszék, chapter Napi maximális széllelőkések statisztikai szerkezete Magyarországon. pp. 83–93.

- Kircsi, A., J. Mika, and K. Tar, 2000: Some statistical characteristics of the daily maximum gust of wind in Hungary. *3rd European Conference on Applied Climatology. Pisa, Italy, 16-20. October, 2000.*
- Kovács, A., 1996: *Magyarország szélklimájának sajátosságai a szélenergia hasznosíthatóságának szempontjából.* Master's thesis, ELTE Meteorológiai Tanszék.
- Langenbach, J., 2008: Windaanbod / wind resource. Technical report, Wind Service Holland.
URL <http://home.planet.nl>
- Ledács Kiss, A., 1955: A szélenergia hasznosításának kérdése a Rio de Janeiro-i világenergia konferencián és hazai vonatkozásai. *Magyar Energiagazdaság*, **8**, pp. 121–130.
- 1962a: Korszerű szélenergia hasznosítás daniában. *Energia és Atomtechnika*, **15**, pp. 13–23.
- 1962b: Országos energiaellátásra alkalmas szélenergiaforrások. *Energia és Atomtechnika*, **15**, pp. 407–413.
- 1982: *II. tanulmány*, Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület, chapter A szélenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon. Magyarország széljárásából kitermelhető energia nagyságának megközelítő középértéke, OMSZ szélstatistikából kiszámítva. A hasznosítás modern eszközei. Szélelektromos hőforrás. Energiatárolás szélenergiaforrással.
- MEH, 2008: *Az egyetemes szolgáltatás árszerkezete. 2008. évi lakossági árak - tájékoztató táblázat és magyarázat.* Magyar Energia Hivatal.
URL <http://www.eh.gov.hu/>
- Mellinghoff, H., A. Albers, and H. Klug, 2000: *DEWEK 2000 Tagungsband*, DEWI, chapter Sodar Measurements In Complex Terrain. pp. 116–119., 2007. július 17.
URL www.dewi.de
- Melzer, C., 2001: *Szélenergia konferencia előadásai. Szélenergia Konferencia I. 2001. január 24. Gödöllő*, Magyar Szélenergia Tudományos Egyesület, chapter Wind Measurement for a correct Energy Prognosis. pp. 21 – 27.
- Mengelkamp, H.-T. and T. Sperling, 2005: Windindizes werden von produktionsdaten unabhängig. *Erneuerbare Energien*, **15**, 25–27.
- Molnár, L., 2006: A megújuló energiák hazai helyzete. *Energiagazdálkodás*, **47**, pp. 26–27.
- MVM, 2006: A magyar villamosenergia-rendszer 2005. évi statisztikai adatai. 2007. július 17.
URL <http://www.mvm.hu/resource.aspx?ResourceID=kozlemenyek-statisztikaiszam-2005-javitott>
- Nielsen, P., 2004: New Danish wind energy index calculation. Technical report, EMD International.
URL <http://www.vindstat.dk>

- Péczeley, G., 1957: Áramlási viszonyok magyarországon különböző makroszinoptikus helyzetekben. *Időjárás*, **61**, pp. 408–419.
- 1961: *Országos Meteorológiai Intézet Kisebb kiadványai 32.*, Országos Meteorológiai Intézet, chapter Magyarország makroszinoptikus helyzeteinek éghajlati jellemzése. 128 p.
- 1979: *Éghajlattan*. Nemzeti Tankönyvkiadó, 336p pp.
- Précsényi, E., I. és Barta, I. Karsai, and T. Székely, 2000: *Alapvető kutatástervezési, statisztikai és projektértékelési módszerek a szupraindividuális biológiában..* Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen.
- Radics, K., 1999: *Egyetemi Meteorológiai Füzetek. No. 13.*, ELTE Meteorológiai Tanszék, chapter Mért és modellezett szélmezők összehasonlító elemzése. pp. 57 – 62.
- 2004: *A szélenergia hasznosítás lehetőségei Magyarországon: hazánk szélklímája, a rendelkezésre álló szélenergia becslése és modellezése..* Ph.D. thesis, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 139p.
- Radics, K. and J. Bartholy, 2002: Selected characteristics of wind climate and potential use of wind energy in hungary. part ii. *Időjárás*, **106**, pp. 59–74.
- Rákóczi, F., 1998: *Életterünk a légkör..* Mundus Magyar Egyetemi Kiadó, 302p. pp.
- Réthly, A., 1938: *Adatok a Kékes éghajlatához..* Magyar Királyi Országos Meteorológiai és Földmágnesség Intézet Kisebb kiadványai. 4.
- Schönwiese, C. D., J. Rapp, T. Fuchs, and M. Denhard, 1994: Observed climate trends in europe 1891-1990. *Meteorol. Zeitschrift*, **3**, pp. 22–28.
- Seibert, P., 1998: Long-time comparison of remtech pa2 sodar wind and turbulence measurements with cabauw tower data. *Proc. 9th Int. Symp. on Acoustic Remote Sensing and Assoc. Techniques of the Atmosphere and Oceans. Vienna: 1998.* 8.
- Sembery, P. and L. Tóth, eds., 2004: *Hagyományos és megújuló energiák..* Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 522p. pp.
- Sims, R. E. H., 2007: Not too late. ipcc identifies renewable energy as a key measure to limit climate change. *Renewable Energy World*, **10**, pp.31–39, 2007.08.17.
URL <http://www.qmags.com/>
- Smits, A., A. Klein Tank, and G. P. Können, 2005: Trends in storminess over the netherlands, 1962 - 2002. *Int. J. Climatol.*, **25**, pp. 1331 – 1344.
- Stróbl, A., 2004: *A Magyar Villamos Művek Közleményei 2004/1*, Magyar Villamos Művek, chapter A villamosenergia-rendszer forrásoldalának teljesítőképességéről, lehetőségek és remények. pp. 43–50.
- Szabó, E.-n., 1960: *Beszámolók az 1959-ben végzett tudományos kutatásokról. OMI Hivatalos Kiadványai XXIII. kötet.*, Országos Meteorológiai Intézet, chapter Szélsebesség értékei Magyarországon. pp.97–102.

- Szabóné, P., 1962: *Beszámolók az 1961-ben végzett tudományos kutatásokról. OMI Hivatalos kiadványai. XXV. kötet*, OMI, chapter Szélirányeloszlás Magyarországon 30 évi átlagok alapján (1921 - 1950). pp. 238 – 243.
- Szentimrey, T., Z. Bihari, and B. Birszki, 2006: *Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei*, Országos Meteorológiai Szolgálat, chapter Széltérkép fejlesztés állomások adatsoraiból, statisztikai klimatológiai eljárással. pp. 71–81.
- Szerdahelyi, G., 2004: A nemzeti megújuló energiahordozó stratégia. *Megújuló energiaforrások felhasználása, szakmapolitikai keretek és a fejlődés lehetőségei Magyarországon és az Európai Unióban. Budapest 2004. május 17.*
- Szokol, G., 1964: *Beszámolók az 1963-ban végzett tudományos kutatásokról. II. rész. OMI Hivatalos kiadványa XXVII. kötet.*, OMI, chapter A szélenergia hasznosításának kérdései Magyarországon. pp. 89 – 94.
- Szépszó, G., A. Horányi, S. Kertész, and E. Lábó, 2006: *Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei*, Országos Meteorológiai Szolgálat, chapter Magyarországi szélklimatológia előállítása globális mezők dinamikai leskálázásával. pp. 82–93., 2007. július 17.
URL <http://www.met.hu/pages/palyazatok/winsolen/szel-kezirat-webre.pdf>
- Szász, G. and L. Tőkei, eds., 1997: *Meteorológia mezőgazdáknak, kertészeknek, erdészeknek.* Mezőgazda Kiadó, 722p pp.
- Szucsák, V., 1972: *Beszámolók az 1969-ben végzett tudományos kutatásokról. Országos Meteorológiai Szolgálat hivatalos kiadványai XXXVI. kötet.*, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, chapter A széllelőke maximumok napi értékeinek statisztikai elemzése. pp. 423–427.
- Tar, K., 1983: A szélenergia statisztikai vizsgálata. *Időjárás*, **87.**, pp. 29 – 37.
- 1991: *Magyarország szélklimájának komplex statisztikai elemzése.* OMSZ Kisebb Kiadványai. No. 67., OMSZ.
- 1998a: Alteration of the statistical structure of the wind field in hungary in connection with the climatic change. *CD-ROM, ISSN 1016-6254. 2nd European Conference on Applied Climatology. Vienna.*
- 1998b: *Az éghajlatváltozás és következményei. Meteorológiai Tudományos Napok'97. 1997. November 20-21.*, OMSZ, chapter A magyarországi szélmező statisztikai jellemzői a globális felmelegedéssel összefüggésben. pp. 249 – 258.
- 2000: *Általános meteorológia.* Kossuth Egyetemi Kiadó, 114p. pp.
- 2004: A szélirányonkénti energetikai paraméterek időbeli és területi eltérése magyarországon. *Földrajzi értesítő*, **LIII.**, pp. 219–233.
- 2006a: *Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei*, Országos Meteorológiai Szolgálat, chapter Módszer a szélenergia napi menetének jellemzéséhez. pp. 54–70.

- 2006b: *Táj, környezet és társadalom. Ünnepi tanulmányok Keveiné Bárány Ilona professzor asszony tiszteletére.*, SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, chapter A szeles napok statisztikai szerkezete. pp. 687–696.
- 2007: Diurnal course of potential wind power with respect to the synoptic situation. *Időjárás*, **111** (2007), pp. 261–279.
- 2008: Energetic characterization of near surface windfield in Hungary. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12** (2008), pp. 250–264., doi:10.1016/j.rser.2006.05.007.
- Tar, K. and E. Barta, 1985: A napi maximális széllökés statisztikai vizsgálata. *Acta Geographica Debrecina XXII.*, 105–119.
- Tar, K., M. Hunyár, and P. Tóth, 2006: *Magyarország megújuló energetikai potenciálja.*, MTA Energetikai Bizottság Megújuló Energiák Albizottság, chapter Magyarország szélenergia potenciálja. pp. 72–110.
- Tar, K., L. Makra, S. Horváth, and A. Kircsi, 2001: Temporal change of some statistical characteristics of wind speed over the great Hungarian plain. *Theoretical and Applied Climatology*, **69**, pp. 69–79.
- Tar, K., L. Makra, and A. Kircsi, 2000: *Detecting and modelling Regional Climate Change.*, Springer-Verlag, chapter Temporal change of some statistical characteristics of wind speed in Hungary. pp. 251–262.
- Tar, K. and G. Terdik, 1989: A szélesebbség idősorának hely-idő modellezése. *Időjárás*, **93.**, pp. 363 – 369.
- Tennekes, H., 1973: The logarithmic wind profile. *J. Atmos.Sci.*, **30**, 234–238.
- TPWIND, 2006: Wind energy: A vision for Europe in 2030.
- Trenberth, J. P., K.E., P. Ambenje, R. . Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J. Renwick, M. M. Rusticucci, and P. Soden, B. and Zhai, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I. to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., chapter Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. pp. 235–336.
URL <http://www.ipcc.ch/>
- Troen, I. and E. L. Petersen, 1989: *European Wind Atlas*. Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark., 656 p. pp.
- Tóth, L., N. Schrempf, and G. Tóth, 2006: *Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei*, Országos Meteorológiai Szolgálat, chapter Mérések Magyarország szélenergia potenciáljának meghatározásához. pp. 21–39.

- Tóth, T. and F. Csikós, 2006: A megújuló energiaforrásokból termelt villamos energia mennyisége és a támogatási rendszer pénzügyi mutatói magyarországon 2005-ben. Magyar Energia Hivatal, 2007. július 17.
URL <http://www.eh.gov.hu/>
- 2007: A megújuló energiaforrásokból termelt villamos energia mennyisége és a támogatási rendszer pénzügyi mutatói magyarországon 2006-ban. 2007. július 17.
URL <http://www.eh.gov.hu/gcpdocs/200705/kphonlaprarvidvezi1vari11.pdf>
- Unk, J.-n., 2004: A megújuló energiaforrás -hasznosítás növelésének költségei egy lehetséges stratégia megvalósításával. *Megújuló energiaforrások felhasználása, szakmapolitikai keretek és a fejlődés lehetőségei Magyarországon és az Európai Unióban. Budapest 2004 május 17.*
- US-DOE and NREL, 1985: World -wide wind energy resource distribution estimates.
URL <http://www.bergey.com/Maps/World.Wind.Lg.htm>
- Varga, B., 2005: *A megújuló energiák kutatása és hasznosítása az Európai Unió újonnan csatlakozott országaiban.*, Magyar Szélenergia Társaság, chapter Szélprofil vizsgálatok Magyarországon. Magyar Szélenergia Társaság kiadványai No. 3., pp. 71–77.
- Varga, B., P. Németh, and I. Dobi, 2006: *Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei*, Országos Meteorológiai Szolgálat, chapter Szélprofil vizsgálatok eredményeinek összefoglalása. pp. 7–20.
- Verkaik, J. W. and A. Smits, 2001: *Proceeding of the 3rd European and African Conference on Wind Engineering, 2-6 July, 2001, Eindhoven, the Netherlands*, chapter Interpretation and estimation of the local wind climate. pp. 43–56.
- Vígh, G., 1996: *A szélenergia hasznosításának lehetőségei régen és ma.*. Diplomamunka, ELTE, Budapest.
- Vogt, S. and P. Thomas, 1995: Sodar - a useful remote sounder to measure wind and turbulence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **54/55**, pp. 163–172.
- Wantuchné Dobi, I., Z. Konkolyiné Bihari, T. Szentimrey, and S. G., 2005: *Szélenergia Magyarországon. 2005.01.19., Gödöllő*, Magyar Szélenergia Tudományos Egyesület, chapter Széltérképek Magyarországról. pp.11–16.
- Weisse, R., H. Von Storch, and F. Feser, 2005: Northeast atlantic and north sea storminess as simulated by a regional climate model during 1958-2001 and comparison with observations. *Journal Of Climate*, **18**, pp. 465–479.
- Wieringa, J., 1976: An objective exposure correction method for average wind speeds measured at sheltered location. *Quart.J.R.Met.Soc.*, **102**, pp. 241–253.
- 1983: Description requirements for assessment of non-ideal wind stations - for example aachen. *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **11**, pp. 121–131.

— 1986: Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **112**, 867–889.

WorldBank, 2007: The little green data book 2007.

URL <http://siteresources.worldbank.org/INTDATA/64199955-1178226923002/21322619/LGDB2007.pdf>