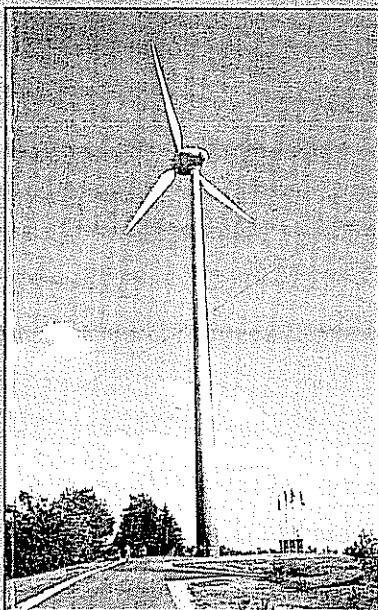
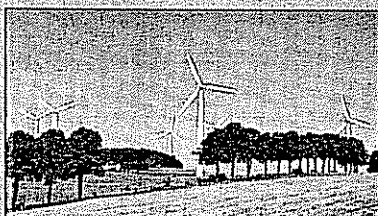


BME-OMIKK MSZO

364.896

GÉP 101



Szerkesztette:  
Dr. Tóth László – Dr. Horváth Gábor

# Alternatív energia

Szélmotorok,  
szélgenerátorok





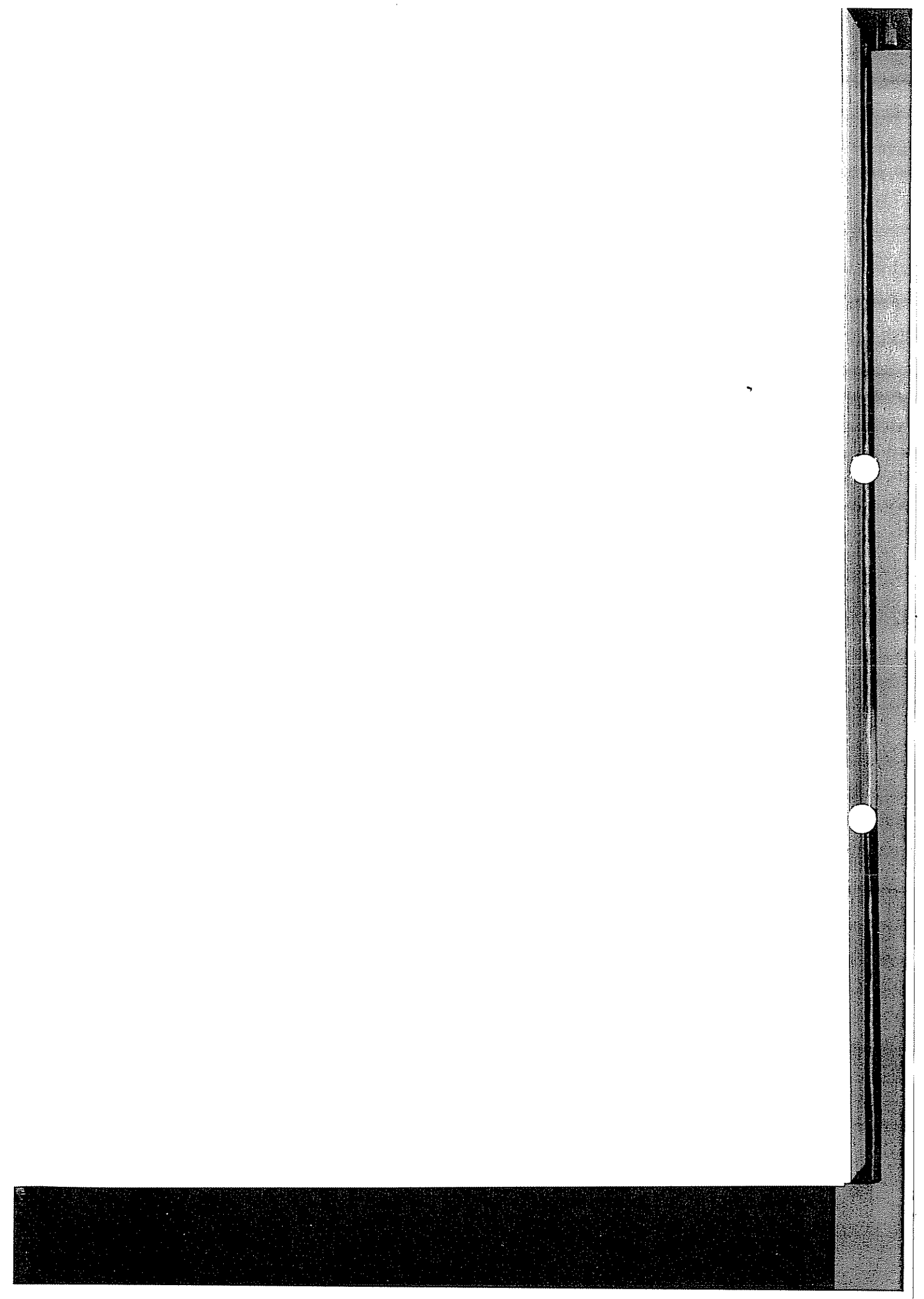
# AZ EUROWIND HUNGARY KFT. TEVÉKENYSÉGI KÖREI:

ELŐZETES KÖRNYEZETI ELEMZÉS  
HELYSZÍNANALÍZIS  
PROJEKT ELŐKÉSZÍTÉS  
SZÉLTÉRKÉP-ÉRTÉKESÍTÉS  
BEFEKTETÉSI TANÁCSADÁS  
BESZERZÉS, GYÁRTÁS  
KIVITELEZÉS  
ÜZEMELTETÉS



**Eurowind  
Hungary**

H-1094 BUDAPEST, ANGYAL U. 1-3  
TEL: +36 1 215 12 59 FAX: +36 1 455 36 43  
E-MAIL: EUROWIND@EUROWIND.HU  
WEB: WWW.EUROWIND.HU





364, 896

*A könyv az Oktatási Minisztérium támogatásával, a Felsőoktatási Pályázatok Irodája által lebonyolított Felsőoktatási Tankönyv- és Szakkönyvtámogatási Pályázat keretében jelent meg.*

*Írták:*

Dr. Horváth Gábor  
SZIE Gépészmérnöki Kar

Dr. Hunyár Mátyás  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Dr. Patay István  
Tessedik Sámuel Főiskola

Schrempf Norbert  
SZIE Gépészmérnöki Kar (PhD)

Stelczer Balázs  
Első Magyar Szélerergia Társaság

Tóth Gábor  
SZIE Gépészmérnöki Kar (PhD)

Dr. Tóth László  
SZIE Gépészmérnöki Kar

*Szerkesztette:*

Dr. Tóth László,

Dr. Horváth Gábor

*Lektorálták:*

Dr. Szlivka Ferenc  
SZIE Gépészmérnöki Kar

Stelczer Balázs



ISBN 963 9553 03 4

2004

Kiadja a Szaktudás Kiadó Ház Rt.

1142 Budapest, Erzsébet királyné útja 36/b

Telefon: 252-4772, 363-0899

Felelős vezető a kiadó elnök-vezérigazgatója

A kiadó rendelkezik az ISO 9002 minőségbiztosítási tanúsítvánnyal

# TARTALOM

ELŐSZÓ .....	13
BEVEZETÉS .....	17
1. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS (Tóth L.) .....	21
1.1. A szélről általában .....	21
1.2. A szélben rejlő energia átalakítása .....	22
1.3. A vízszintes tengelyű szélmotorok .....	24
1.4. A hanyatlás okai a századfordulón .....	28
1.5. Fejlesztések .....	28
1.6. Erőmű méretű egységek .....	31
1.7. Fejlesztések az energiakризист követően .....	33
1.8. Fejlesztések az 1980-as évektől .....	35
1.9. A jövő kilátásai .....	41
2. A SZÉLERŐMŰVEK RENDSZEREZÉSE, SZERKEZETI FELÉPÍTÉSE (Tóth L.) .....	43
2.1. A szélerőművek jellemzése .....	43
2.1.1. Energiatermelés szerint .....	43
2.1.2. Szerkezettani osztályozás .....	44
2.2. Szélmotorok a szivattyúk hajtására .....	49
2.3. Szélgenerátorok .....	55
2.3.1. A teljesítmény szerinti felosztás .....	55
2.3.2. Szélgenerátorok szerkezeti felépítése (Tóth L. – Schrempf N.) .....	57
2.3.2.1. Generátorház .....	57
2.3.2.2. Szárnylapát .....	64
2.3.2.3. A lapátkerékagy és a Pitch mechanizmus .....	67
2.3.2.4. A tartószerkezetek .....	69
2.3.2.5. A főtengely és a csapágy .....	69
2.3.2.6. A nyomaték-váltó .....	70
2.3.2.7. A tengelykapcsoló .....	70
2.3.2.8. A generátor .....	70
2.3.2.9. A mechanikus fék .....	70

2.3.2.10. A széliránykövető	71
2.3.2.11. A vezérlés	71
2.3.2.12. Az üzemi és biztonsági rendszer	71
<b>3. A SZÉL ENERGETIKAI CÉLÚ JELLEMZÉSE (TÓTH L.)</b>	<b>73</b>
3.1. A szél jellemzői	73
3.1.1. A szélerő	73
3.1.2. A globális széljárás	73
3.1.3. A szél struktúrája	75
3.1.4. A földi határréteg	76
3.1.5. A szél változásai	76
3.1.6. A szél időbeni változásának jellemzői	77
3.1.7. A szélváltozás a magasság függvényében	78
3.1.8. Atmoszferikus turbulencia	82
3.1.9. A földfelszíni változások hatása	82
3.1.10. Változások az atmoszferikus stabilitásban	83
3.1.11. Akadályok az áramlás útjában	84
3.1.12. Helyi hőmérséklet-ingadozások	87
3.2. A szélgenerátorok telepítési helyének meghatározása	87
3.2.1. A potenciális szélturbina telephelykiválasztásának fő szempontjai	88
3.2.2. Adott területen a globális szélenergia-potenciál	89
3.2.3. Európa szélerőforrása	90
3.2.4. A konkrét hely kiválasztása	90
3.3. A szél, mint energiaforrás	91
3.3.1. A szél mozgási energiája	91
3.3.2. A szél dinamikus energiaegyenlete	92
3.3.3. A szélenergia-potenciál meghatározása helyszíni mérésekkel	93
3.3.3.1. Mérési adatok gyűjtése (TÓTH G.)	93
3.3.3.2. Mérőműszerek	97
3.3.3.3. A mérési eredmények elemzése	102
3.4. Szélenergia-potenciál meghatározása modellezéssel (HORVÁTH G.–TÓTH G.)	116
3.4.1. Fizikai modellezés	117
3.4.2. Numerikus modellezés	117
3.4.3. NOABL	118
3.4.4. WAsP	119
3.5. Magyarországi modellezések	120
<b>4. SZÉLERŐGÉPEK MŰKÖDÉSÉNEK ELMÉLETI ALAPJAI (PATAY I.)</b>	<b>125</b>
4.1. Sugárelmélet	125
4.2. A teljesítménytényező	128
4.3. Szárnyrács-elmélet	130
4.4. Turbinaelmélet	137
4.5. Jelleggörbék	142



4.6. Az üzemi és szerkezeti jellemzők kapcsolata	149
4.7. A szélérőművekben alkalmazott generátorok és frekvenciaváltók (HUNYÁR M.)	154
4.7.1. Aszinkron generátorok és a fordulatszám-változtatás lehetőségei	154
4.7.1.1. Pólusszám változtatása	156
4.7.1.2. Szlip változtatása	157
4.7.1.3. Frekvencia változtatása	159
4.7.2. Szinkrongenerátorok és frekvenciaváltók	165
4.7.2.1. Hengeres forgórészű szinkrongép	166
4.7.2.2. Kiálló pólusú szinkrongép	167
A 4.7., 5.2 és 5.3. fejezetben alkalmazott jelölések	170
<b>5. SZÉLERŐGÉPEK SZABÁLYOZÁSA ÉS VÉDELME (PATAY I.)</b>	<b>173</b>
5.1. Szélérőgépek rugalmassága	173
5.1.1. Fordulatszám-rugalmasság	173
5.1.2. A széliránykövetés rugalmassága	176
5.2. Alapvető szabályozási feladatok villamosenergia-termelés esetén (HUNYÁR M.)	179
5.2.1. A szélturbina elforgatása vagy elbillentése	181
5.2.2. A lapátszög szabályozása	182
5.2.3. Nyomaték- és teljesítménykorlátozás (speciális szárnyprofil)	185
5.2.4. Szabályozási lehetőségek a fordulatszám változtatásával	187
5.2.5. Követelmények és szabályozási lehetőségek szigetüzemben	189
5.2.6. Az áttétel és a generátor hatásfoka	191
5.3. Szélgenerátorok szabályozása és védelme	193
5.3.1. Közvetlen hálózatra kapcsolódó generátorok védelmi és szabályozási lehetőségei	193
5.3.2. Szabályozás impulzusvezérelt rotoellenállással	199
5.3.3. Frekvenciaváltón keresztül hálózatra csatlakozó generátorok	203
5.3.4. Áttétel nélküli szinkrongenerátorok	210
5.3.5. Kétoldalról táplált generátorok	214
5.3.6. A leggyakoribb szabályozási megoldások a mechanikai kivitelek szerint	219
5.4. Viharvédelem segédlapáttal (PATAY I.)	220
<b>6. A SZÉLGENERÁTOR RÉSZEGYSÉGEINEK REZGÉSEI, A FOLYAMATOK MODELLEZÉSE (HORVÁTH G.)</b>	<b>223</b>
6.1. Aerodinamikus erők és együtthatók	223
6.1.1. A szélteher számítása	228
6.1.2. Aerodinamikus karcsúság	229
6.1.3. A holt zóna és az interferencia	230

6.1.4. Az aeroelaszticitás	231
6.1.5. A szellőkések dinamikus hatása	231
6.2. A szerkezet szellőkésekre adott válasza (aerodinamikus admittancia)	233
6.3. Az örvények jellemzői	236
6.3.1. A lapátkerékről leváló örvények hatása	236
6.3.2. A lapátok forgásából adódó sajátfrekvencia	236
6.3.3. A kör keresztmetszetű henger körüli áramlás	237
6.4. A Kármán-féle örvénysorok szerkezetekre gyakorolt hatása	241
6.4.1. Rezgések a periodikus örvényleválás következtében	242
6.4.2. Oszlopok örvényleválások okozta rezgéseinek megelőzése	243
6.5. A mechanikai rezgések mérése	243
6.5.1. Lapátrezgések	244
6.5.2. Oszlop és alapozás	247
6.5.3. A rezgésamplitúdók elméleti meghatározása	249
6.5.4. Adott frekvenciájú külső gerjesztés okozta rezgések	249
6.5.5. A sajátfrekvencia meghatározásának elmélete	250
6.6. A változó tömegeloszlású és hajlításimerevségű tartók sajátfrekvencia-számítása	251
6.7. Szélcsatornában végzett mérések	253
6.7.1. Modellkísérletek és a hasonlóság kritériumai	253
6.7.2. A Reynolds-szám növelésének lehetőségei	255
6.7.3. Szélcsatornás modellkísérletek	255
6.7.4. Modellezés kismintákkal	258
6.8. A végeelem-modellezés alkalmazása szélgenerátorok tervezésénél és ellenőrzésénél	261
6.8.1. Matematikai alapok	261
6.8.2. A végeelem létrehozása	263
6.8.3. A tengelyszimmetrikus elem merevségegyenlete	264
6.8.4. A modellalkotásról gyakorlati szempontból	265
6.8.5. Rezgéstani modellek	266
6.8.6. Áramlástanai modellek	267
6.8.7. A kapott nyomásértékek felhasználása bemenő terhelésként	269
6.9. Szélgenerátor oszlop modellezése	271
6.9.1. A sajátfrekvencia és a felharmonikusainak meghatározása számítással	271
6.9.2. A sajátfrekvencia meghatározása manuális módszerrel	271
6.9.3. Az oszlop sajátfrekvenciájának meghatározása végeelem analízissel	272
6.9.4. A kritikus szélsébség számítása	273

6.10. A szélgenerátor oszlop geometriai méretének összefüggései .....	276
6.11. Szerkezeti elemek és erők .....	277
6.11.1. Összetett terhelések .....	277
6.11.2. Terhelések a szélgenerátorok lapátjain .....	278
6.11.3. Terhelések a gépházon és az oszlopon .....	279
7. A SZÉLGENERÁTOROK VILLAMOS HÁLÓZATRA KAPCSOLÁSA (TÓTH G.) .....	281
7.1. Szigetüzem .....	281
7.2. A villamos áram közcélú elosztóhálózatra táplálása .....	280
7.3. A hálózatra csatlakozás (műszaki) feltételei (HUNYÁR M.) .....	284
7.4. Hálózat és a generátorok (TÓTH G.) .....	286
7.5. Szinkron generátor hálózatra csatlakozása .....	287
7.6. A villamos hálózat .....	288
7.7. A csatlakoztatás jogi feltételei .....	290
7.7.1. Értékesítési szándék bejelentése .....	290
7.7.2. Az áramszolgáltató hálózatára csatlakozás feltételei .....	291
7.8. Szélerőművek csoportos telepítése .....	295
8. A MEGÉPÍTETT SZÉLERŐMŰVEK VIZSGÁLATA (TÓTH G.) .....	301
8.1. Építés (Inota) .....	301
8.2. Szélgenerátor beépítést követő ellenőrző vizsgálat (Inota) .....	305
8.2.1. A mérés műszerei .....	306
8.2.2. Az adatok feldolgozása, a vizsgálati eredmények .....	307
8.3. 600 kW teljesítményű szélerőmű Kulcs térségében (TÓTH L. STELCZER B.) .....	314
8.3.1. A telepítés előkészítése, a gép kiválasztása .....	314
8.3.2. Építés .....	315
8.3.3. Vizsgálatok .....	317
8.4. A két vizsgált generátor jellemzése .....	320
8.5. A menedzsment rendszer feladatai (HUNYÁR M.) .....	321
9. A SZÉLERŐMŰ KÖRNYEZETI HATÁSAI (HORVÁTH G.) .....	323
9.1. Általános megfontolások .....	323
9.1.1. Komfortérzés és környezet .....	323
9.1.2. A globális felmelegedést okozó anyagok kibocsátásának elkerülése .....	323
9.1.3. A savasodást előidéző anyagok kibocsátásának elkerülése .....	324
9.1.4. A szélenergia-hasznosítás globális előnyei .....	325
9.1.5. A nukleáris energiával kapcsolatos aggodalmak .....	326
9.1.6. Fosszilis tüzelőanyag-tartalékok .....	326



9.2. Közvetlen hatások	327
9.2.1. Földterület-felhasználás	327
9.2.2. Vizuális hatás	327
9.2.3. A zajhatás	329
9.2.4. Elektromágneses zavarás	330
9.2.5. Hatás a madarakra	331
9.2.6. Egyéb környezeti hatások	332
9.3. Energia- és anyagfelhasználás a szélerőmű élettartama alatt	333
9.3.1. Energiafogyasztás	333
9.3.2. Anyagszükséglet	334
9.4. Követelmények az EU-n belül	335
9.4.1. A „legjobb gyakorlat”	336
9.4.2. Telephely kiválasztása	336
9.4.3. Környezeti nyilatkozat	336
9.4.4. Tervezés, építés és üzemeltetés	336
9.4.5. Leszerelés és rekultiváció	337
9.4.6. Újrahasznosítás	337
9.5. Európai célkitűzések	338
9.5.1. A közösségi stratégia	338
9.5.2. Stratégiai célok	338
9.5.3. Fejlesztési célok	339
9.5.4. A megvalósítandó terv	340
9.6. A szélerőművek létesítésével kapcsolatos szabályozás az EU-ban	341
9.6.1. Az irányelvek természete	341
9.6.2. A szélerőműmegvalósíthatósági terve	342
9.6.3. Helykiválasztás	342
9.6.4. A tervezés	344
9.6.5. Dán példa	345
9.6.6. A megvalósíthatósági terv	347
9.6.7. Telepítés	347
9.6.8. Működtetés	348
9.6.9. A lebontás	348
9.6.10. EU-tagországok tapasztalatai, a társadalmi elfogadottság	349
9.7. A szélenergia magyarországi környezetvédelmi szabályozása	349
9.7.1. Érvényes magyar szabványok és jogszabályok	350
9.7.2. Szélerőművekkel kapcsolatos szabályozás lehetséges magyar direktívái	351
9.7.3. Környezeti hatástanulmány	351
9.7.4. Szakhatósági engedélyezési eljárás	352
9.7.5. Szakhatóságok	352

9.7.6. Alapvető tennivalók a szélgenerátor egység tervezéséhez .....	352
9.7.7. A működés .....	354
10. A SZÉLERŐMŰ GYÁRTÁSA (TÓTH L.) .....	355
10.1. Lapátszerkezetek .....	355
10.2. Tartóoszlopok .....	359
11. A SZÉLENERGIA GAZDASÁGOSSÁGA (TÓTH L.) .....	363
11.1. Működtetési és fenntartási költség .....	364
11.2. Egy szélenergia-befektetés gazdaságossági paraméterei .....	365
11.3. Az LPC költségmodell .....	365
11.4. A jövőbeni pénzügyi helyzet (cash flow) tervezése, becslése. ....	366
12. KIFEJEZÉSEK .....	369
IRODALOM .....	375
TÁRGYMUTATÓ .....	379





## Tisztelt Olvasó!

Könyvünk Magyarországon az első olyan munka, amely a szélenergia-hasznosítás minden lényeges problémáját – egyes területeken gyakorlati, más területeken elméleti szempontokból is – tárgyalja.

Szerzőtársaim – az egyébként átfogó ismereteik mellett – egy-egy szakterület specialistái, és e könyvben, a korábbi években végzett elméleti, valamint laboratóriumi kutatási eredményeiket adják közre. E sorok írója mintegy 25 éve foglalkozik szélenergia-hasznosításával, kezdetben kisebb szélmotorok tervezésével, beépítésével, üzemeltetésével, az utóbbi években pedig a villamos energiát előállító, villamos hálózatra csatlakozó szélerőművekkel.

Magyarországon, hosszú időn keresztül (még az 1990-es évek második felében is) sokan azt vallották, hogy a Kárpát-medence területén szélerőművek gazdaságosan nem létesíthetők. Néhány szakember – köztük e könyv szerzői kollektívája is – hitt abban, hogy az országnak vannak területei, ahol meghatározott körülmények között és helyeken szélerőművek létesíthetők és gazdaságosan üzemeltethetők. Természetesen a szélerőművek üzemeltetésének gazdaságossága alapvetően függ az elektromos energia felvásárlási áráról, illetve az objektumok létesítésének támogatásától. A szélből, mint az egyik legtisztább energiaforrásból termelt villamos energia csak társadalmi elismeréssel, ésszerű árpolitikával válhat piacképesé, kerülhet a beruházók érdeklődési körébe, termelhet hasznot a befektetőknek.

A szél a Föld felszínén mindenhol jelen van, tehát olyan helyeken is lehet energiát nyerni, ahol a tradicionális energiaforrások nincsenek. Vagyis villamos erőművek, azaz szélerőművek ezeken a helyeken is megvalósíthatóak, s az általuk termelt energia haszna az ott élő emberek javát közvetlenül is szolgálja, s részesévé válnak egy régió fejlődésének. Ez azt is jelenti, hogy a szélenergia az energiatermelés decentralizálását segíti, mint ahogy az energiafelhasználás is decentralizált.

Vannak területek, amelyek a domborzat következtében ún. szélárnyékban vannak, s ezért gazdaságosan ezeken a területeken szélenergia-hasznosítás nem folytatható. Számos olyan terület is van, ahova környezetvédelmi okokból nem szabad erőműveket telepíteni, de célszerűtlen a telepítés közvetlen lakóhelyek közelébe is, ahol bizonyos – lényegében veszélytelen – zavaró hatásaik fellelhetők. Fontos megjegyezni, hogy a szélerőmű környezeti hatásai közül egyik sem hasonlítható a hagyományos, különösen a fosszilis erőművek által kibocsátott helyi és globális emissziókhoz, amelyek közvetlen hatással vannak az élő szervezetekre.

A Föld energiakészletei mindenféleképpen kimerülnek, hiszen az évmilliók során felhalmozott fosszilis energiahordozókból a felhasználás trendje olyan mérvű, hogy

velük becslések szerint – legfeljebb 50–60 évre biztosított a Föld lakóinak a jelenlegihez hasonló energiaellátása. A technikai fejlesztés a világ energiaigényének megoldása céljából számtalan irányban folyik. Jelenlegi ismereteink szerint generálisan a problémát csak a kimeríthetetlen megújuló energiaforrások hatékony felhasználása oldja meg. Ezek közül – bárhogya is tekintjük, és számolunk – meghatározó a Nap sugárzása, a Föld mozgási és hőenergiája, esetünkben az előbbiekből származtatható szélenergia.

A globális energiagazdálkodási, energia kitermelési, előállítási és felhasználási folyamatok megfigyelésével, valamint elemzésével foglalkozó, e folyamatokban a tapasztalataik belülről „átéló”, érzékelő mérnökök és kutatók látták és látják leginkább az emberiség energiaigényeit szolgáló lehetséges trendek várható alakulásait. Szerintük az emberiség jól felfogott érdeke, hogy kellő ütemben változtasson energiefelhasználási szokásain, szükség szerint az energiatermelő bázisát a megújuló energiaforrásokra helyezze át, s e területeket kutassa [25].

Természetesen, mint ahogy a műszaki fejlődésben nincs megállás, a szélenergia hasznosítás fejlesztése is számos kihívást indukál. Tovább javítandó az energiaátalakító berendezések hatékonysága, megoldandók a hálózatra csatlakozással kapcsolatos anomáliák stb. Nagy perspektívák előtt állnak a kombinált napenergiás szél-turbinák, amelynek erőműi kísérleti változata már meg is épült.

A könyvet író és a szerkesztő kollektíva egyes tagjai részesei voltak a Magyarországon 2002. év végéig megvalósult első 4 villamos energiát előállító szélerőmű létesítésében. A lelkes csapat kezdeményezte, tervezte (TÓTH LÁSZLÓ, STELCZER BALÁZS, HORVÁTH GÁBOR), majd az E-ON Rt. szakembereivel (KORÉNYI ZOLTÁN és munkatársai) kiegészülve építette a ma is példát szolgáltató kulcsi generátort. Külön említtem az Inotán létesített erőmű tervezőit a TRANSELEKTRO Rt. (KAJOR BÉLA és munkatársai), s a létesítő Bakonyi Erőmű Rt. Szakembereit, kollektíváját. Külön elismerés jár az ÉDASZ munkatársainak a Mosonszolnokon (2002. év végére) létrehozott 2 db generátorért.

Napjaink hazai fejlesztőinek nem szabad megfélemedezniük azokról, akik a korábbi időkben sokat tettek a szélenergia hasznosításának elősegítéséért. A jelesek közül csak kettőt kiemelve, a MTESZ Szélenergia Munkacsoport egykori vezetőit, LEDÁCS KIS ALADÁRT és KASSAI FERENCET.

A könyv írásának és nyomdai leadásának időszakában kezdődött el az OM által finanszírozott a Magyarország széltérképének elkészítésére irányuló kutatás, az Országos Meteorológiai Szolgálat, a Debreceni Egyetem, Meteorológiai Tanszék, a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar Agrárenergetika Tanszék, a Boreas Magyarország Kft. és a MEGAVIL Kft. közreműködésével. E programtól várható, hogy jelentős mértékben felderítésre kerül Magyarország szélenergia potenciája, mindazok a helyek, ahol szélerőművek megvalósítása reális, vagyis a területek alkalmasak. Hogy a munkáinkban eddig eljutottunk, köszönet azon intézményeknek, szervezeteknek és munkatársainknak (Ipari Minisztérium, BOHÓCZKI FERENC, Földművelésügyi és Vidékfejlesztési Minisztérium, HANZELI GYÖRGY, MTA MTO. EB. Megújuló. Energetika Technológiák Albizottság, IMRE LÁSZLÓ), akik közvetlen, vagy közvetve segítették kutatásainkat.

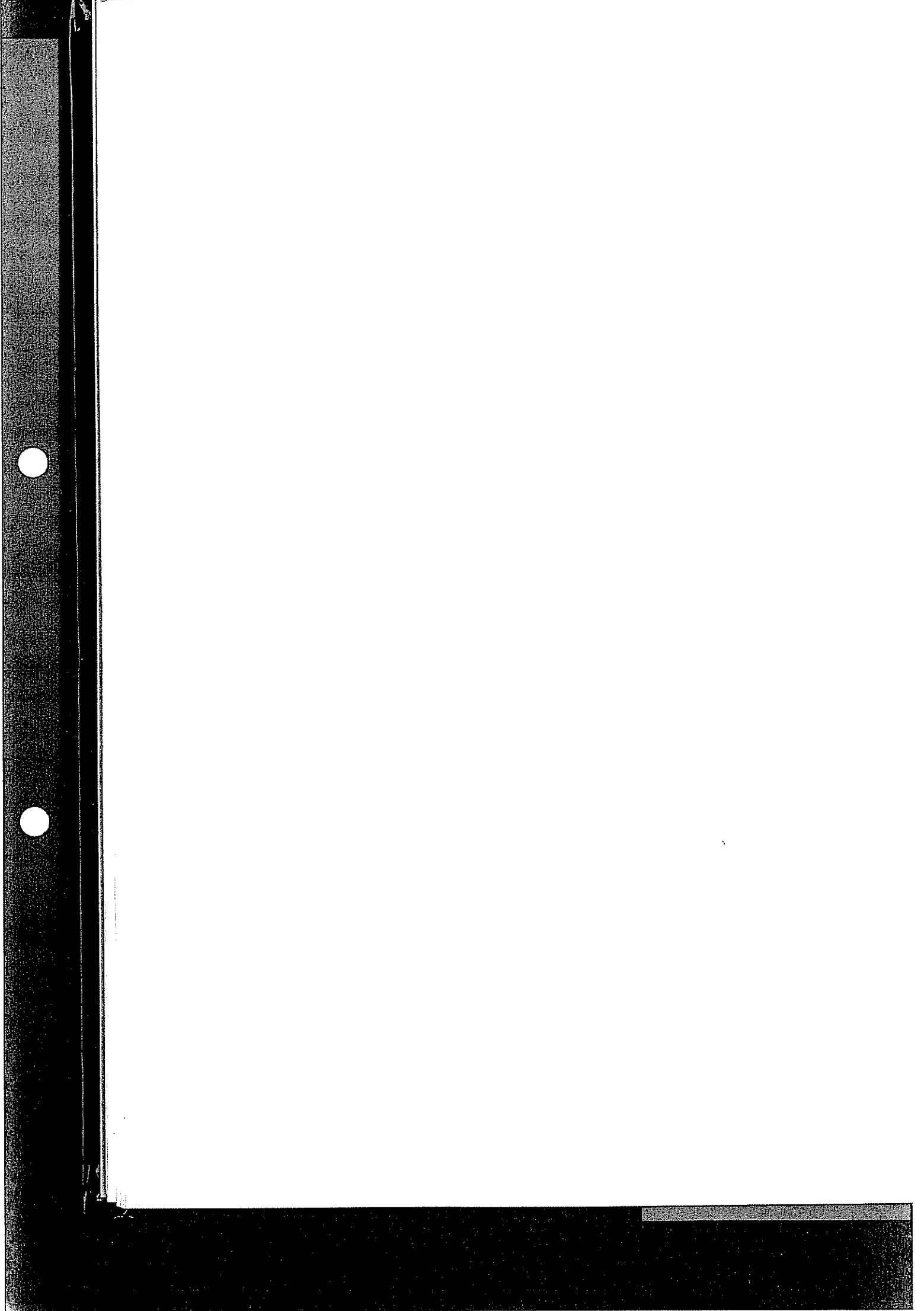
Magam és munkatársaim nevében ezúttal is köszönetet mondok a kézirat elkészítésében közvetlen segítséget nyújtó munkatársainknak, a lektoroknak, s végül, de nem utolsó sorban köszönet a Szaktudás Kiadónak, valamint a kiadást támogató

Oktatási Minisztérium Felsőoktatási Pályázatok Irodájának, továbbá a Földművelésügyi és Vidékfejlesztési Minisztérium Intézményközi Tankönyvkiadási Szakértő Bizottságának (külön is HAJÓS LÁSZLÓ úrnak).

Könyvünket, a megújuló energiaforrásokkal, a környezet gazdálkodással foglalkozó, s egyéb mérnöki tanulmányokat folytató egyetemi hallgatókon túl ajánljuk mindazoknak – műszaki szakembereknek, beruházóknak, akik Magyarországon az energiagazdálkodás területén munkálkodnak, az utóbbiaknak részben azért is, hogy ráirányítsuk a figyelmet a szélenergiában rejlő lehetőségek nagyszerűségére, másrészt pedig azért, hogy támogatókat szerezzünk ezen igen fontos energiaforrás mielőbbi magyarországi széles körű elterjesztéséhez.

*Dr. Tóth László*





# Bevezetés

A népesség növekedésével az energiafelhasználás, és ezért az energiatermelés is rohamosan növekvő tendenciát mutat. Jelenleg az energiatermelés és -fogyasztás az egyik leginkább környezetszennyező emberi tevékenység. Az egészséges környezet előfeltétele többek között a fenntartható energiagazdálkodás megvalósítása. Jelenlegi tudásunk szerint ennek két fontos eleme van: jelenlegi energiaforrásaink hatékony, takarékos használata, és a megújuló, környezetünket nem szennyező energiaforrások alkalmazására való fokozatos áttérés.

A megújuló energiaforrások százalékos részesedése az energiafelhasználásból az EU országokban és Magyarországon (2001)

Ausztria	24,3%	Luxemburg	1,4%
Belgium	1,0%	Németország	1,8%
Dánia	7,35%	Olaszország	5,5%
Egyesült Királyság	0,7%	Portugália	15,7%
Finnország	21,3%	Spanyolország	5,7%
Franciaország	7,1 5%	Svédország	25,4%
Görögország	7,3%	Európai Unió átlaga	5,3%
Hollandia	1,4%		
Írország	2,0%	MAGYARORSZÁG	3,6%

Korunk egyik legsürgetőbb, megoldásra váró feladata az egyre növekvő energiaigények kielégítése. Tudjuk, hogy Földünk kőolaj-, földgáz- és szénkészlete egyre csökken, az atomenergia előállítása pedig olyan környezetre káros végtermékeket eredményez, amelyek tárolása hosszú távon nagyon nehéz feladat. Megoldás a megújuló energiaforrások a víz, a szél és a Nap energiájának kihasználása. A vízierőművek telepítésének határt szabnak a földrajzi, vízgazdálkodási, természetvédelmi szempontok, a napenergia felhasználás pedig nem biztosít nagy mennyiségű azonnal rendelkezésre álló energiát.

*Marad tehát a szél biztosította lehetőségek kiaknázása. A szélenergia hasznosítása környezeti szempontból azért is kiemelkedő, mivel a szélerőművek működésük folyamán gyakorlatilag nem állítanak elő káros melléktermékeket, miközben rendkívül alacsonyak az externális és a szociális költségeik, továbbá nem jelent problémát az elhasznált erőművek lebontása sem.*

A szélerőművek száma Európában csakúgy, mint a Föld többi országában egyre növekszik, ezzel arányosan természetesen nő az ilyen típusú erőművek által előállított energia aránya az összes energiához képest [28].

A táblázatból látható, hogy az említett arány az óceánparti, tengerparti illetve nagy összefüggő síkságokkal rendelkező országokban a legnagyobb. Hiszen ezeken a helyeken a szél egyenletesen és megfelelő sebességgel fúj, biztosítva az erőművek folyamatos, zavartalan működését.

Magyarországon nem régen indult el az a folyamat, hogy a meglevő jellemző széljárásokból lehetőség legyen energia gazdaságos hasznosítására. Ennek az alapja, a szélgenerátorok működési sajátosságait figyelembe véve, a helyi szélmozgások felmérése.

Az energiapolitika tervei szerint az ezredfordulót követő években Magyarországon az összes energiateljesítésen belül a megújuló 5-6% körül legyen.

Megújuló energiahordozóra vonatkozó EU irányelvek:

- az EU-ban a megújuló energiahordozóval előállított villamos energia 2000. évi 14%-os részarányát 2010-re 22,1%-ra kell növelni (erősen differenciált arányok szerint 2001/77/EK irányelv);
- a megújuló energiahordozók EU-beli 5,3%-os részaránya 2010-re 12% lesz (Fehér Könyv).

Magyarország felé az elvárás:

- a jelenlegi 3,6%-os megújuló energiahordozó részarányt 2010-re 5%-ra kell növelni (hosszú távú energiatakarékossági program);
- a megújuló energiákkal termelt villamos energia 0,7%-os részarányát 2010-re pedig 3,5%-ra kell növelni.

A fejlesztéseket a vállalt aktuális nemzetközi környezetvédelmi kötelezettségvállalások is generálják, így:

- SO<sub>2</sub>-kibocsátás mérséklése:
  - 1980-hoz képest a Kén-II. Egyezmény alapján
  - 2000-re – 45%
  - 2005-re – 50%
  - 2010-re – 60%
- CO<sub>2</sub>-kibocsátás mérséklése:
  - 1992. évi vállalás: az 1985–1987-hez képest nem lehet növekmény 2000-ig,
  - 1997. évi vállalás: a korábbi vállalás 6%-os mérséklése 2010-ig (Kyoto).

A célok elérésére létrehozott EU pénzügyi alap segítségével 15 000 MW teljesítményű szélerőművet kell létesíteni. Európában a tengerpartokra telepített szélgenerátorok működésével, üzemeltetésével, energiaszolgáltatásával kapcsolatban szerzett kedvező tapasztalatok nyomán megkezdődött a terjeszkedés a kontinens belseje felé.

*EU-ban épített szélerőművek üzemeltetése révén évenként  
elkerült károsanyag-kibocsátások:*

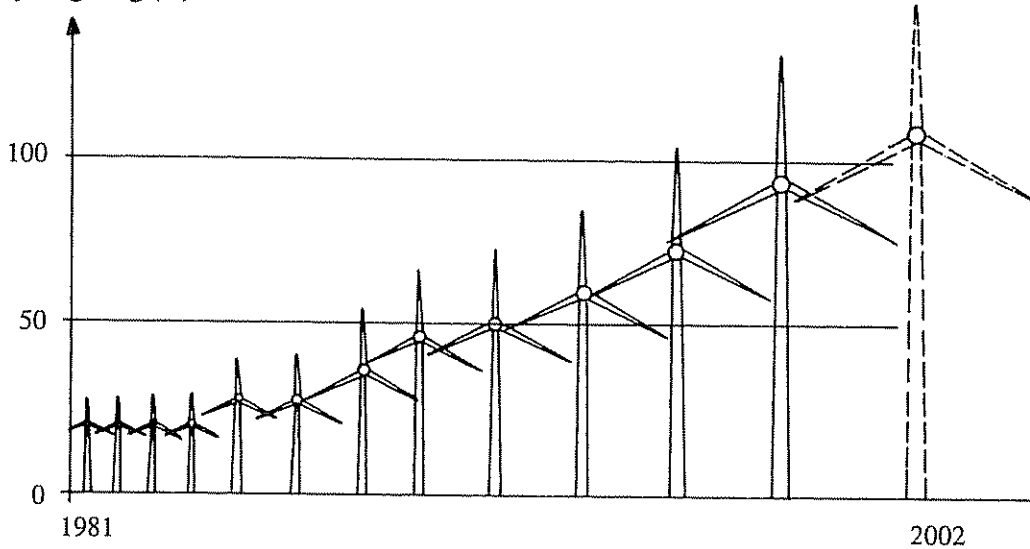
Üzembe helyezett kapacitás:	20 000 MW
Előállított energia:	40 TWh/év
Elkerült kibocsátás:	
CO <sub>2</sub>	35 000 000 t/év
SO <sub>2</sub>	120 000 t/év
NO <sub>x</sub>	100 000 t/év

Egy magyarországi projekt megvalósítása révén felépült 600 kW teljesítményű szélérőmű havonta átlagosan 92 000 kWh elektromos áramot termel (Kulcs, 2001). Ez havi 24 700 MJ energiának felel meg, amit ~10 000 m<sup>3</sup> gáz elégetésével lehet előteremteni, s e folyamat ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) során 1232 kg CO<sub>2</sub> keletkezik. Vagyis egy 600 kW teljesítményű szélgenerátor a fosszilis erőművekkel szemben évi 15 tonna CO<sub>2</sub>-től kíméli meg a környezetet.

A szélérőművek egyedi teljesítménye az elmúlt évtizedben jelentősen növekedett.

Az első korszerű, általános célra használható generátorok teljesítményének felső határa 100–200 kW volt, míg manapság nem ritka, hogy a szélgenerátor 2,5–4,5 MW maximális teljesítményt képes leadni [28]. A teljesítmény növelése maga után vonja a gépészeti és villamos berendezések tömegének növekedését is. A folyamatos fejlesztések során a tartóoszlopok magassága is változott. Ma már gyakran találkozhatunk 120 m magas oszlopokkal is. A fejlődés trendjére a következő ábra és táblázat mutat példát. (forrás: Vestas katalógus)

Torony magasság (m)



Építés éve	1981	1984	1986	1987	1988	1989	1991	1995	1997	1998	1999	2000	2002
Típus									V47	V52	V66	V80	V90
Teljesítmény, kW	55	75	90	100	200	225	500	600	660	850	1750	2000	3000
Lapátkerék átmérő, m	15/16	17	19	20	25	27/29	39	44	47	52	66	80	90
Szabályozás*	Stall	Stall	Stall	Stall	Stall	Pitch	Stall	Stall	Stall Opti-Slip	Stall Opti-Slip	Stall Opti-Slip	Stall Opti-Slip	Stall Opti-Slip
Torony magasság, m.	22	22	22	31	31	39	50	50	55	65	78	100	xxx
Évi energia termelés, MWh/év:**	217	265	301	346	662	860	1671	1904	2372	2998	5303	7041	xxxx

Megjegyzés:

- \*Stall = speciális lapátforma, de a lapát a tengelye körül nem forgatható el, Pitch = a lapát a hosszirányú tengelye mentén elforgatható,
- OptiSlip = a generátor fázis szögének - sietés, -késés - energia szint szerinti optimalizálása,
- OptiSpeed = a szögsebesség energia szint szerinti optimalizálása.
- \*\*Az adatok oszlop magasságában: 8 m/s-os átlagos szélesebbeségre. c=2-re, 1,225 kg/m<sup>3</sup> légsűrűsége vonatkoznak.
- xxx 100 m-nél magasabb oszlopokon,
- xxxx - az adatok még nem ismertek



# 1. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

## 1.1. A szélről általában

A szél egyike azoknak a természeti energiaforrásoknak, amelynek szerepe az emberiség története során többször is változott.

A szélenergia a Nap energiájából származik, szintén megújuló energiaforrás. A földfelszínre érő napsugárzás erőssége nem mindenütt egyforma. Ez egyrészt földrajzi szélességtől függ, mivel a különböző földrajzi szélességeken a napsugárzás beesési szöge eltérő. Függ továbbá a napsugárzás erőssége az évszaktól és attól is, hogy az adott terület felett az égbolt derült-e vagy borult.

Ezért a Föld különböző részein különféleképpen melegszik fel a talaj. A felmelegedés mértéke adott földrajzi szélességen, adott időpontban, még azonos napállás esetén is – a talaj szerkezetétől függően – eltérő lehet. Igen eltérően melegsznek fel még adott napsugárzás hatására is a szárazföldek különböző anyagai és a vízfelületek, attól függően, hogy mennyi energiát nyelnek el a beeső sugárzásból. Vagyis az, hogy adott felület a beeső sugárzás hányadrészét verivissza, attól is függ, mennyire darabos vagy sima az illető anyag, továbbá milyen a felület szerkezete.

A felmelegedés szempontjából tehát csak a talaj vagy a víz által elnyelt sugárzás energiataralma jön szóba; a visszavert sugárzás elvész, az a világűrbe távozik. A levegő pedig nem a beeső, illetve a visszavert sugárzás következtében melegszik fel, hanem a talaj vagy víz által elnyelt, és ott hosszabb hullámhosszúságúvá átalakult hőszugárzás révén. Ennek eredményeként a Földön mindig vannak olyan helyek, amelyek felett eltérő hőmérsékletű nagy légtömegek helyezkednek el. A hőmérséklet-különbség következtében a levegő sűrűségében és nyomásában is különbség keletkezik. A nyomáskülönbség hatására a légkörben áramlás indul meg, s ez mindaddig tart, amíg a hőmérséklet-különbség – s ezzel természetesen a sűrűség- és nyomáskülönbség is – nem egyenlítődnék ki. Így jönnek létre Földünkön a szelek.

A szélesebb két fő tényezője közül az egyik az, hogy mekkora légtömegek között áll fenn a hőmérséklet-különbség. A szél annál hevesebb, minél nagyobb a különbség, és minél nagyobb légtömegek hőmérséklete tér el egymástól.

Az imént azt mondtuk, hogy a szél mindaddig fúj, amíg a hőmérséklet-különbségek ki nem egyenlítődnék. Vannak azonban Földünknek olyan területei is, ahol ez a kiegyenlítődé a szomszédos helyek talajában állandó jelleggel meglévő erőteljes hőelnyelő képesség különbség következtében gyakorlatilag sohasem mehet végbe. Ezek a Föld legszelesebb területei, s a szélenergia hasznosítása szempontjából elsősorban ezek jönnek számításba [64].

A szelek sebessége természetesen eltérő, az enyhe légmozgástól az óránként 100 kilométeres sebességet is meghaladó, száguldó viharokig, gyakorlatilag minden szél-

sebesség előfordul. Ez különlegesen megnehezíti a szélenergia ipari méretű felhasználását, hiszen a viharos sebességű szelek a szélenergiát hasznosító berendezésekben is károkat okozhatnak. Ezért a modern szél erőműveket úgy kell megszerkeszteni és megépíteni, hogy a konstrukció önműködően védelmet nyújtson a viharkárok ellen.

## 1.2. A szélben rejlő energia átalakítása

A különböző sebességgel áramló levegő mozgási energiájánál fogva képes munkavégzésre. Ez a munkavégző képesség azonban a gázok áramlási törvényei alapján nem közvetlenül a kinetikus energiával, vagyis az áramló légtömegek sebességének négyzetével, hanem a sebesség harmadik hatványával arányos. Az erőművek hatásfoka ezért oly rendkívül érzékeny a szélesebesség változására.

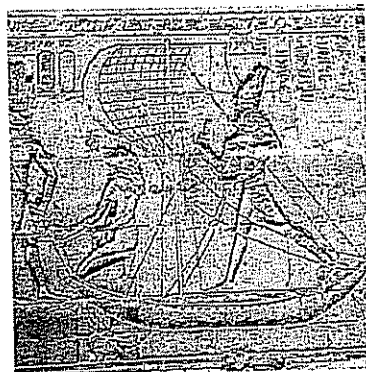
*A mai szél erőművek általában 32–36 km/h, vagyis 9–10 m/s szélesebességen már a névleges teljesítményt adják le. Az a legkisebb szélesebesség, amelyen e rendszerek még képesek energiatermelésre úgy, hogy az előállított villamos energia paraméterei a követelményeknek megfeleljenek, a 3–4 m/s. A 25 m/s felső határt meghaladó szélesebességek esetére az erőműveket olyan védelemben kell részesíteni, amely biztosítja azok épségét.*

A szélenergia felhasználásával kapcsolatos másik nehézség azzal függ össze, hogy a szeleknek nemcsak a sebessége, hanem az iránya is változik. Csak kevés olyan helye van a Földnek, ahol a szélirány állandóan vagy hosszabb időszakon át változatlan marad. Ezért a szél erőműveknek különféle típusai fejlődtek ki.

Az ember a szél erőművek megjelenése előtt is hasznosította már a szélenergiát. Ezen energiatípus hasznosításának kezdő időpontját az első vitorlás hajó megjelenésétől számíthatjuk. Ám a tényleges történelmi időpont ismeretlen.

A szél energiáját a legrégebbi időkben csak hajók és dereglyék hajtására használták fel. Vitorlákat már a primitív ősemberek is használtak vízi járműveik hajtására, ugyanúgy, ahogy a ma élő vízpartlakó emberek is. Amikor azután kialakult az első szélmalom gondolata, a vitorlás hajóról vették a mintát, vitorlákat feszítettek ki a szélkerék küllőire és ezeket a vitorlákat ugyanúgy kezelték, mint a hajó vitorláját: kifeszítették, bevonták, ahogy a szél ereje megkívánta (1.1. ábra).

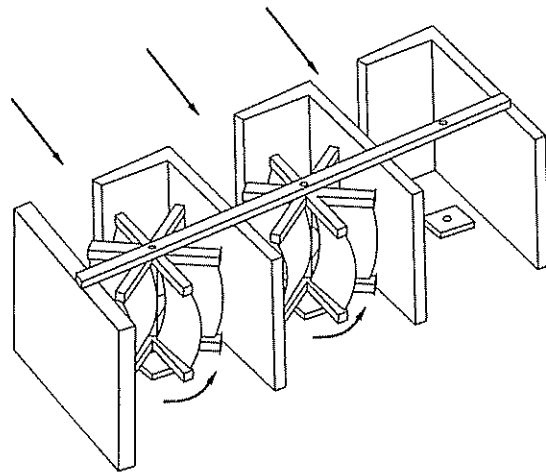
Amikor az ősi társadalmak már öntözéses mezőgazdálkodást folytattak és gabonájukat liszté őrölték, szükségük volt valamiféle erőforrásra is, amellyel az öntözővizet a földekre emeljék és a malomköveket az őrléshez szükséges mozgásban tartásuk.



11 ábra A szél felhasználása a hajózásban (egyiptomi falrajz)

Erre a célra kezdetben az emberi erő volt az egyetlen energiaforrás, amihez később az igavonó állat ereje is járult. Ezek helyett a kedvező széljárású vidékeken a szél energiája valósággal kínálkozott a kihasználásra.

A legősibb szélmalomok romjait SVEN HEDIN svéd kutató expedíciója az iráni, afgán határ közelében, Neh-ben fedezte fel. Az itteni szélviszonyok különösen kedvezőek voltak a szélérőművek felállítása szempontjából, mert itt jóformán állandó északi szél fúj. Ennek megfelelően a szélérőműveket is erre az állandó egyirányú szélre lehetett beállítani, sőt arra is volt mód, hogy több szélkereket állítottak fel egy sorban egymás mellé, az uralkodó szél irányával szemben anélkül, hogy ezek egymást zavarták volna. A szélkerekek függőleges tengelyűek voltak; elrendezésük (rekonstruálva) az 1.2. ábrán látható.



1.2. ábra. Perzsa szélmalom

A vitorlákat függőleges tengelyen alul és fölül felerősített küllőkre feszítették. A szélkereket egyik oldalán a szél ellen árnyékolni kellett, mert az csak ebben az esetben forog, ill. fejt ki erőt. Erre az agyagtéglából épült falak szolgáltak. A szélérőmű valószínűleg vizet emelt az öntözéses földműveléshez.

Egy hasonló függőleges tengelyű szélérőművet ír le, és vonalas vázlatot is ad róla az ókori arab tudós: DISZMASGHI, i. e. 1271-ben. A szélkerék az alatta elhelyezett, közvetlenül a szélkerék tengelyére erősített malomkövet hajtotta.

Ebből a két adatból arra következtethetünk, hogy a szélérőmű legősibb formája a függőleges tengelyű és küllőkre feszített vitorlájú szélkerék volt, mellyel továbbfejlesztett formákban – még a középkorban is találkozunk. Ezt a feltevést az is alátámasztja, hogy a függőleges tengelyű szélkerék szerkezetileg is egyszerűbb bármely más szélkeréknél, és kivitelében is legközelebb áll az ősi vitorlás hajó elvéhez, amely csak a vitorla légellenállását használta ki.

A középkori városképeken látható függőleges tengelyű szélkerekek elvben csupán annyiban különböznek az ókoriaktól, hogy ezeknek a vitorláit csak a felső szegélyük mentén erősítik a lapátokra, és így a szél csak az egyik oldalon feszíti a vitorlát a lapát farácsára, míg a másik oldalon zászló módjára lebeg. Itt tehát nincs szükség árnyékoló falakra, a szélkerék szabadon emelkedik ki a házak teteje fölé és bármely irányú szélben forogni kezd.

Ezt a forgómozgást azután különféle áttételek segítségével különféle munkák elvégzésére használhatják fel. Az ősi felhasználások legelterjedtebb területei a következők voltak:

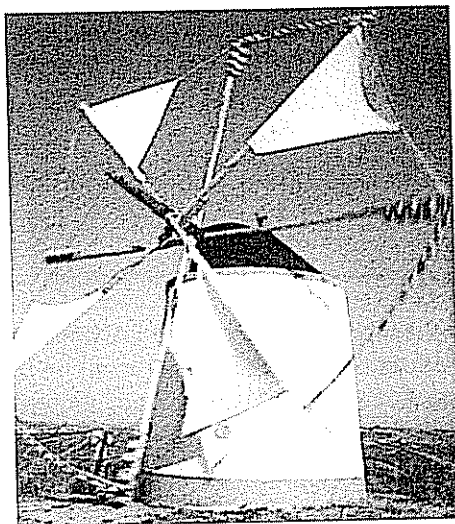
- víz szivattyúzása, öntözés céljaira,
- gabona és különféle termények magvainak őrlése: szélmalom.

A középkor táján megjelent egy másik csoportja is a szélmalomoknak. Ezekben a forgómozgássá átalakított szélenergiát feldolgozásra használták fel. Az ilyen szélmalomokat fűrészmalmoknak is nevezték. Az említett malomtípusokból Európa-szerete még a múlt században is igen sok működött.

### 1.3. A vízszintes tengelyű szélmotorok

A már említett függőleges tengelyű szélkerék mellett a szélenergia hasznosításának egy más típusú eszköze is kialakult: a vízszintes tengelyű szélkerék. Legősibb alakja valószínűleg az a szélmalom, amelyből a görög szigeteken és Kis-Ázsiában ma is szép számmal találunk működő példányokat. A vízszintes tengely széloldali végére erősített 9 külön háromszögű vitorlák feszülnek. A malom kör alapú falépítmény, amelynek felső peremén minden irányban bevájások vannak a csapágyazás számára. A szélkerék tengelyét azután mindig abba a két egymással szemközti csapágyba helyezik, amely a szélirányban fekszik. Ha a szél iránya tartósan megváltozik, a szélkerekeket tengelyestől kiemelik ágyazásából és a másik két csapágyba helyezik [34].

Ez az elrendezés azonban csak azokon a vidékeken vált be, ahol a szél iránya hosszú időn át nem változik lényegesen. Ezért további fejlődésre volt szükség, egy olyan szél-erőműre, amelynek szélkereke könnyen beállítható a szélirányba. Így fejlődött ki Németalföldön a „hollandi” és Németországban a Bock-malom. Előbbi megoldásnál a vízszintes tengelyt egy kúp alakú tartószerkezetben helyezik el. Ha a szél iránya változik, akkor a tengely az egész tartószerkezettel egyetemben elfordulva veszi fel a megváltozott széliránynak megfelelő helyzetet, míg az utóbbinál a szélkerék az egész hozzácsatlakozó rendszerrel együtt fordul el, hogy ismét beálljon a szélirányba. Azt a pontot, amely körül az egész malom elfordulását végzi, királycsapnak nevezik. (1.3. ábra)



1.3. ábra „Vízszintes tengelyű” vitorlás szélmalom

Mind a függőleges tengelyű szélkereket, mind pedig a vízszintes tengelyű változatának bemutatott típusait csak viszonylag állandó szélirányú helyeken alkalmazhatták gazdaságosan. Ilyen területek azonban még a Föld szélben gazdag vidékein is ritkák. Ezért olyan megoldást kellett keresniük, amelynél a tengely önműködően beáll a szélirányba. A fejlődés során több megoldás is kialakult, ám közülük csak kettő terjedt el általánosan.

A függőleges tengelyű szélkerék bármilyen irányú szélben egyformán dolgozik, ugyanakkor a vízszintes tengelyű szárnylapátos szélkereket be kell állítani a szél irányába. Az előbbi tehát korszerűbbnek látszik. Mi az oka mégis, hogy az utóbbi szorította ki az előbbi, hogy azokból ma már egy sem maradt fenn, míg a régi, szárnylapátos, vízszintes tengelyű szélmalombokból még mindig sok ezer van üzemképes állapotban. A magyarázat igen egyszerű. Ugyanazon lapátméreték és lapátkerék-átmérő mellett a vízszintes tengelyű, szárnylapátos szélkerék kb. tízszer akkora teljesítményt ad, mint a függőleges tengelyű. Ezt a hatalmas teljesítménykülönbséget még mérőeszközök nélkül is könnyen megállapíthatják, és azért döntöttek a vízszintes tengelyű csavarlapátos szerkezetű szélmalom javára.

Az észak-európai szélmalomok létezését igazoló legrégebbi okmány a IX. századból maradt fenn. Angliában a croylandi apátságban i. sz. 806-ban létesítettek egy szélmalomot, majd Franciaországban 1105-ben szélmalom építési terveit nyújtották be az egyik kolostornak. Okmányok szerint Németalföldön a XIII. század vége felé, Németországban pedig a XIV. században építettek szélmalomokat. Hollandiában a „szélerőművek” a későbbi századokban úgy megszorodtak és szerkezetileg is annyira tökéletesedtek, hogy a XIV–XV. században már nemcsak hazai felhasználásra termeltek, hanem külföldi bér munkát is vállaltak. Hollandia öntözéses mezőgazdaságának nagyarányú fejlődését is részben szélerő-telepeinek köszönheti; ezeket ui. vízszivattyúzásra is kihasználták. (Amikor 1924–1930-ban a Zuider-tavat a tengertől gáttal zárták le, a víz átszivattyúzásához a tóból a tengerbe sok szélerő-telepet is felhasználtak (1.4. ábra).

A középkorban használt különféle rendszerű szélmalomokról Faustus Verantius 1595-ben írt könyve, a *Machinae Novae* nyújt felvilágosítást. Verantius műve alapján feltehető, hogy a szélmalom már akkor általánosan ismert szerkezet volt és annyi volt belőle, hogy Európa gabonatermését nagyjából azok őrölték fel.

Magyarországon többvitorlás szélmalomokat létesítettek, mert néhol csak kisszilárdságú vályogot tudtak vetni, s ez meghatározta az épületmagasságot. Ott, ahol természetes talajkiemelkedésre (magányos dombra) tudtak építeni, a kisebb átmérőjű sűrű lapátos malmok is megfelelőek voltak.



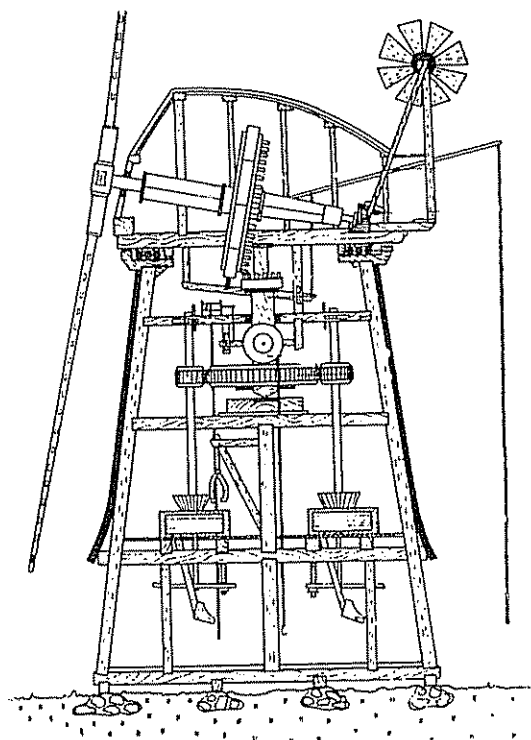
1.4 ábra. Holland szélmalomok (Forrás: Regnolds, 1974)

Az alföldi szélmalomok nagyobb részénél megfigyelhető a négyágú hosszúlápátos forma, amelyeket a XVII. sz.-tól holland formában merítve építik, és ez a forma megmarad a XIX. sz. végén is.

A vitorlázat kialakítása a lapátózástól függetlenül meglehetősen sokszínűséget mutat. Készülhettek teljes vagy részleges deszkázással. Az előbbi hátránya a szabályozhatatlansága, előnye viszont a hosszú élettartam és a kevesebb munkaigény. A vásznazással kombinált típusoknál már a beállítási lehetőség is adott volt. Nagyobb szélsebesség esetén a molnár a vitorlázatra felmászva összetekerte és a vászszerkezethez rögzítette a vásznat. (Az állandó deszkázás mindig a tengelyhez közelebb eső részen található.)

A *zsáluleveles vitorlaszárnyak* hosszirányban két – egy keskenyebb és egy szélesebb – sávra osztottak. Mindkét mező zsálulevelei egymástól függetlenül állíthatók. Ha erős légáramlat ütközik a vitorlaszárnyakhoz, akkor a kisebb mező zsáluleveleit zárják egységes felületté, a szélesebb mező zsáluleveleit pedig a levegő áramlásának síkjával párhuzamosan fordítják. A vitorla síkjára merőlegesen álló zsáluleveleken a légáramlat nem fejt ki erőhatást. Ha az összes zsálulevelet a vitorla síkjába fordítják, teljes zárt vitorlafelületet kapnak, ami gyengébb szél esetében is megfelelő erőt tud a mechanizmusnak átadni. Ez jelentette a legmagasabb szintű technikát, sőt még napjainkban is nehéz feladat faszalukból egy egységes aerodinamikai felületet alkotni, figyelemmel arra, hogy a faszerkezet ki van téve az időjárás viszontagságainak (1.5. ábra).

Magyarországon főleg a vásznazott léces vitorlákat alkalmazták, s a megmaradt műemlékeken is ezek láthatók (Kecskemét, Ópusztaszer, Kiskunhalas). A vitorlaszárakat hevederekkel a kis- és nagykereszt-ágra rögzítették, ezeket a szeles-tengelybe



1.5. ábra. Faszervezeti egységekből összeállított klasszikus konstrukciós elveket képviselő szélmalom (Forrás: WPP.2002.)



véselt üregekbe csúsztatták  $90^\circ$ -os osztással egymás mögé helyezve, majd ékekkel rögzítették. Megjelent az a megoldás is, amikor a lécezéssel ellentétes oldalon végigdeszkázták az egész vitorlaszárát, ennek hatására javultak az áramlási tulajdonságok olyannyira, hogy akár kizárólag a deszkázással is üzemelt a malom (1.6. ábra).



1.6. ábra. Tés község körzetében felépült szélmalom (1870)

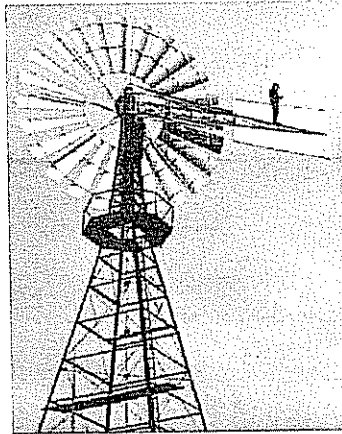
A forgássíkot általában  $10$ – $15^\circ$ -os szögben hátradöntötték, ami jelentős szerepet játszott a tetőszerkezet rögzítésében. A szélből eredő erő függőleges komponense segíti a tető kötését, ami a szélerő növekedésének hatására még erősödik is. A tető védelme (lesodródása, törése) érdekében le lehet oldani a vitorlaszárakat tartó kengyeleket és így csökkenthető az aktív felület.

Az első olyan malmok, amelyek már ki tudták használni a változó szélirányt, az ún. bakos malmok voltak. Ezeknél az egész építményt forgatták egy több gyámmal támasztott függőleges gerendatengely körül. Az így épített malom már könnyűszerkezetes felépítményt igényelt, mind a stabilitás, mind a kezelhetőség érdekében. A favázás tetőt deszkázták, vagy faszindelyes borítással látták el.

A modern négylapátos tornyos szélmalom a XVII. sz.-tól jelennek meg hazánkban, valószínűleg Hollandiából hazatérő diákok megfigyeléseinek köszönhetően.

A szélmalomtechnikában is megjelent az automatizálás. Korán, már a XV. sz.-ban alkalmaztak centrifugális szabályozású malmot. Az automatika feladata volt, hogy a hirtelen szellőkés hatására megnövekvő fordulatszám káros hatásait (kötörés, összeégés, fogtörés) kiküszöbölje. Gyakran alkalmazták azt a megoldást, ahol a röpsúlyos tengelyt (gőzgépekéhez hasonló alakú) a követ hajtó tengelyről hajtották meg, így annak fordulatszámával arányosan tértek ki a röpsúlyok. A röpsúlyok mozgását áttételezéseken keresztül a kisgarat vagy az emelőszelep mozgására használták. A fordulatszám növekedésével a regulátor megnövelte a beáramló gabona mennyiségét ezáltal lefékezve a fordulatot.

Az USA a chicagói világkiállításon (1876) egy fémszerkezetű, soklapátos, lassújárású szélerőmű vonta magára a közfigyelmet, amely vizet szivattyúzott. Habár



1.7 ábra. Amerikai vízhozó szélmotor az 1900-as évek elején

ez a szélkerék áramlástanilag messze elmarad a tökéletestől és vízszivattyúval való terhelése sem volt arányos a mindenkori teljesítményével, mégis gyorsan elterjedt, mert nagy lapátfelületei miatt már gyenge (2,5 m/s sebességű) szélnél is megindult. Erősebb szél sem rongálta meg, mert 7–8 m/s sebességű szélnél automatikusan oldalt fordult és ekkor síkjával állt a szél felé úgy, hogy a szél nem tehetett benne kárt (1.7. ábra).

Ezt a szélerőmű típust később Anglia is átvette, és sorozatban gyártotta főleg dél-afrikai és ausztráliai domíniumai számára.

## 1.4. A hanyatlás okai a századfordulón

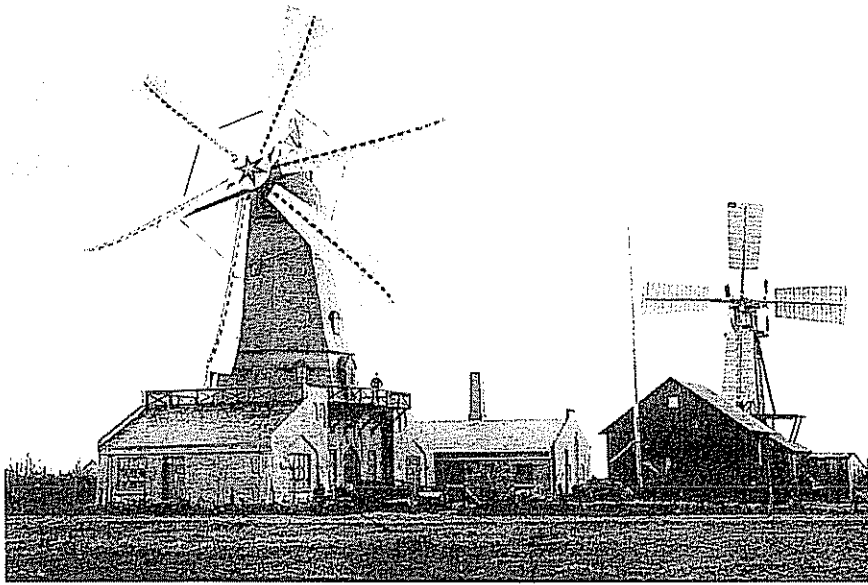
1890-es évekig sok ezer szélmalom épült és működött Európában, ez idő tájt 712 szélmalom volt Magyarországon is. A XIX. század második felében megjelentek a gőzmalmok, amelyek már olcsóbban, nagyobb kapacitással és főleg kiszámíthatóan vállalták a munkát. A szélmalomok legtöbbször ettől kezdődően pusztult el. Egyrésztüket lebontották másrésztük a gondozás hiányában összedőlt.

A szélmalomok kezdettől azzal a hátránnyal küszködtek, hogy csak akkor dolgozhattak, amikor a szél fúj. Később is hiába teremtett a technikai fejlődés eszközöket a szélcsendek áthidalására (könnyen és gyorsan üzembe helyezhető dízelmotor, szélben gazdag időszakokban feltölthető akkumulátortelepet) ezek nagymértékben növelték a beruházás összegét.

A fentebbi okokból pl. Németországban, az 1895-ben még üzemelő 18 200 szélmalomból 1913-ban már csak 13 405 létezett, közülük 11 366 dolgozott tisztán szélenergiával, míg a többi más energiaforrást is igénybe vett. Ez időszakban Északnyugat-Európában közel 20 000 nagy szélmalom szüntette be üzemét. Ugyanez a folyamat játszódott le Magyarországon is.

## 1.5. Fejlesztések

Már a századfordulón egyes szakemberek úgy vélekedtek, hogy a leépülési folyamat a szélerőművek korszerűsítésével talán még megállítható, sőt esetleg vissza is fordítható (1.8. ábra).



18 ábra. A La Cour gépek

A kezdeti kísérleti eredményekről szól LA COUR a „Die Windkraft und ihre Anwendung zum Antrieb von Elektrizitätswerken” (A szélenergia és felhasználása villamos energia termelésére) c. könyvében (1905).

Ez volt az első kísérleti szélerőmű, amely szélenergiával elektromosságot termelt, és az így termelt elektromossággal munkagépeket hajtott.

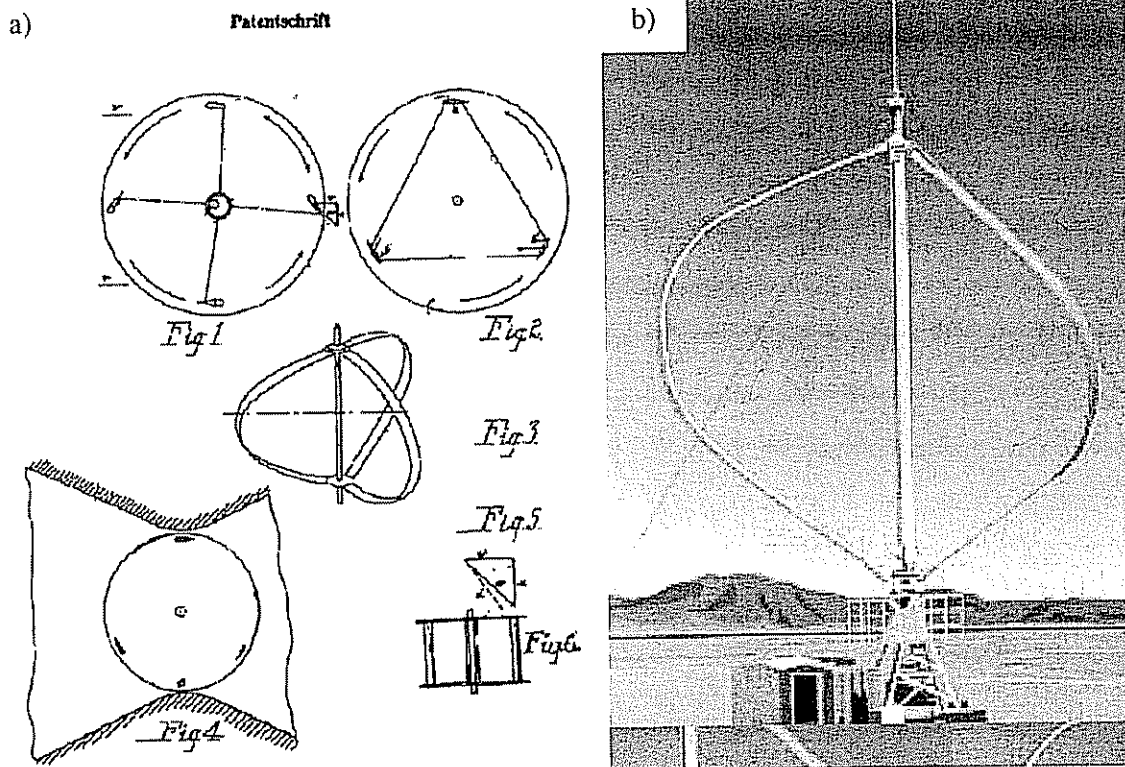
Az 1914–1918-as világháború folyamán a *repülő gépek fejlesztése* révén rövid idő alatt tisztázták az áramlástani problémákat, ami a szélenergia hasznosításának kérdésében is gyors fejlődést idézett elő. *Ekkor születtek meg az első szélcsatornák*, amelyek lehetővé tették az áramló levegő különféle profilú testeken végzett munkája hatékonyságának vizsgálatát. E vizsgálatok nyomán alakultak ki a modern légcsavarprofilok, s a szélenergia hasznosításában is szerephez jutottak. Ugyanakkor indultak meg azok a vizsgálatok is, amelyekkel az áramló levegő és a légcsvár közötti kölcsönhatás elméleti összefüggéseit kutatták. Ennek alapján új tudományág született, amelyet aerodinamikának neveztek el [46].

Egyik fontos területén – az ún. örvényelméletben – a magyar származású KÁRMÁN TÓDOR is jelentős eredményeket ért el. Az örvényelmélet kifejlesztői az aerodinamikán belül azt a feladatot tűzték maguk elé, hogy meghatározzák a légcsvavarprofilokról leváló légáramlások örvénylési viszonyainak matematikai leírását. E leszakadó örvények ugyanis jelentősen csökkenthetik a légcsvár felületén áramló levegő hasznos munkáját. Az örvényelméletben elért eredmények hozzájárultak a legkisebb veszteségeket felmutató légcsvavarprofilok kialakításához.

A légcsvavarokkal folytatott vizsgálatok eredményei alapján világossá vált, hogy az ideális szárnyprofil önmagában nem elegendő, fontos, hogy a szárnylapátok (a légcsvavarok) profilsíkja az áramlási sebességhez igazodva változó szöget zárjanak be a széliránnyal. Ezt a szöget nevezik állásszögnek. Az energia optimális hasznosítása azt is megköveteli, hogy az ideális profilú szárnyfelület állásszöge alkalmazkodjon a szélsebességhez, az áramlás sebességéhez. E feladat megoldására dolgozták ki a *vál-*

toztatható állásszögű légcsavarszárnyakat (szárnylapátokat) mind a repülőgépipar, mind a szélenergia hasznosítása számára.

LA COUR, majd BILAU és BETZ munkássága műszaki és gazdasági viszonylatban általános érdeklődést keltett. A meteorológusok figyelme is a szél tulajdonságainak tanulmányozása felé fordult, és elkezdtek az egyes országok szélkataszterét felvételezni. Tudományos vizsgálatok alá vették a régebbi és újabb szélkeréktanulmányokat. Így vetődött fel, hogy ezek közül esetleg a függőleges tengelyű szélkerekek (1.9. ábra) is szóba jöhetnének energiatermelési célokra, mint pl. a *Darrieus* és a *Savonius-rotor*, noha ezek hatásfoka lényegesen rosszabb, mint a csavartlapátos szélkeréké.



1.9 ábra. A Darrieus szélkerék: a) a szabadalom 1931-ből; b) egy 17 m-es az USA-ban (Sandia laboratórium, 1975)

Végül az első világháború után az olcsó vízi energia és a megbízhatóbb fosszilis üzemanyagok versenyképtelenné tették a szélenergiát. Ennek ellenére a világ számos részében tovább folytak a kutatások és sok érdekes szélmalom-prototípusát hozták létre.

Minden próbálkozás ellenére a szélenergia műveik mégsem lehettek versenyképesek, mert nem tudták felvenni a versenyt az Európa viszonylag sűrű energiahálózatáról minden időben készen kapható olcsó energiával és a bármikor könnyen üzembe helyezhető benzin- és dízelmotorokkal. Amíg Európában állandóan fogyott a szélenergia művek száma, az energiaellátásban elmaradott földrészekben és országokban rohamosan nőtt. Pl. a Dél-Afrikai Unió farmjain 1937-ben 77 000 kis vízszivattyúzó szélmotort számoltak össze.

## 1.6. Erőmű méretű egységek

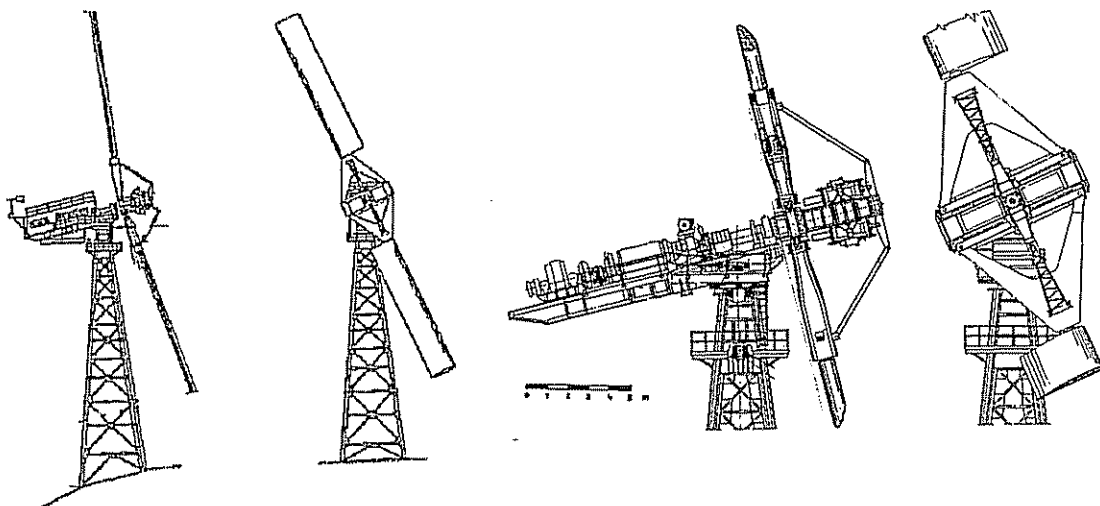
igészen 1931-ig nem építettek 30 kW-nál nagyobb teljesítményű szél-erőművet. Csak 1931 májusában (SZU) helyeztek üzembe 100 kW-os szél-erőművet, amely a normált villamosáramot a szevasztzopoli hőerőmű hálózatába táplálta be. Ez a szél-erőmű 10 éven át, egészen a második világháború kitöréséig működött, és ez szolgálta a legelső bizonyítékát annak, hogy a szél-erőmű járatható más erőművel párhuzamosan és annak az elosztóhálózatába betáplálható. Az itt szerzett tapasztalatok alapján dolgozta ki 1931-ben G. H. SZABANYIN a szél-erőművek szinkronüzemeltetésének elméletét. Rá 10 évre (1940–1943-ban) Weimarban a német szakemberek ugyanezen eredményre jutottak. Hasonló kísérleteket folytattak 1941–1945-ban az USA-ban és 1950–51-ben Dániában (Egersborg mellett) is.

Az egyesült államokbeli Vermontban (330 km-re New York-tól északra) 1941-ben telepítettek 1250 kW teljesítményű szélgenerátort (SMITH–PUTNAM tervezőpáros) (1.10. ábra). A lapátkerék-átmérő 53,23 méter, oszlopmagasság 32,6 méter, tengelyátmérő 610 mm. Az acél szárnylapátok tömege egyenként 8 tonna volt. 1942-ben, egy erős viharban az egyik szárny levált és elrepült. Több mint 230 méterre találták meg az oszloptól. A gépet 1945-ben állították le.

A német kísérletek alapján M. KLOSS (1942) dolgozta ki a szél-erőművek párhuzamos üzemének elméletét és bebizonyította, hogy még szinkrongenerátorokkal is lehet periódustartó hálózatokkal, nagyon stabilis párhuzamos üzemet fenntartani. Sikeres párhuzamos üzemeltetési kísérleteket folytattak más helyeken is, mint: Haslev, Büsum, Uhingen (Németország), St. Cyr (Franciaország), St. Albans (Anglia).

Ezek és a későbbi kísérletek tanulságos eredményekkel és véglegesen lefektették a szél-erő nagyüzemi hasznosításának alapjait.

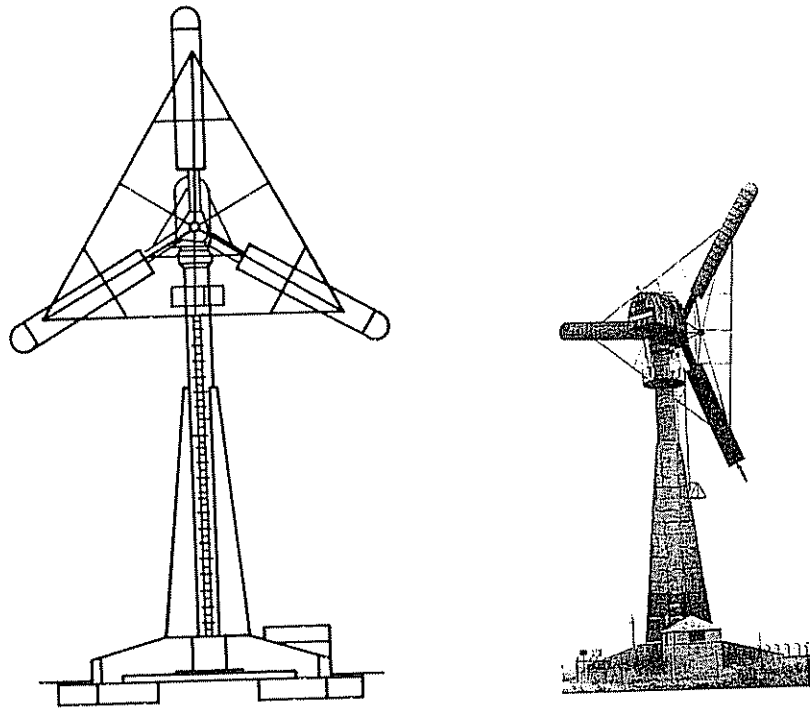
A II. világháború után még az ötvenes években Angliában épült két 100 kilowattos, majd Dániában (1957) egy 200 kilowattos turbina, Franciaországban pedig egy 800 kilowattos berendezés prototípusát létesítették. Ezt követően ugyancsak Franciaországban 1963-ban helyeztek üzembe egy 1000 kilowattos szélturbinát. Ezek a kísérletek kitűnő eredményekkel jártak, annak ellenére, hogy a szél egyenetlensége miatt a szakértők véleménye – a párhuzamos üzem megoldásának lehetőségét illetően – eluta-



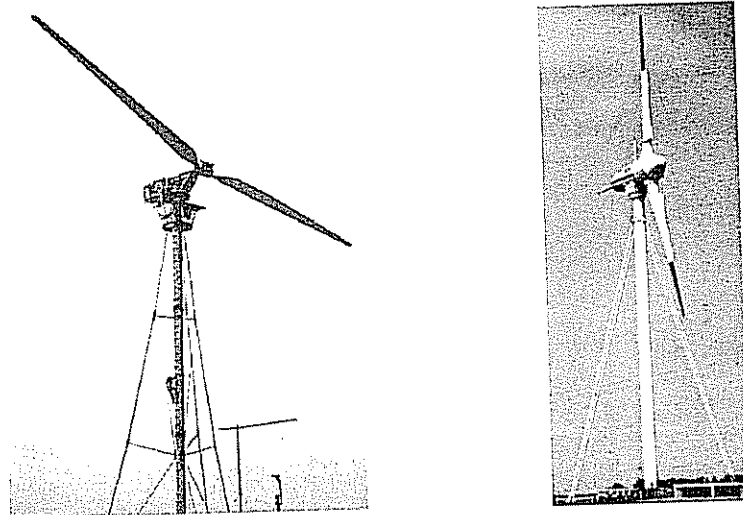
1.10 ábra Smith–Putnam szélgenerátor



sító volt. További fejlesztések során tisztázódott, hogy a szél erőművek nagyüzemi használatához mulhatatlanul szükséges a szél erőmű-egységek villamos elosztóhálózatra csatlakoztatása, s így a szél erőművek szinkron periódusú árama ugyanúgy be táplálható a hálózatba, mint bármely más erőműé (pl. hő- vagy víz erőmű). Ezzel a termelt energiát azonnal hasznosítani lehet, és nem drágítja azt az esetleges energiátárolás, vagy az energiaátalakítás többletköltsége (1.11. és 1.12. ábrák).



1.11. ábra. A dán Gedser szélgenerátor (200 kW teljesítménnyel – 1956) amelyet a mai típusok elődjének tartanak



1.12. ábra. A német szélgenerátorok: a) 1957-ből és b) 1980-ból



## 1.7. Fejlesztések az energiakrízist követően

### A dán minta

Dániában az első áramtermelésre készített berendezést tengerparti zónában, a déli fekvésű Gedser szigetén állították fel 1957-ben. A dán kereskedelmi forgalomban először 1976-ban jelentek meg a szélturbinák. Már eleinte is elsősorban magánszemélyek, illetve szövetkezetek vettek részt a technológia alkalmazásában és elterjesztésében. Kezdetben főként saját felhasználásra termelték a villamos áramot. A módszer meggyökeresedését nagyban elősegítette a turbinák létesítéséhez nyújtott 30%-os állami támogatás, majd a később bevezetett adó-visszatérítés (a szélgenerátor-tulajdonosok visszakapják a villamos energiát terhelő adót). Jelenleg a dán szélenergia-kapacitás mintegy 80%-a van szövetkezeti vagy egyéni tulajdonban. A nagy belső és az igen jelentős amerikai kereslet hatására a berendezéseket előállító iparág világviszonylatban is vezető helyet küzdött ki magának, a világon üzemelő szélturbinák közel fele Dániában készül.

Mindezek következtében napjainkban Dánia a szélenergia alkalmazása terén világviszonylatban is vezető helyen áll. Behozhatatlannak tűnik az előnye az egy lakosra vetített szélenergia-kapacitás területén, ebben a vonatkozásban ötszörösen múlja felül az utána következő Németországot. Ugyanilyen meggyőző a fölénye, ha egységnyi területre vetítve vizsgáljuk a dán szélenergia-kapacitást, ilyen összehasonlításban is több mint háromszor akkora teljesítményt mutat fel, mint a sorban utána következő Németország.

### A német kezdeményezések

Németország rendelkezik jelenleg a világ legnagyobb szélerőmű-kapacitásával, s fejlődési üteme még mindig igen magas. 1999-ben ez az adat 54,5% volt, ami azt jelenti, hogy a telepített 1674 új turbina 1569 MW összteljesítményt biztosít.

1998-ban még 65% fölött volt a tengerparti egységek részaránya. Az arány napjainkra megfordult, amely tendencia arra utal, hogy a szélturbinák legújabb generációja sokkal hatékonyabban használja fel a rendelkezésre álló szelet, már kisebb (2,5 m/s) szélsébségnél is elindulnak, így lehetőség nyílik az ország belső területek betelepítésére is. Cottbustól DNY-ra eső Klettwitz település közelében (Brandenburg tartomány) épült fel Európa jelenleg legnagyobb teljesítményű szélfarmja, amelynek összteljesítménye 62,7 MW. A rendszer kiépítéséhez szükséges 38 turbinát német vállalkozás szállította. Alig több mint tíz évvel ezelőtt ez a terület még a legfontosabb keltnémet barnaszén bányavidékek egyike volt, mára depressziós térséggé vált, így a helykiválasztásnál nem csupán a környezetvédelem, de a munkahelyteremtés, és a régió energiaszektorának erősítése, a barnaszén helyettesítése is elsődleges cél volt.

Németország napjainkban más tekintetben is vezető szerepet játszik. Német cég állította elő és helyezte üzembe a világ legnagyobb, sorozatban gyártott turbináját (2,5 MW-os), és előrehaladott stádiumban vannak az ennél is nagyobb berendezések gyártásának előkészítésével is.

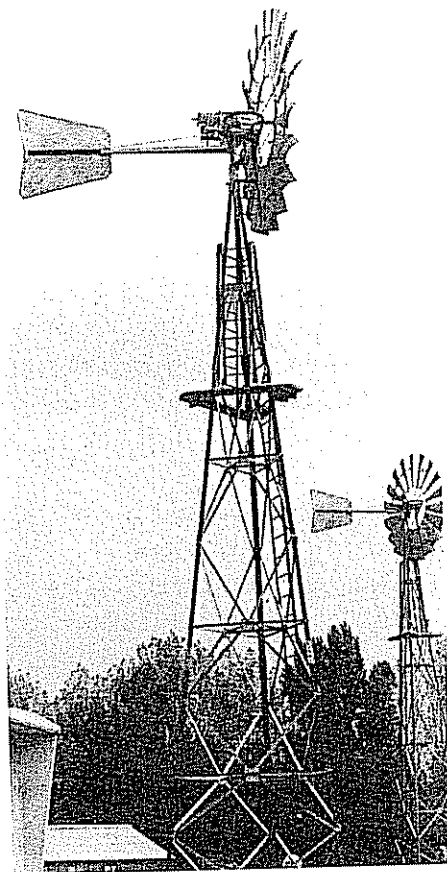
Mindezen folyamatok háttérben a jogi és gazdasági szabályozás új elemei húzódnak meg, például olyanok, amelyek a termelőknek garantáltan magasabb eladási árat biztosítanak abban az esetben, ha a megtermelt energia megújuló forrásból származik.

### **Spanyolország nagyléptékű szél erőprogramja**

A Pireneusi-félsziget nagyobbik országa nem rendelkezik komoly kőolaj- és földgáz-készletekkel, szénkészletének nagyarányú felhasználása pedig egyre inkább környezetvédelmi akadályokba ütközik. Spanyolország energetikai szektora számára ezért nem idegen a megújuló erőforrások alkalmazása. Eddig a vízenergia felhasználása volt jelentékeny, mintegy 25%-kal részesedett a villamosenergia-termelésből, az utóbbi néhány esztendő azonban a szélenergia térhódítását hozta. Tíz évvel ezelőtt az ország teljes szél erő-kapacitása mindössze 5 MW körüli volt. 1993-tól kezdve gyakorlatilag évente duplázódott a teljesítmény, míg nem 1999 végén a beépített szél erő-kapacitás tekintetében (1542 MW) európai viszonylatban már az előkelő harmadik helyre küzdötte fel magát. A technológia alkalmazásában egyik élen járó Navarra tartomány már 22%-ban szélből fedezi villamosáram-szükségletét.

**Magyarországon** a hatvanas években voltak törekvések szélgenerátor telepítésére LEDÁCS KISS ALADÁR révén [53].

A nyolcvanas években a MÉM Kutatási Fejlesztési Tanács pályázat alapján bízta meg a MÉM Műszaki Intézetet TÓTH LÁSZLÓ vezetésével, hogy tervezzen a szélenergia mezőgazdasági hasznosítására víz húzó szélmotorokat és szélgenerátorokat, és végezzen üzemi vizsgálatokat gazdaságosságuk összehasonlító céljából (1.13. ábra).



1.13. ábra. Az FVMMI által fejlesztett víz húzó és villamos sűrűlapátos szélmotorok a fejlesztő kísérleti telepén (1981, TÓTH-HONTI)

A vízhúzó szélmotorral a Kiskunhalasi Állami Gazdaság legelőin is végeztek vizs-  
látokat, ahol az SZGV 3,6 típusú szélmotor 300 húsmarhát látott el ivóvízzel [91].  
vizsgált térségben a szélesség átlagos értéke 3,4 m/s volt. A naponta átlagosan  
iszivattyúzott vízmennyiség 14 m<sup>3</sup>, amely néhány nap kivételével fedezte a 300  
úsmarha vízigényét. (Lásd 2.11. és 2.13. ábrákat)

A kalkulációk azt mutatták, hogy a majori vízellátással szemben a szélmotorok  
em gazdaságosak, de a lajtkocsis és itatókocsis vízzállítással szemben feltétle-  
ül előnyösebbek. Gazdaságosabbak a villany- és benzinmotoros vízzállításnál  
. Az előbbivel szemben csak akkor lehetnek előnyösek, ha a villamos hálózat  
építési költségével is terheljük a beruházást. Ha a legelő területeken villamos  
álózat is van, akkor a költségek hasonlóan alakulnak, mint a majori vízellátásnál.  
findebből következik, hogy a vízhúzó szélmotorok alkalmazása egyértelműen  
zdaságos a majoroktól 1–3 km-nél nagyobb távolságokban lévő legelő területe-  
en, ha a legelőkre a vizet „tengelyen” kell kiszállítani vagy villamos hálózat  
építése lenne szükséges.

## 1.8. Fejlesztések az 1980-as évektől

z 1980-as évektől a szélenergia az egyik legígéretesebb megújuló energiaforrásnak  
zámít.

Az igen dinamikus növekvő keresletnek megfelelően ma már a világon szá-  
os cég foglalkozik villamos szélgenerátorok gyártásával. A termékcsalád igen  
zéles: a 100–200 W-os kisgépektől a 2–3 MW tartományig terjed változatos ki-  
itelben.

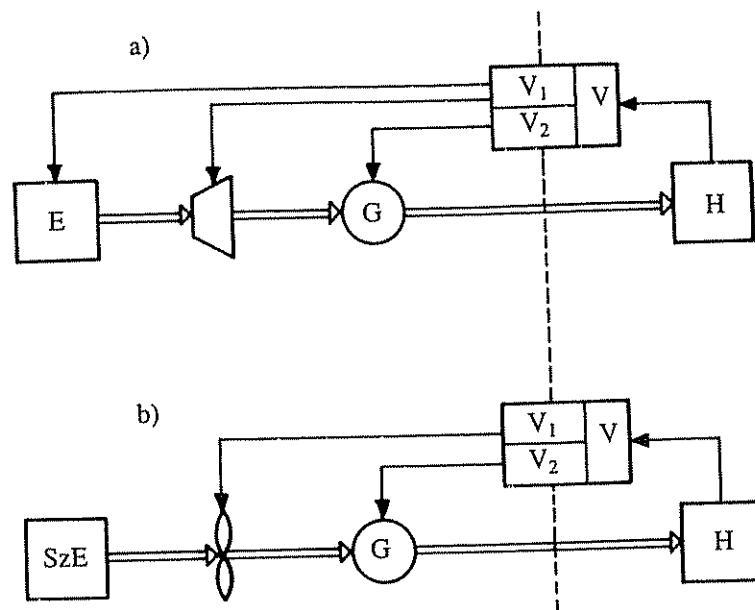
A szélből nyert hajtóenergia ugyanúgy felhasználható generátorok hajtására,  
int más erőforrás, természetesen sajátos szabályozással. Nem minden rotortípus  
lkalmas azonban generátorüzemre: egyedi áramforrásként létesített szélgenerá-  
rok rotorja elvileg bármely ismert konstrukciójú lehet, míg hálózati üzemben, a  
agy teljesítménycategóriákban ( $P_n > 50$ –100 kW) csak a szárnytípusú rotorok jö-  
etnek számításba.

A korszerű villamos szélerőművek rendszertechnikailag alapvetően hasonlítanak  
ás energiaforrással működő erőművekhez. Sematikusan a fő egységeket az 1.14. áb-  
a szemlélteti.

A telepítés kezdetben egyedi, később négy-öt majd manapság nagyobb csoport-  
okban történik. A szélerőmű parkok látványa megszokottá vált a nyugat-európai  
rszágokban. A figyelem növekedése annak köszönhető, hogy a fejlett ipari orszá-  
ok rákényszerülnek a környezet szigorú védelmére. Európában kontinentális vi-  
zonyok között a legtöbb berendezést Németországban és Spanyolországban tele-  
ítik, a tengerparti telepítésekben pedig Hollandia és Dánia vezet.

Az 1990-es évek elejétől jelentős fejlődésnek indult a szélerőműveket gyártó ipar,  
s annak háttérpára is (1.15. ábra).

Az Európai Szélenergia Egyesület 1991-ben meghatározta, hogy a fenti célok  
lérése milyen időbeli ütemezéssel lehetséges.



1.14. ábra. Villamos erőművek elvi felépítése: szélerőművek (b) és más energiaforrással működő erőművek (a) elvi sémája (G generátor, H villamos hálózat, V vezérlés ( $V_1$  bemenő energiarendszer,  $V_2$  hálózatra illesztés), E dízel, gáz, stb., SzE szélenergia)



1.15. ábra. A mai konstrukciós elveket alkalmazó 30 kW teljesítményű szélgenerátor (BONUS, 1980)

Olyan mértékű sikertörténetről van szó a szélenergia esetében, hogy az Európai Szélenergia Egyesület 1997-ben újragondolta a létesítés trendjét. 2000-re az 1991. évi becslés kétszeresét valószínűsítik és már 2020-ra elkívánják érni a korábbi becslésben csak 2030-ra becsült értéket [28.].

1.1. táblázat. Európai Szélenergia Egyesület 1991. évi becslése

Év	Telepített kapacitás, MW
1994	1 400
2000	4 000
2005	11 500
2030	100 000

1.2. táblázat. Európai Szélenergia Egyesület 1997. évi becslése

Év	Telepített kapacitás, MW
2000	8 000
2010	40 000
2020	10 000

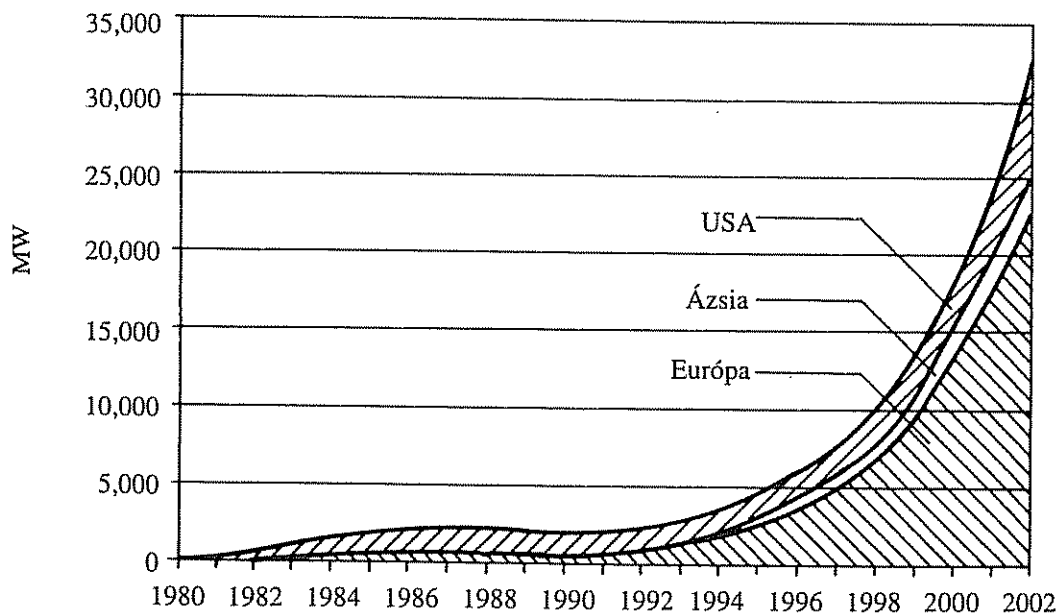
Az Európai Szélenergia Egyesület másik igen fontos célkitűzése, hogy a kutatás-fejlesztés segítségével olyan versenyképes árat kell teremteni, ami a fejlődő világban is lehetővé teszi a fenntartható energiarendszerek kialakulását.

Az 1994. évi, átlagos európai szélturbina segítségével megtermelt kWh-kénti költséget 2000-re 30%-kal, 2005-re 40%-kal, majd 2030-ra 50%-kal kell csökkenteni a versenyképesség és a megfelelő arányú elterjedés ösztönzése érdekében.

Az utóbbival kapcsolatban speciális fejlesztések indultak pl. a lapátok kivitelére és anyagára vonatkozóan, új generátorok, konstrukciók születtek, a mikroelektronika alkalmazása pedig segítette a hatékonyabb és megbízhatóbb vezérlési megoldások létrehozását. A berendezések mérete egyre inkább növekedett, ami által a fajlagos költségek jelentősen csökkenthetők voltak [64.]. Ezeket számos elemzés is bizonyítja, vagyis a nagyobb teljesítményű berendezéseknél az egységnyi mennyiségű termelt energiára vetített beruházás, továbbá energia-előállítási költség számottevően csökkent, 10 év távlatában 60–70%-ot.

Látható, hogy a tervezési értékeket az élet cáfolta. Ezt bizonyítja a 1.16. ábra tényleges fejlődési trendje is, miszerint 2002-re a becsült 8000 MW helyett közel 23 000 MW-ra növekedett az európai beépített kapacitás [27., 28.].

A sikerek alapján az Európai Szélenergia Egyesület a következő javaslatot készítette, amit az Európai Unió Bizottsága el is fogadott. A kiaknázható szélenergiahasznosítási potenciál 20%-át kellene elérni 2030-ra, ami megegyezik az Európai Unió igényének 10%-ával. Ennek eléréséhez 2030-ra 100 000 MW kapacitást kell telepíteni.

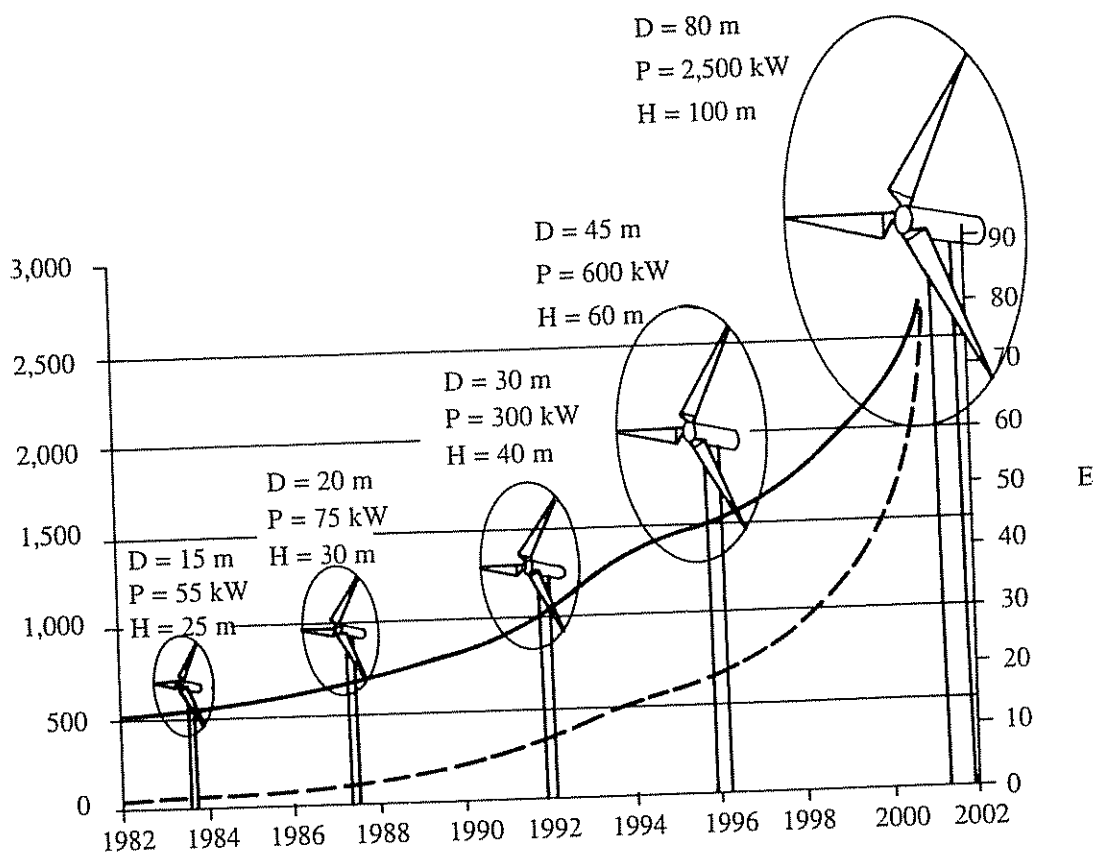


1.16. ábra. A beépített villamosteljesítmény fejlődési trendje

A telepítés által elfoglalt terület kevesebb, mint 0,3%-a az Európai Uniónak, ami igen soknak tűnik. De mindjárt nem olyan rémisztő, ha figyelembe vesszük, hogy a szélfarmok által elfoglalt terület 99%-a mezőgazdasági célokra felhasználható, vagyis természetes állapotában megmaradhat.

Az 1980-as években, Kaliforniában a tengerpartokra telepített 50–100 kW teljesítményű berendezések ma már korszerűtlennek tekinthetők. Egy-egy kaliforniai szélparkban gyakran két-háromszáz, esetleg 500–1000 gépegységet is felállítottak, ma ez 20–50 egységgel megoldható. A tengerpartoktól a berendezéseket egyre inkább a szárazföldek belsejébe telepítették, azokra a helyekre, ahol az energiafelhasználás is folyik. Ezzel az energia szállítási veszteségei mellett csökkenthetők a szállítási és felállítási költségek is.

Szárazföldi körülmények között ún. másodosztályú szelek a jellemzőek. A szelek jelentősebb turbulenciával rendelkeznek és azonos szélenergia-potenciálok a tengerparthoz viszonyítva csak nagyobb magasságokban érhetőek el. Éppen ezért pl. sok fejlesztés irányult az oszlopok magasságának növelésére. Míg a tengerpartokon a kezdeti időszakokban 30–40 méter magas oszlopokat készítettek, ma a szárazföldek belsejében 100 m-es oszlopmagasságokkal számolnak. Nem ritka egyes területeken a 120–140 m magas oszlopok kivitelezésének a számításba vétele is (1.17. ábra). A szárazföldi területeken az erőművek közelebb telepíthetők az ipari létesítményekhez, villamoselosztó berendezésekhez, s ennek következtében számos hálózattal kapcsolatos terhelési probléma is megoldódik [64.].



1.17. ábra. Méretnövekedés alakulása 1982-től 2002-ig a magasság (H), a lapátátmérő (D) és a teljesítmény (P) vonatkozásában (Forrás: GASÁK R., 2002)





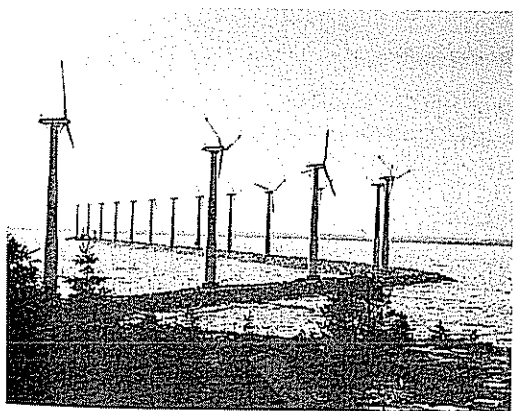
1 18. ábra. Szigetüzemű generátor  
(szárazföld belsejében, 600 kW, Németország)



1 19. ábra. Szélpark kontinentális területen  
(Hollandia)



1 20. ábra. Offshore telepítés  
(dán tengerpart)



1 21. ábra. Offshore rendszer  
a tengerbenyúló gátra telepítve (Kalifornia)

A környezeti és gazdaságossági szempontokból kutatást két irányban is végeznek. Az egyik az ún. OFFSHORE rendszerű berendezéseknél, amelyek a tengerpartokra, a sekély tengerparti vizekbe telepítendők, s folyik a létesítés eszközeinek fejlesztése, valamint a kapcsolódó létesítmények kialakítása (Írország nagy volumenű projektekkel rendelkezik). Másik irányzat a szárazföldi körülmények között magas oszlopokon nagy teljesítményű, de kisebb szélességeket is jól hasznosító egységek létrehozása. Mindkét fejlesztési irány jelentős perspektívával rendelkezik.

Különböző nemzetközi szervezetek által végzett felmérés és becslés azt bizonyítja, hogy hozzávetőlegesen 50 év múlva, 2050 tájára a világ összes villamosenergia-felhasználásának 50%-át a megújuló energiaforrások adják. Ebből a jelenlegi trend szerint tetemes volumenben szélenergia részesedik. Tehát a szélenergia ipar perspektívái igen kecsegtetőek, ami vonatkozik az európai országokra, de a fejlődő országokra is. A becslés egyrészt abból táplálkozik, hogy a hagyományos energiaforrások kimerülőben vannak, másrészt környezetvédelmi megfontolások a földi légkör megóvása érdekében a hagyományos energia átalakítók visszaszorítását irányozzák elő (1.18.–1.25. ábrák).

A technikai fejlesztések, a processzoros vezérlések révén a mai nagy teljesítményű szélgenerátorok a kevésbé alkalmas szeleket is jobban tudják hasznosítani. A kontinentális viszonyok között a szélviszonyok annyiban térnek el a tengerparti szelektől,

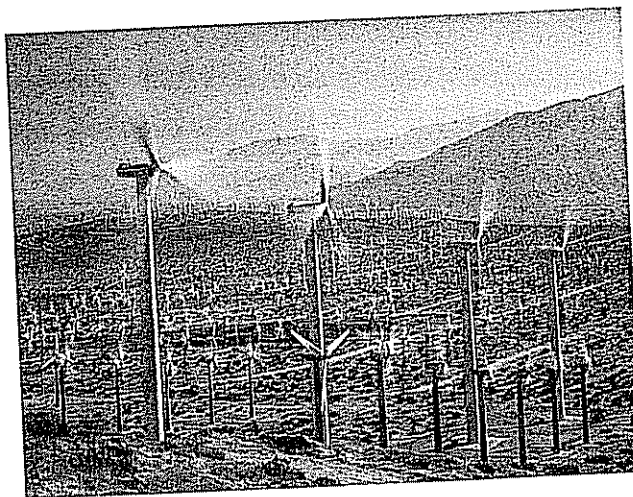
hogy az irányukat gyakrabban változtatják és nagyobb dinamizmust is mutatnak, tehát a kis szélsőségek és a viharos széllokések váltakoznak.

A fejlődés gazdasági hátterét az teremtmegte meg, hogy nőtt a szél erőművek hatásfoka és a gyártott berendezések darabszáma és ezzel jelentősen csökkent az előállított villamos energia ára. A fejlesztésben, gyártásban Dánia és Németország áll az élen.

Az első Magyarországon létesített (2000. december 15.) szélgenerátor 250 kW teljesítményű. A működési helye Inota, a létesítési munkáit a TRANSELEKTRO Rt. végezte, a villamos bemérését a SZIE Gépészmérnöki Karán működő MSZTE (Magyar Szélenergia Tudományos Egyesület), üzemeltetője a Bakony Erőmű Rt.

A Magyarországon létesített első „nagy teljesítményű” szélgenerátor (600 kW) tervezési és kivitelezési munkáihoz 2000-ben a SZIE Gépészmérnöki Kar kollektívája készített átfogó tanulmányt. A tervezett berendezés 2001. június 5-én Kulcs térségében sikeresen felállításra került, üzemeltető az Első Magyar Szélenergia Társaság Kft., ill. E-ON Rt.

E könyv kéziratának rendezése időszakában (2002. december 14.) került felállításra Mosonszolnok térségében 2 db 600 kW teljesítményű berendezés az ÉDÁSZ, ill. E-ON Rt. közreműködésével. (Ezekről a későbbiekben szólunk.)



1 22. ábra. Kaliforniai szélpark (50–100 kW-os egységekből. Kaliforniában három körzetben több mint 15 000 szélgenerátort állítottak üzembe az 1980-as években )



1 23. ábra. 2,5 MW-os létesítményező gazdasági területen



1 24. ábra. 2,5 MW-os berendezés ipari övezetben



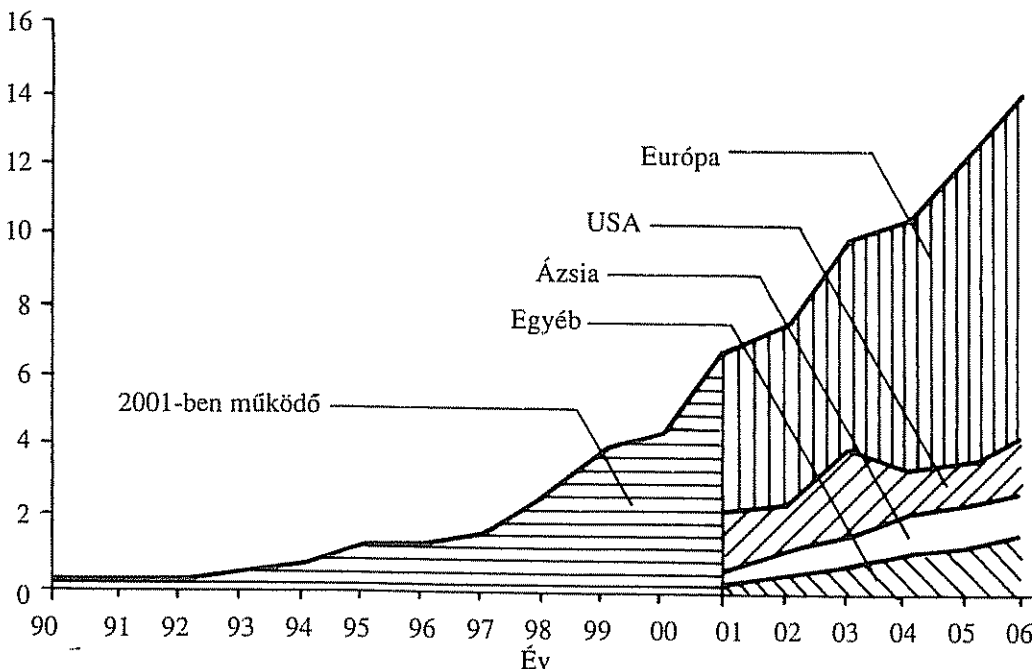
1 25. ábra. Kiterjedt szél-erőmű-park (Németország)

## 1.9. A jövő kilátásai

zelparkok energiaátadási rendszerében, a szolgáltatás biztonságosabb tervezhető-ében a számítástechnika révén további fejlődés várható. Megfelelő programokkal előrejelzésekkel egyenletesebbé tehető a beépített teljesítmények kihasználása, amikor kímélik a hálózatokat, a rákapcsolások és a lekapcsolások szabályos üte-zésével. Jelenleg a nagy volumenű szélenergia-felhasználás korlátja az alapvető itosságából, az egyenetlenségéből és a kiszámíthatatlanságából fakad. E hát- yok a jövőben minimálissá válhatnak azáltal, ha megoldódik az energia egysze- b tárolása és pl. az ez ideig kizárólagosan elképzelt nagy tárolóegységek decent- zálása. Ilyen lehet az energiacellák felhasználása (pl. járművekben, háztartási be- dezésekben stb.), amelyek a véletlenszerű szélenergiából nyert villamos energiát olni képesek.

E rendszerek esetében a széles időszakban termelt energiafelesleggel vízbontást eznek, s az így nyert hidrogént és oxigént tartályokban tárolják. Szélcsendes szakokban az elektrolízis folyamatát megfordítva, a tüzelőanyag-cellát üzembe yezve az energiafeleslegből nyert gázok elégetésével kívánnak elektromos ener- t előállítani.

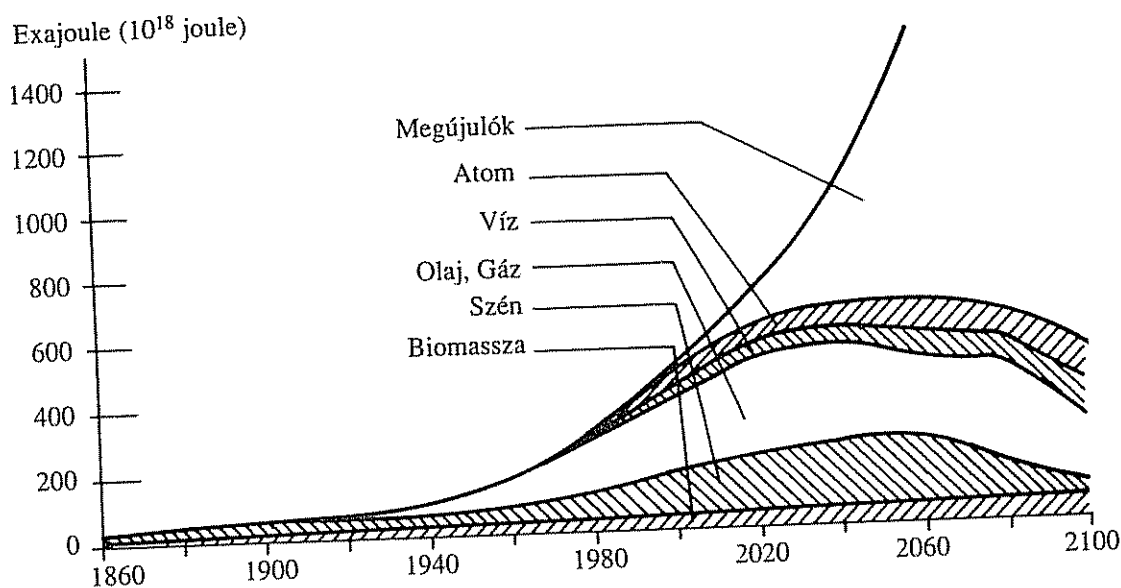
A többi megoldás valójában hagyományosnak tekinthető. Nagyobb teljesítményű ségek esetében az energiafelesleget sűrített levegő előállítására fordíthatják. A ályokban tárolt sűrített levegővel szélcsendes időszakokban meghajthatók a szél- erátorok. A másik megoldásban vizet emelnek tárolótartályokba, szélcsendben így tárolt víz helyzeti energiát kívánják elektromos energia előállítására felhasz- ni. Végül az elektromos energia tárolásának egyik ugyancsak hagyományos dja is alkalmazható: az elektromos energia akkumulátortelepekben való felhal-



1.26 ábra. A világban várható létesítési trend 2006-ig és a következő években

mozása. Ez a megoldás csak kisebb teljesítményű rendszerek esetében látszik célravezetőnek. Az akkumulátortelemek fenntartási és pótlási költségei ugyanis akkorák, hogy nagyobb egységek esetében az energiatárolásnak ez a módja már nem lehetne gazdaságos [28.].

1983-ban az ENSZ főtitkárának felkérésére GRO HARLEM BRUNDTLAND megalakította a Környezet és Fejlesztés Világbizottságot, mely „Közös jövőnk” című jelentésében (1987) külön fejezetet szentel az energetikával összefüggő válsághelyzetre. A dokumentum felhívja a figyelmet a nemzetközi összefogás szükségességére is, melynek eredményeképpen jött létre 1992-ben az ENSZ Környezet és Fejlesztés Konferenciája (Rio-i Konferencia). Az itt aláírásra megnyitott Éghajlatváltozása Keretegyezményhez eddig csaknem 170 ország csatlakozott. A keretegyezmény eredményének tekintendő Kiotói Jegyzőkönyv aláírásával eddig a világ 38 iparosodott országa vállalta az egyezményben érintett gázkibocsátások átlagosan 5,2%-os csökkentését a 2008–2012 közötti időszakra. A teljesítésben Európai Unió tagország, Németország vezeti a mezőnyt. Ezen erőfeszítések figyelembevételével készítették el a világ várható energiaforrásainak becslését (1.26., 1.27. ábra). A diagramsor rávilágít a megújuló energiákkal való foglalkozás fontosságára és azok meghatározó szerepére (2050 tájára eléri az 50%-ot).



1.27 ábra. Energiafelhasználás fejlődése



## 2. A SZÉLERŐMŰVEK RENDSZEREZÉSE, SZERKEZETI FELÉPÍTÉSE

### 2.1. A szélerőművek jellemzése

#### 2.1.1. Energiatermelés szerint

A szél mozgási energiájából kinyert energiát sokféle energiátípussá lehet átalakítani. Ennek lehetőségeit a 2.1. ábra szemlélteti.

Alapvetően a szél kinetikai energiája mozgási vagy villamos energiára alakítható a konvertáló berendezésekben (szélerőgépekben). A század elején és azt megelőzően a nyert mechanikai energiát közvetlenül malmok és egyéb gépek, berendezések meghajtására használták. Napjainkban elsősorban a szivattyúk hajtása jöhet számításba, amelyekkel víztárolókat töltenek fel, vagy légtartályokat feltöltő légsűrítő berendezéseket hajtanak. Az így tárolt energiát a későbbiekben fel lehet használni pl. ízturbinák vagy különféle légmotorok hajtására.

A szélerőművek másik változatánál kinetikai, majd mechanikai energiát a szélerőműben villamos energiává alakítjuk át. Az előállított villamos energia tárolásának különféle lehetőségei vannak: a leggyakoribb az akkumulátoros tárolás. Ismert az elektrokémiai lehetőség, vagyis hidrogén előállítása hidrolízissel, majd a hidrogén tárolása, felhasználása belsőégésű motorok hajtására vagy fűtésre. Fejlesztés alatti megoldás, amikor ismételen elektromos energiát állítunk elő belőle üzemanyagcellák felhasználásával.

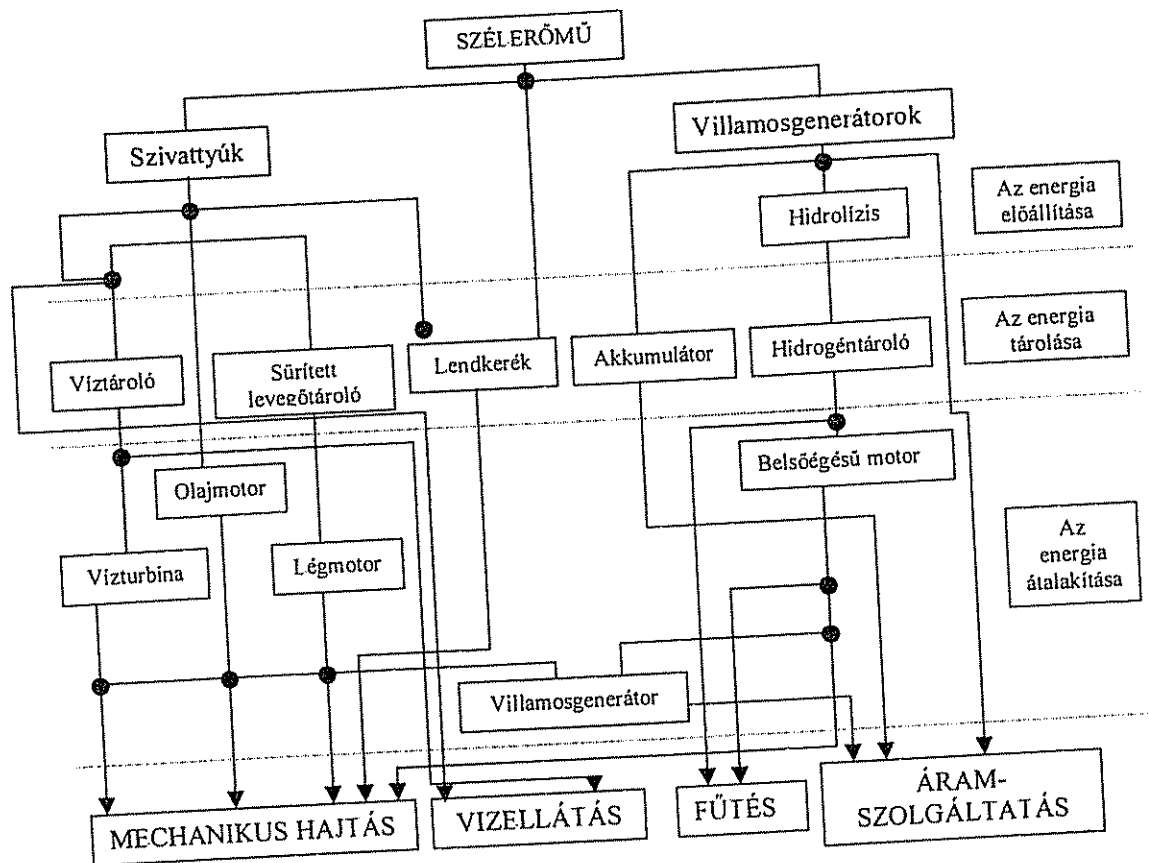
A megnevezésekkel kapcsolatosan igen eltérőek a szokások. Mint, ahogy a nemzetközi irodalomban és azonos nyelveknél, de különösen az egyes nyelvterületeken egy-egy szerkezeti elemre különféle elnevezések használatosak, úgy a hazai szóhasználat is sokféle, mind a köznyelvben, mind a szakirodalomban. Lényeg az, hogy az eltérő kifejezések mögé a szakmában ugyanazt a tartalmat helyezzük.

Legyen példa a komplett műszaki tárgy, ill. berendezés megnevezése:

- szélmotor (mechanikus energia),
- szélerőgép (mechanikus, ritkábban villamos energia),
- szélturbina (villamos energia),
- szélgenerátor (villamos energia),
- szélerőmű (villamos energia).

Mindegyik elfogadható, hiszen a lényegét, a funkciót fejezik ki, mégpedig a szélenergia átalakítását más energiaformákká. Mindenképpen hibás például a szélgép, mivel ellentétes irányú energia konverzióra utal, vagyis légmozgást, szelet hoz létre, mint a ventilátor.

Értelem szerint a fentebbi elnevezések egy-egy jelzővel kiegészítve az adott szerkezet lényege pontosabban megközelíthető, pl. szélmalom, szivattyús szélmotor, ill. szélerőgép, áramfejlesztő szélmotor, villamos szélerőgép stb., de megfelelő szövegkörnyezetben (pl. stiláris okok miatt) a generátor kifejezés a szélgenerátorra (villamos áram előállító) egyértelműen utal.



2.1. ábra. Energiatermelés szerinti felosztás

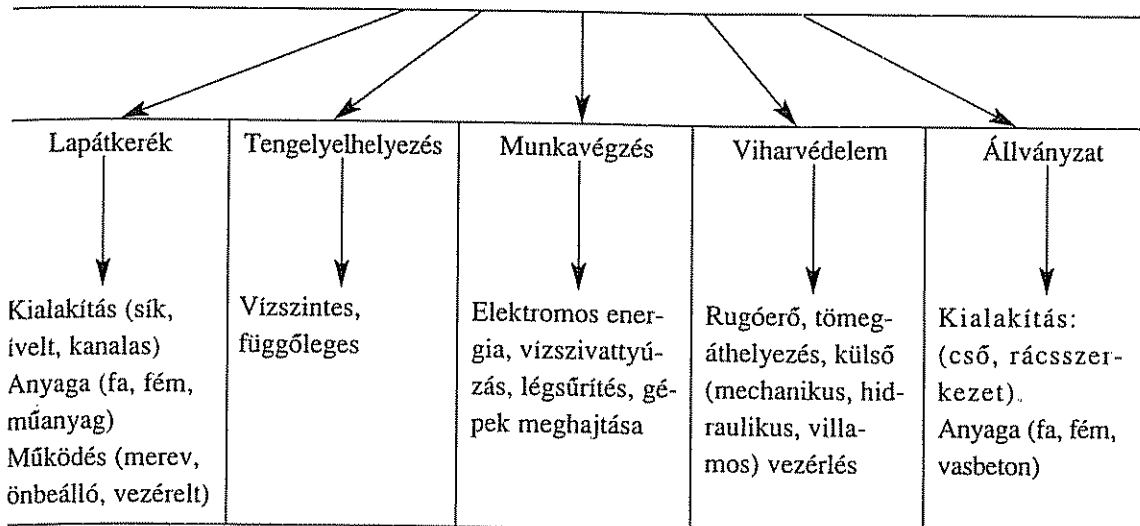
Hasonló a helyzet akkor is, amikor a szerkezeti egységek megnevezéseit vizsgáljuk: Minden szélörög fő szerkezeti eleme a forgó mozgást végző lapátkerék, ill. rotor (de nem szerencsés a propeller), és annak fő egységei, lapát, szárnylapát, rotorszárnny, rotorlapát, és a csatlakozó egységei: agy, lapátkerék agy, rotoragy, lapátengely, rotortengely stb.) Funkcionális (energiatermelés szerinti) felosztásukat is a 2.1. ábrán láthatjuk.

### 2.1.2. Szerkezeti osztályozás

Szélenergiát átalakító berendezések szerkezeti osztályozására utal példát a 2.2. ábra. Megkülönböztetést jelenthet a lapátkerék kialakítása [93.]. Alapvetően két típus különböztethető meg. Az egyik a lassú járású kiviteleknel alkalmazott egyszerű profilok, a másik a gyorsjárású berendezéseknél alkalmazott nagy szakértelemmel tervezett áramvonalas profilok (pl. kompozit műanyagokból).

A tengelyrendezés szerint vízszintes és függőleges kivitelek különböztethetők meg (erről a későbbiekben részletesen szólnunk). Az energia konverzió szempontjából a 2.1. ábrán is kitűnik két alapvető változat: villamos, vagy mechanikus energia előállítása. Jelentősen, főleg a méreteik szerint eltérő a berendezések a viharvédelem és a szabályozása. A szélirányba állításra, ill. a viharvédelemre a kisebb berendezéseknél különféle mechanikus egységek alkalmazhatók, míg a nagy erőműveknél komplikált rendszerek, PCU vezérlésű elektromos, elektromechanikus, elektrohíd-

## SZÉLMOTOROK ÉS GENERÁTOROK



2.2. ábra. A szélmotorok és generátorok rendszerei

raulikus rendszerek szükségesek. Az állványzat kialakítása igen sokféle lehet. Leggyakrabban alkalmazott – különösen a nagyobb berendezéseknél – a csőállvány, kisebb berendezéseknél a rácsos szerkezet. A kifejezetten nagy berendezéseknél – főként szállítási okok miatt – napjainkban ismét előtérbe kerültek a különféle rácsos szerkezetek, sőt monolit vasbeton tornyokkal is kísérleteznek.

Technikai kivitelüket tekintve napjainkig igen sokféle szélmotort alakítottak ki (2.3, 2.4., és 2.5. ábrák).

- A lapátkerekek tengelyelhelyezés szerinti felépítése is többféle lehet, a legismertebbek:
- függőleges, a szélirányra merőleges,
  - vízszintes, a széliránnyal párhuzamos,
  - vízszintes, a szélirányra merőleges tengelyű kivitelek,

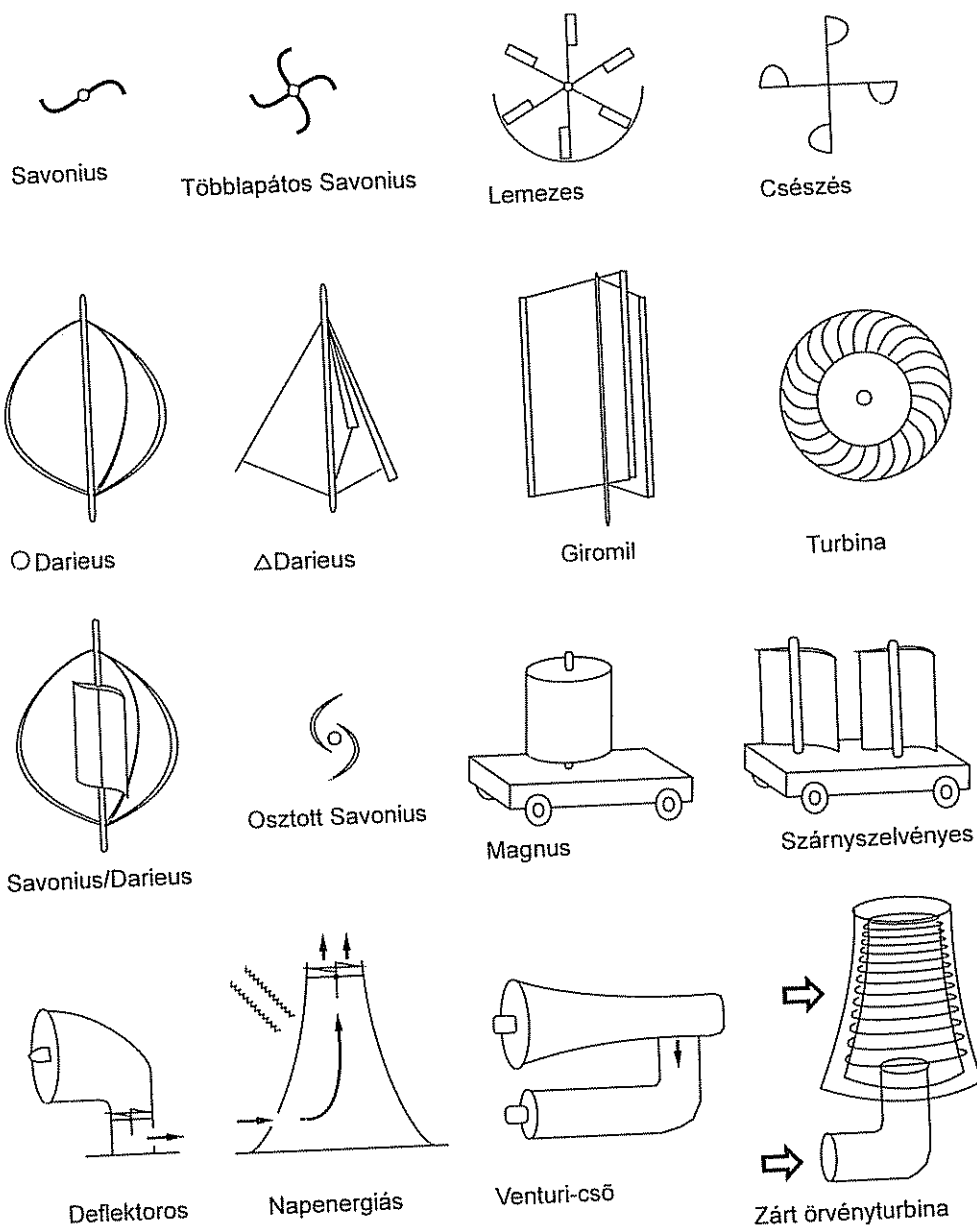
A **függőleges** tengelyelrendezésű változatoknak (2.3. ábra) alapvető előnye, hogy bármilyen irányból kaphatják a szelet, vagyis a szélirány változása a munkájukat, a kinyert energiát nem befolyásolja. Ugyanakkor egyszerű hajtásátvitelt tesznek lehetővé, hiszen a talajon helyezkedik el a tengelyvég, ahová a különféle berendezések közvetlen csatlakoztathatók, pl. szivattyú, sebességváltó stb. Hátrányuk viszont, hogy a lapátok által súrolt felület a földhöz közel helyezkedik el, s magasabban a nagyobb sebességű szeleket nem tudják hasznosítani [29.].

A függőleges tengelyű változatok legjellemzőbb kivitelei a Savonius típusok, amelyek leginkább hasonlítanak a már bemutatott perzsa szélmalomokhoz. Ezekre hasonlítanak a lemezes és csészés kivitelek is, de a Giromill berendezés is. Technikailag leginkább kimunkáltak a Darieus típusok, amelyeket erőművi változatban is kiviteltek. A lapátjaik speciális kialakításúak, ún. szalaglapátok: A legjellemzőbb parabola-hoz hasonlít, de egyszerűbb változatok is készülnek (2.4. ábra).

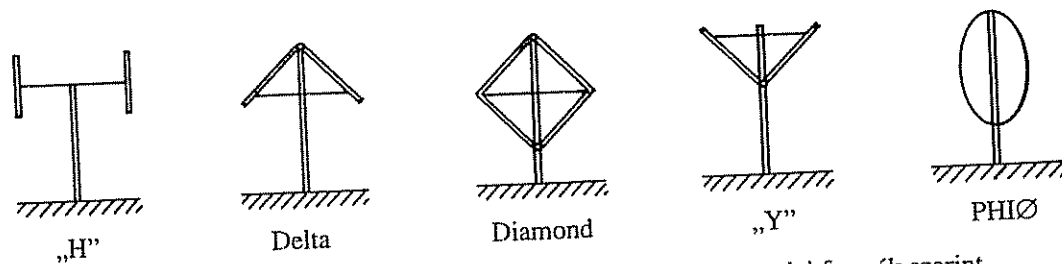
A Giromil-nél a lapátok kialakítása gyártástechnológiai szempontból egyszerűbb. Kisebbsikerrel a turbina típusú változatok is kipróbálásra kerültek, nagy felületek létesítése költséges, inkább azokon a helyeken jók, ahol eleve a széláramlat „besűrítésre” kerül. A kombinált változat a Savonius és a Darieus kerék egyesítése. Ennek alapvető célja, hogy a kisebb és nagyobb szélesebbségeket is felhasználhatók legyenek. Gondot jelent



e berendezésnél a viharvédelem. Osztott Savonius berendezéseket inkább kisebb kivitelekben használják, főként vízszivattyúk hajtására. A világon sokféle szélenergia konver-



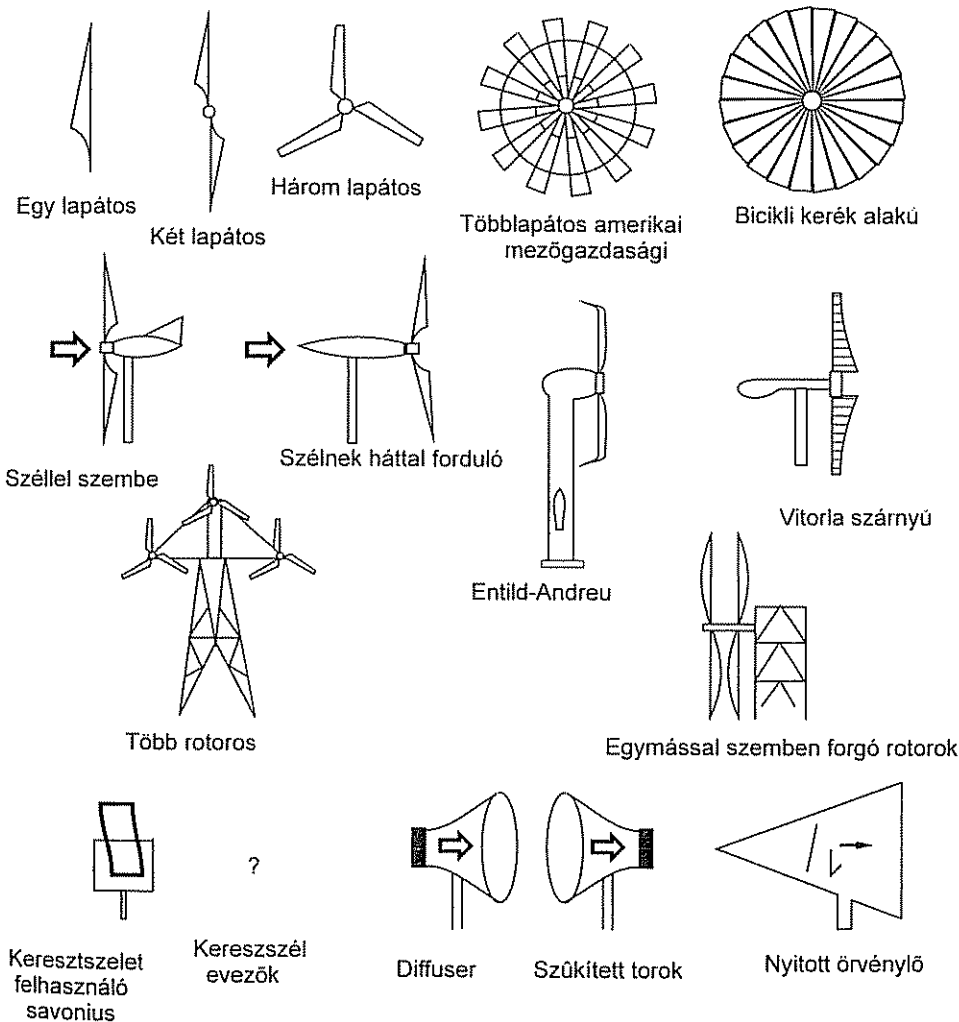
2.3. ábra. Néhány jellemzőbb függőleges tengelyű megoldás



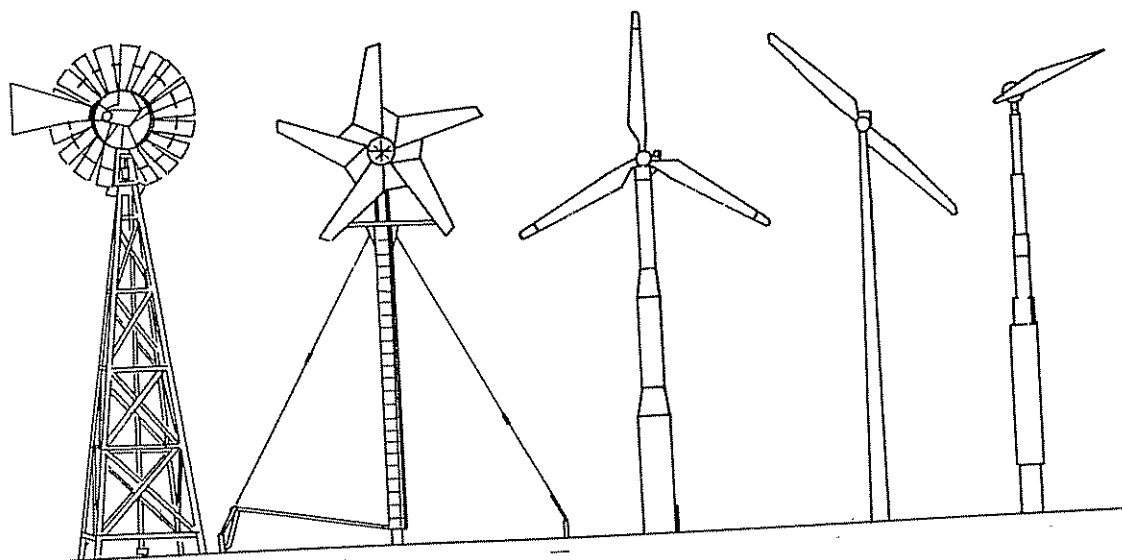
2.4. ábra. A függőleges tengelyű konstrukciók a geometriai formák szerint

ios változattal történtek kísérletek, ilyenek a mozgó berendezésekre elhelyezett álló, vagy forgó felületek, gyakorlatilag az előbb felsorolt valamelyik megoldást képviselik.

Az utóbbi évtizedekben foglalkoztak olyan rendszerekkel, amelyek a ritka szélenergia besűrítése révén fejtik ki energia átalakító tevékenységüket. Ilyen pl. a konfúzoros átalakító, amely nagyobb keresztmetszettől fokozatosan szűkülve gyorsítja fel a szél sebességét és a legnagyobb sebességű helyen helyezik el a turbinát. Újszerű megoldás napenergiás változat, amelynek kifejezett nagy erőművi kivitelezésével napjainkban is foglalkoznak. Ezt gyakorlatilag igen nagy felületen elhelyezkedő napkollektor, mely a nap sugárzásából fakadó hőt hasznosítja úgy, hogy a nagy transzparens felület alatt felmelegedő levegő – a felmelegedés hatására csökkenő sűrűsége révén – a toronyban végződő napkollektorban erős, felfelé irányuló áramlásba kezd. Ez az áramlatot fokozatosan szűkítik, s ennek következtében a levegő igen nagy sebességet ér el. A legnagyobb szélesebességű ponton helyezik el a turbinát, amely villamos generátorokat hajt. Kisebb átmérőjű turbinával működik a Venturi-cső kialakítású szélerőgép, pl. a zárt örvényturbina, amelyek ugyancsak az energiakonvertálás egyszerűsítésére és biztonságosabbá tételére törekcszenek. A fentiekén túlmenően számos bejelentett találmány ismeretes, ismertetésüktől itt eltekintünk [37.].



2.5 ábra Vízszintes, a széliránnyal párhuzamos tengelyű kivitelek



2.6. ábra. Konstrukciók a soklapátostól az egylapátosig

A jelenlegi korszerű berendezések vízszintes tengelyűek, s a tengelyezésük megegyezik a szél irányával [37.]. Csoportosításuk a vízszintes tengelyen lévő lapátok száma szerint is történhet (2.5., és 2.6. ábrák). A későbbiekben látni fogjuk, hogy a lapátosítás az energianyerést és a hatásfokot is meghatározza.

Legegyszerűbb változatot képez az egylapátos kivitel, mely egyszerű szerkezeti kialakítást takar, viszont nagyobb berendezéseknél akadályt jelent a lapát kiegyensúlyozása (különösen nagyobb teljesítményeknél).

Sokkal gyakoribbak és nagy berendezéseknél, erőműveknél is használatosak a kétlapátos változatok. A nagyobb fordulatszámuk révén kisebb áttételeket kell alkalmazni a generátorok előtt, ez a hatásfokban feltétlen előnyként jelentkezik. Ugyanakkor nagyobb lapáthosszúságok esetén problémát jelent a rendszer dinamikus kiegyensúlyozása. Legjellemzőbb a háromlapátos változat, a világ szélgenerátor állományának nagyobb hányadát jelenti.

A többlapátos változatok általában mechanikai energia előállítására szolgálnak [3.]. A tíznél több, soklapátos változatokat amerikai rendszerű berendezéseknek nevezik. Ezek a mezőgazdaságban használatosak, elsősorban vízszivattyúzásra. Napjainkban az egész világon elterjedtek és ma is nagy darabszámban gyártják. Becslések szerint milliós nagyságrendben működnek világszerte. A biciklikerek alakú változatok inkább csak a kísérleti stádiumig jutottak el. Nagy előnyük lenne az egyszerű hajtásátvitel, ugyanakkor nagy hátrányuk az igen nagy vitorlafelület, amely nehezen védhető meg nagyobb viharos szelektől anélkül, hogy jelentős mértékben megrongálódjanak.

A vízszintes tengelyű változatoknál – különösen a generátoros kivitelekénél – a lapátkerék a tartóoszlop előtt vagy mögött is elhelyezkedhet. Ha a generátor mögött helyezkedik el a lapátrendszer, akkor háttal fordított kivitelről beszélünk. A lapátátmérők és a lapátok hosszának csökkentése miatt alkalmazzák a több rotoros változatokat. Előnyt jelentenek a lapátok gyártási költségének csökkentése szempontjából, hiszen egyébként a nagy tömegű, 5–6 tonnás kompozit műanyag lapátok gyártása meglehetősen költséges és komplikált. A több rotoros változatoknál előny a kisebb lapátátmérő, viszont a szerkezeti kialakítás és a viharvédelem (szélirányba fordítás) komplikálja a konstrukciót. Kevésbé ismert és elterjedt az Enfield és Andreau vitor-

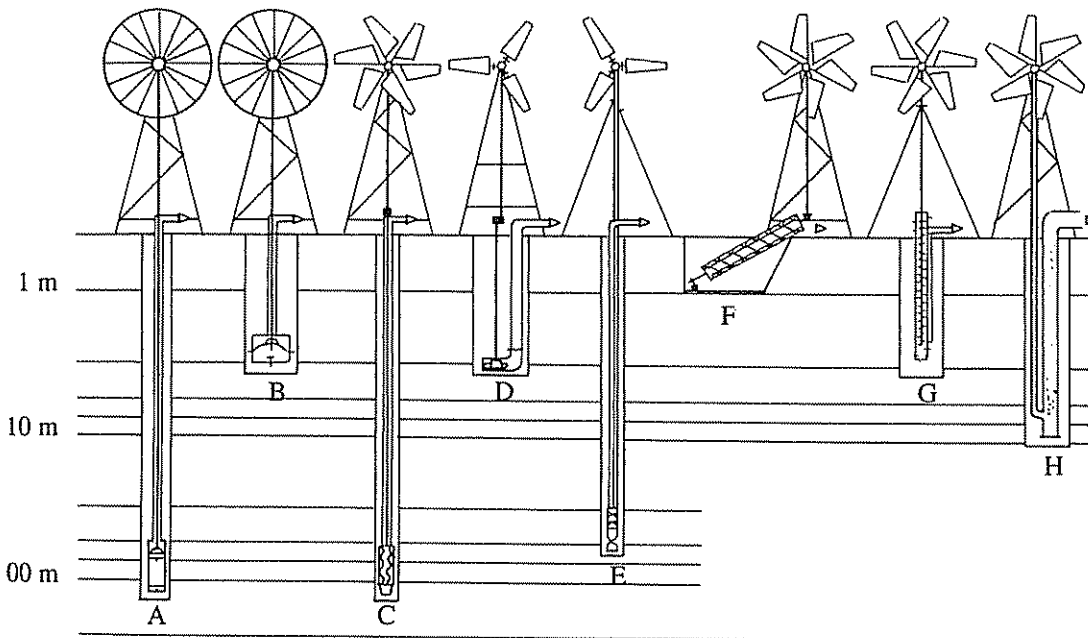
szárny-kivitelek, és a kiegyensúlyozás szempontjából előnyös, egymással szemben forgó rotorokkal készített konstrukció.

Mindegyik változattal a meglévő rendszerek valamilyen negatív tulajdonságát igyekeztek kiküszöbölni, ill. előnyöket kerestek a hajtás vagy a hatásfok javítása szempontjából, de aztán gyártási, vagy kivitelezési nehézségeik miatt nem voltak képesek elterjedni.

A vízszintes tengelyű kivitelezéshez sorolhatók még a keresztlap elrendezésű avonius és a diffuzor, valamint a szűkített torokkal kiképzett változatok is. Ilyen bevezetések közül néhány nagyüzemi példány is elkészült, azonban gyártási nehézségeik miatt nem kerültek szériagyártásba, s különösen a nagyobb méretű generátorokra való törekvés során kerültek ki a fejlesztés homlokteréből.

## 2.2. Szélmotorok a szivattyúk hajtására

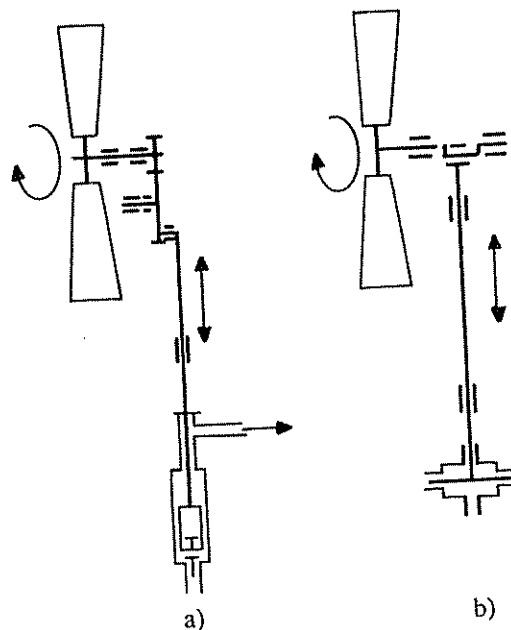
A 2.7. ábrán azokat a vízhúzó változatokat mutatjuk be, amelyek jelenleg is gyártás alatt ill. a fejlesztés alatt vannak. Ezek közül a legnagyobb darabszámban gyártják ma az amerikai rendszerű sűrűlapátos szélmotorokat vízhúzási célokra [37.].



2.7. ábra. Szivattyúkat hajtó szélmotorok

(A dugattyús szivattyú, B membránszivattyú, C csavarszivattyú, D centrifugálszivattyú,  
E többfokozatú centrifugálszivattyú, F csigaszivattyú, G kanalasláncos vízemelő,  
H mamutszivattyú)

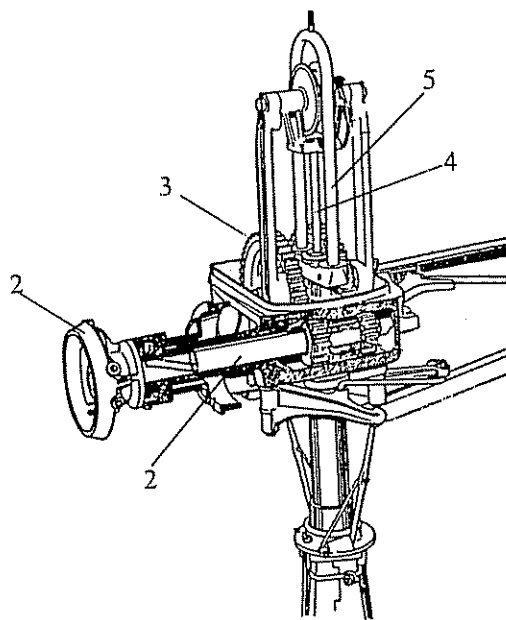
Két főbb kiviteli formájuk ismert [11.]. A vízhúzó, ill. a vízátemelő szélmotoroknál a lapátkerék forgó mozgását kulisszás, excenteres hajtóművek alakítják át a szivattyú által hasznosítható egyenes vonalú mozgássá. Ha a lapátkerék a szögsebességet csökkentő áttételi mechanizmus hajt, és azt követően átalakítják át a forgási energiát alternáló mozgássá, a lassabban mozgó tolórúd jól használhatók dugattyús szivattyúk hajtására (2.8. ábra).



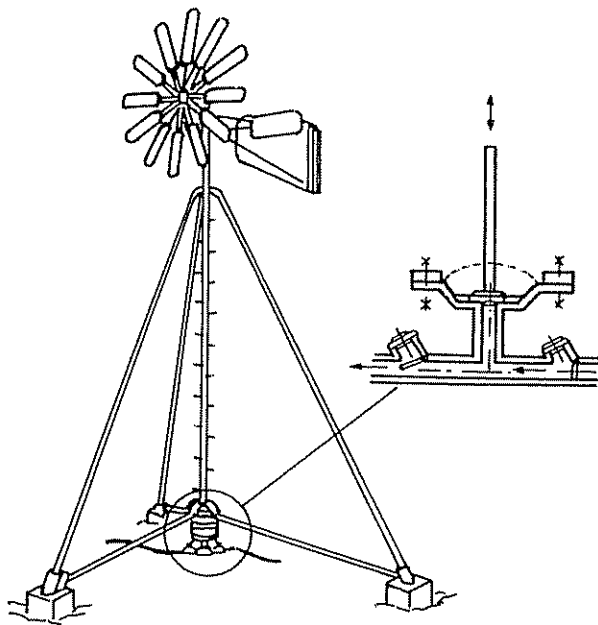
2.8. ábra A hajtásvázlat (a dugattyús szivattyú, b membránszivattyú)

Az említett szivattyús kiviteleknel a hajtótengely – több gyártónál – még ma is csúszó csapágyazású és lassító áttételű fogaskerék-páron keresztül kulisszás hajtóművet hajt meg. A hajtórúd az egyenesbe vezetőtől a szivattyúig tart (2.9. ábra).

A membránhajtásnál az áttételi mechanizmus rendszerint elmarad és a hajtásátvitel közvetlenül a tengelyen kialakított excenterről történik. A nagyobb löketségű és rövidebb löket révén csak membránszivattyúk hajtására alkalmas. E megoldásoknak ugyan kisebb a vízemelő magasságuk, de igen nagy a vízszállító képességük. Membránszivattyús kivitel szemléltet a 2.10. ábra.



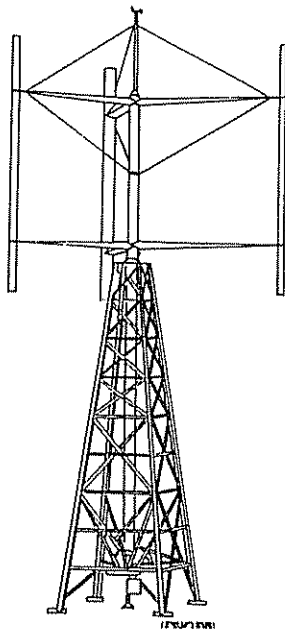
2.9. ábra. Áttételi és egyenesbevezető mechanizmus  
(1 lapát, 2 lapáttengely, 3 fogaskerék-áttétel, 4 hajtórúd, 5 egyenesbevezető)



2.10. ábra. Membránszivattyús kivitel

Ha a lapáttengely és a dugattyúrúd közé áttételi mechanizmust építenek, akkor a dugattyún hasznosítható nyomaték is módosítható. Az ilyen megoldások olyan kuttaknál is alkalmazhatók, ahol a vízszint a talajszinttől 20–30 méter mélységben van, tehát nagyobb forgatónyomaték szükséges.

A Giromil változatnál a szivattyúkat meghajtó tengely a lapáttengely meghosszabbítása. E tengellyel lehetőség van villamos generátor meghajtására is [29.].



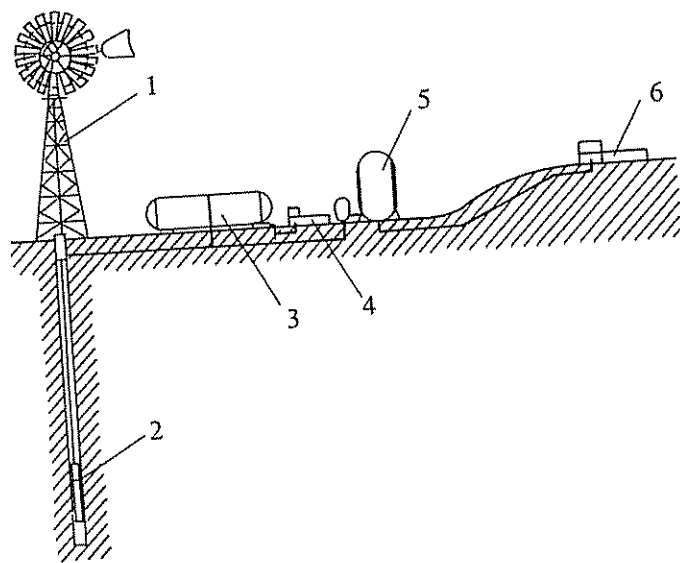
2.11 ábra. Giromill típus, centrifugálszivattyú hajtására



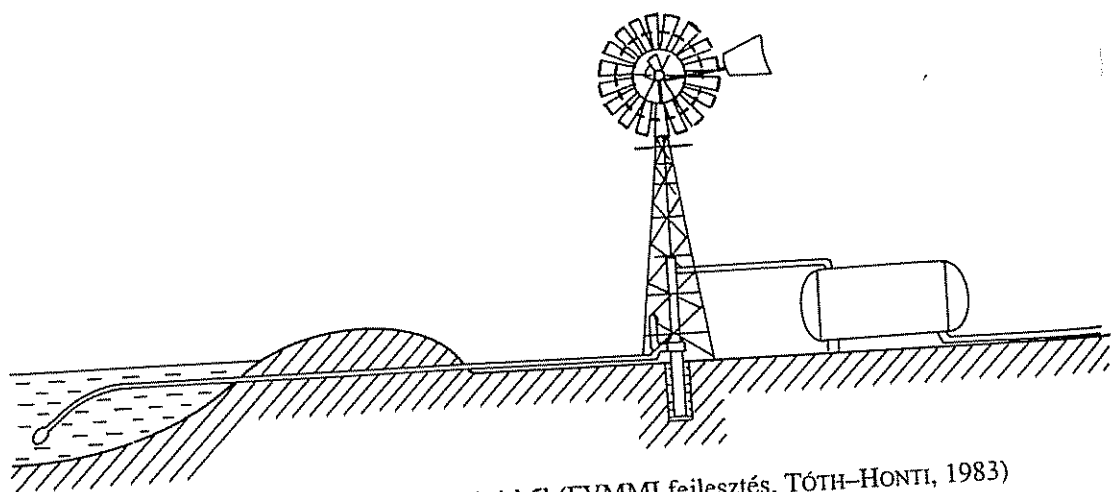
Amint említettük (lásd 1.7. fejezet) sűrűlapátosú változatokat Magyarországon is gyártottak, és jelenleg is gyártásban vannak.

E berendezéseket legelőterületeken háziállatok, erdős területeken a vadállatok ivóvízellátására használják. Mivel 1–2 napos teljes szélcsendek előfordulhatnak, ezért gondoskodni kell az ivóvíz tárolásáról. (2.12., 2.13. ábra)

A szelesebb időszakokban termelt többlet vízmennyiséget nagyobb térfogatú tartályokban gyűjtik össze. A magyarországi vizsgálatok azt bizonyították, hogy ezen típusok az ország sík területein szinte bárhol eredményesen használhatók. A telepítésekénél kerülni kell a szélárnyékos helyeket, amelyek lehetnek dombok mögött, magasabb létesítmények közvetlen szomszédságában stb. A berendezés nyilvánvalóan azokon a helyeken versenyképes energia-előállítás költségeit is figyelembe véve,

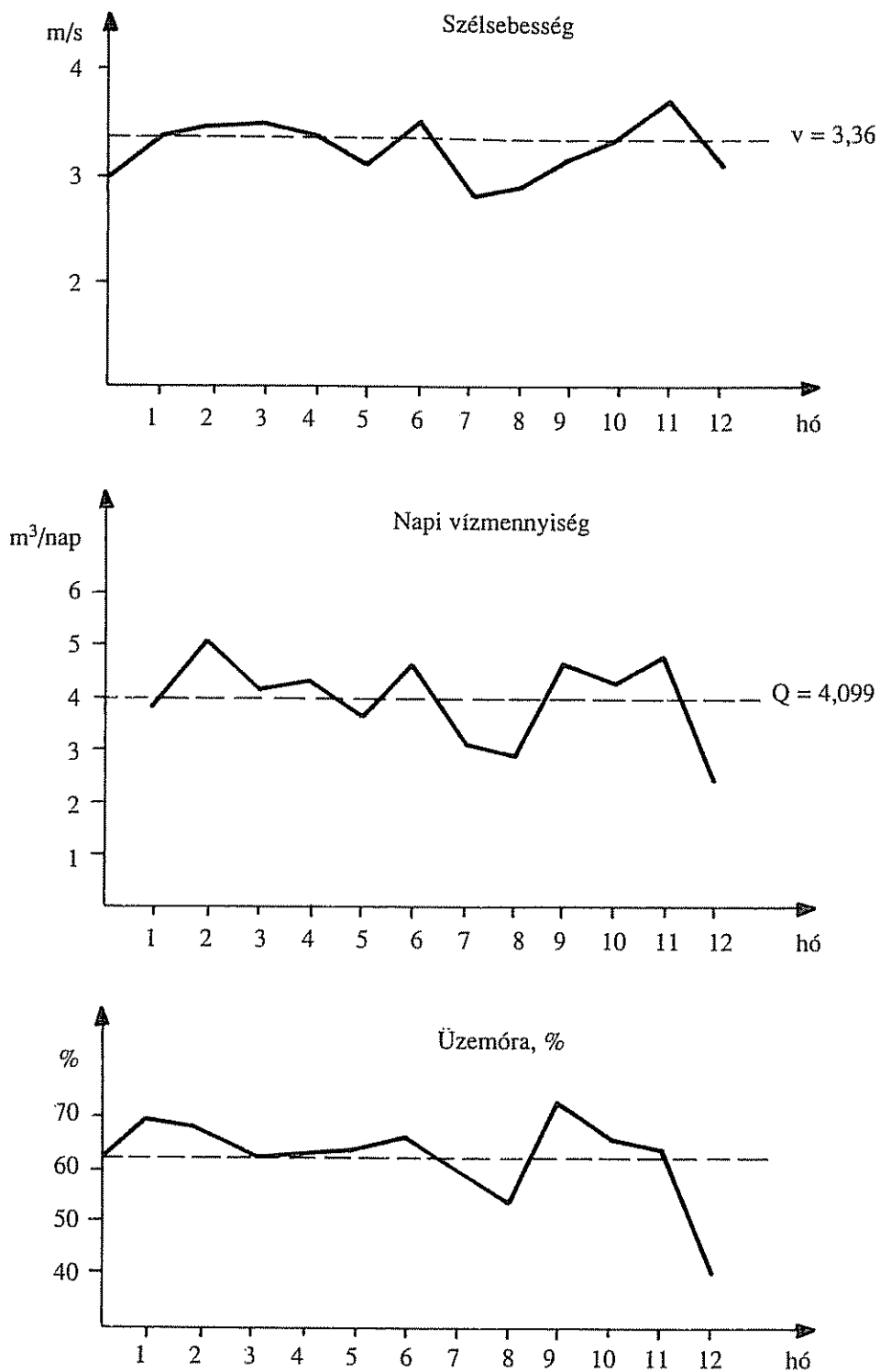


2.12. ábra. Magyarországon (legelőterületen) alkalmazott vízhozó szélmotor (FVMMI fejlesztés, TÓTH-HONTI, 1983). 1 szélmotor; 2 szivattyú; 3 gravitációs tárolótartály; 4 szinttartályos itatóvályú; 5 túlnyomásos tárolótartály; 6 szinttartályos itatóvályú



2.13. ábra. Víz kiemelése folyóvízből (FVMMI fejlesztés, TÓTH-HONTI, 1983)

ol hálózati villamos energia nem áll rendelkezésre ill. nagy távolságokra lenne ikséges a hálózat kiépítése.



2.14. ábra. Az FVMMI által fejlesztett vízhúzó szélmotor vízhúzó teljesítménye egy év során Hódmezővásárhely térségében (TÓTH-HONTI, 1983)

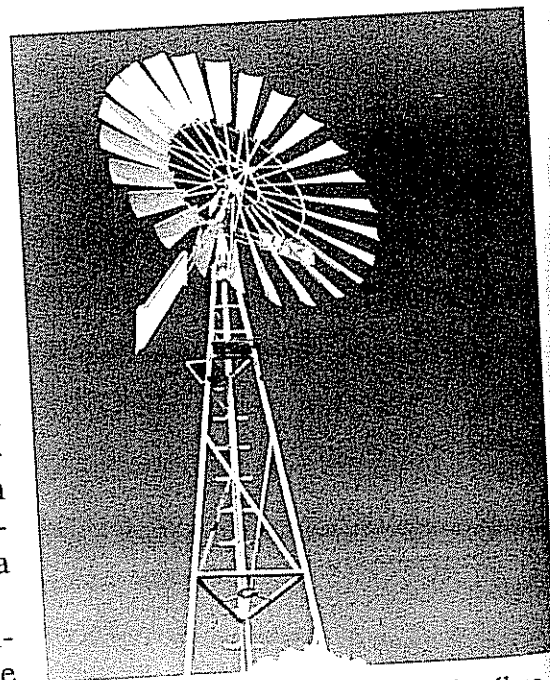
Számos kiadvány (tanácsadó füzet) jelent meg abból a célból, hogy e berendezéseket barkácsolással, házi körülmények között is elő lehessen állítani. E könyv szerkesztője óvja a barkácsolókat a házi kivitelezéstől. A gyárilag, szériában gyártott berendezéseknél a különféle szerkezeti egységeket kísérletekkel mérték be (szilárdsági, dinamikai, anyagkifáradási szempontokból), jól működik a viharvédelmi rendszerük is. A házilag gyártott kiviteleknel gyakori – még akkor is, ha a szerkezeti kialakítás valamilyen meglévő példányról másolják – a kivitelezési hiba pl. nem megfelelő szerkezeti anyagokat használnak, vagy a hegesztéseket nem végzik el kellő alapossággal. Ezek következtében a használat során gyors anyagkifáradások következnek be és a következményei beláthatatlanok. A nagy szélben leszakadó lapát akár 50–150 méter távolságra is elrepülhet, kárt téve anyagi javakban, esetleg emberéletekben. A berendezések egyike sem méretezhető extrém szélviszonyokra, ekkor még a jól konstruált és kipróbált típusok is meghibásodhatnak. A barkácsolással készített gépeknél a deformációk már kisebb, közel sem extrém szeleknél bekövetkeznek (erre számos példát lehet találni az ország különböző területein).

Jó példák vannak arra, hogy az amerikai rendszerű vízhúzó szélmotorokat domb- és hegyvidéki körülmények között is alkalmazhatjuk. Ekkor a lejtőn emelkedő, ill. a lejtőn lefelé irányuló szeleket lehet felhasználni. Erdős területeken és a függőleges vagy vízszintes irányú irtásokban Gödöllő térségében hosszú éveken keresztül alkalmaztak ilyen berendezést vadállatok ivóvízellátására, a vaddisznós területeken az állatok dagonyázásához szolgáltatott vizet száraz nyári időszakokban. Hangsúlyozni kell, hogy bármilyen egyszerű szerkezetről is van szó, a folyamatos karbantartása nem hanyagolható el.

A 2.14. ábra szemlélteti, hogy egy sűrűlapátos vízhúzó berendezéssel az év során folyamatosan megfelelő mennyiségű vizet lehet biztosítani és könnyen kiszámítható a terület szélviszonyaiból a szükséges tároló mérete is. Figyelembe kell azonban venni, hogy ha a vizet nem felszíni kutakból, hanem 15–25 méterről nyerjük, akkor a lapátkerék indítási energiaigény jóval nagyobb. A 20 méter mélységbe lehelyezett dugattyús szivattyúnak jelentős statikus terhelést kell az indulásnál legyőznie. Számolni kell azzal is, hogy a nagyobb nyomatékigény miatt a kisebb szelekekben a gépek el sem indulnak, megoldást a nagyobb lapátkerék kiválasztása jelenthet.

A sűrűlapátos változatokkal villamos generátorok is meghajthatók. A kicsi lapát alapfordulatszámából kiindulva a villamos generátorokhoz gyorsító áttétel szükséges. Általában 1:30–1:40 áttétel viszonyt kell alkalmazni, mivel a lapát maximális fordulata 100-nál nem lehet nagyobb. Ezen lapátok gyakorlatilag csak statikailag egyensúlyozható ki, dinamikailag kevésbé, különösen azon változatok, amelyek összeszerelése a helyszínen történik, s geometriai eltérések okozzák a kiegyensúlyozatlanságot. (2.15. ábra)

Ma a világban legelterjedtebb a vízszivattyúkat meghajtó szélmotor. Világszerte 1,8–2 milliót használnak rendszeresen, s több mint 50 aktív gyártó ismert.



2.15. ábra. Gyártásban lévő vízhúzó szélmotor (2002, SZABÓ GYÖRGY, Borsodnádassd)

## 2.3. Szélgenerátorok

### 2.3.1. A teljesítmény szerinti felosztás

Az alapvető kivitelek három csoportra sorolhatjuk:

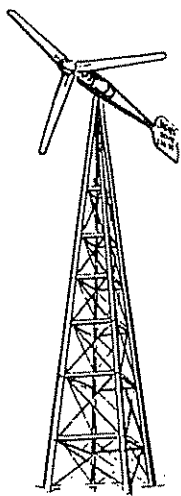
A **kicsi, különálló turbinák csoportja**, amelyeket akkumulátortöltésére, fűtésre használnak (10 kW tartomány alatt). Ezek a villamos hálózatoktól távol eső helyeken gazdaságosság szempontjából a legsikeresebbek. Jelenleg 200 000 akkumulátortöltő kis szélturbina üzemel a világon (2.16. és 2.17. ábrák).

Alapkvitelben a generátorok akkumulátorokat töltenek és a tárolt energiát a későbbiek során a célnak megfelelően alakítják át. A legegyszerűbb, ha a háztartási berendezések közvetlen az akkumulátorok egyenfeszültségről működnek (rádiók, televíziók, hűtőszekrények stb.). Előnyösebb lehet, ha a telepeken tárolt energiát invertereken keresztül ismételtlen váltakozó feszültségű (a hálózathoz nyert háztartási villamos energiához hasonló feszültségű és periódusú) 50 Hz-es energiává ala-

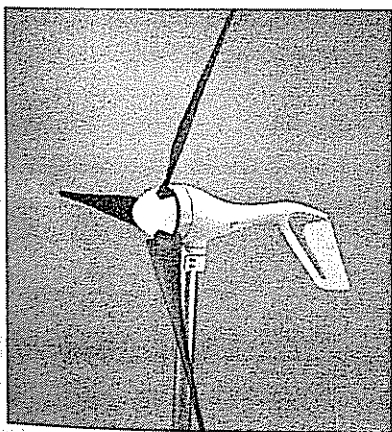
kítják át, s így a hagyományos háztartási berendezések közvetlenül üzemeltethetők. Az így nyert energia költsége duplája is lehet a hálózathoz nyert villamos energiának, vagyis olyan helyeken nem gazdaságosak, ahol hálózati villamos energia is rendelkezésre áll.

A második csoportba tartoznak a **hibrid energia-rendszerek** (2.18. ábra) közepes méretű szélturbinái (10–150 kW tartomány), amelyeket más energiaforrásokkal is kombinálnak, pl. fotoelektromos cellák, gyakrabban dízelgenerátorok. Felhasználhatók vízhálózat vagy akkumulátor töltésére vagy más speciális célokra pl. sótalanításra. A dízelmotoros hibrid, vagy az ún. szigetüzemű berendezésekről a későbbiekben még szólnunk [46.].

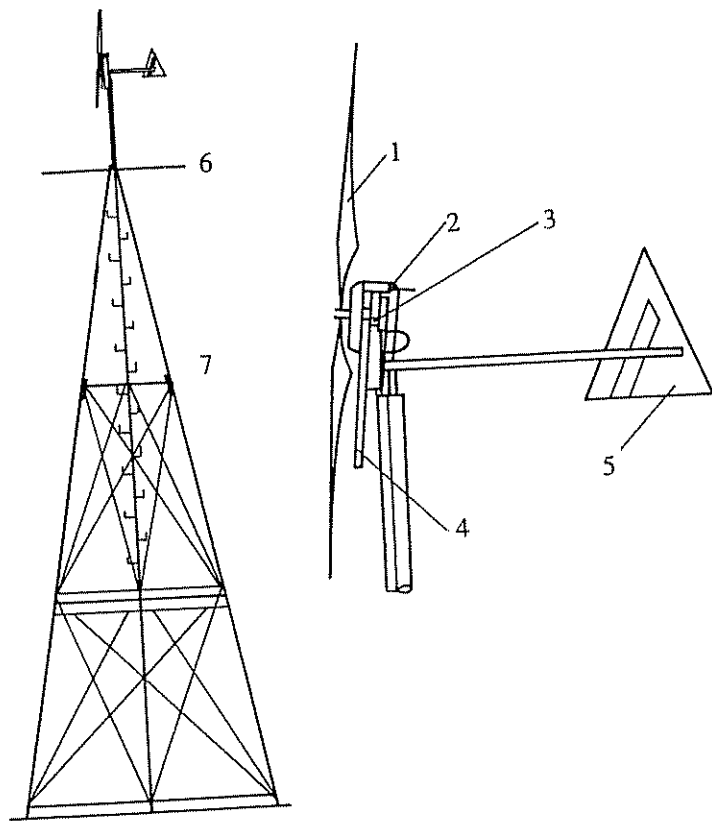
A harmadik csoportba tartoznak a közép- illetve **nagyméretű szélturbinák**, melyek teljesítménye a 80-as évek óta 100-ról 1500–3000 kW-ra nőtt. Újabban az 1,0–1,5 MW-os – kereskedelembe kapható – szélturbinákkal cserélik le a kisebb 50–100 kW teljesítményűeket (Dánia, Hollandia, Németország). Ez önmagában is átlagosan 10–20-szoros villamos teljesítménynövekedést jelent az adott területeken. A hálózathoz kapcsolt szélgenerátorok gyakran ún. szélfarmon üzemelnek. Napjainkban a legelterjedtebbek a háromlapátos, vízszintes tengelyű kivitelek, amelyek fix, vagy vezérelt fordulatszámmal működnek. Kontinentális viszonyok között a változó fordulatszámú megoldások számos előnnyel rendelkeznek. Egyre hatékonyabb alkalmazásukat a mikroelektronika nyújtotta lehetőségek és a célraorientált szoftverek is segítik.



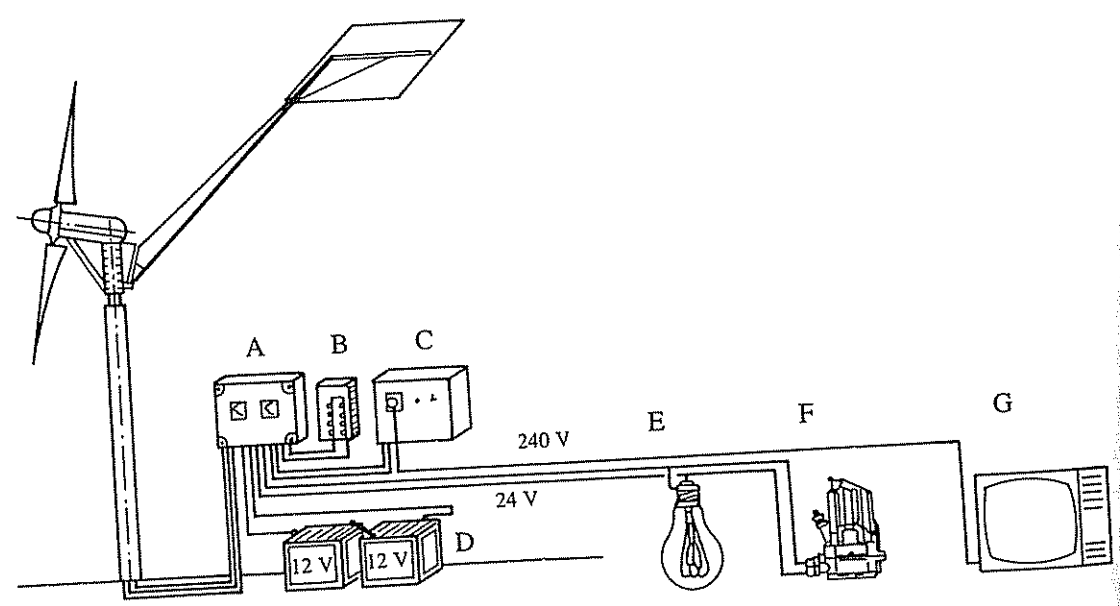
2.16. ábra. 5,0–10,0 kW teljesítményű generátor, rácsos oszlopon



2.17. ábra. 1,0–3,0 kW teljesítményű gyorsjárású generátor (vitorlás hajókon is használatosak)



2.18. ábra. Fotelektromossal hibrid kivitel (1 lapátkerék, 2 permanens mágneses szinkrongenerátor, 3 lapátengely, 4 segédlapát, 5 farokvitorla, 6200 W-os napelem, 7 állvány)

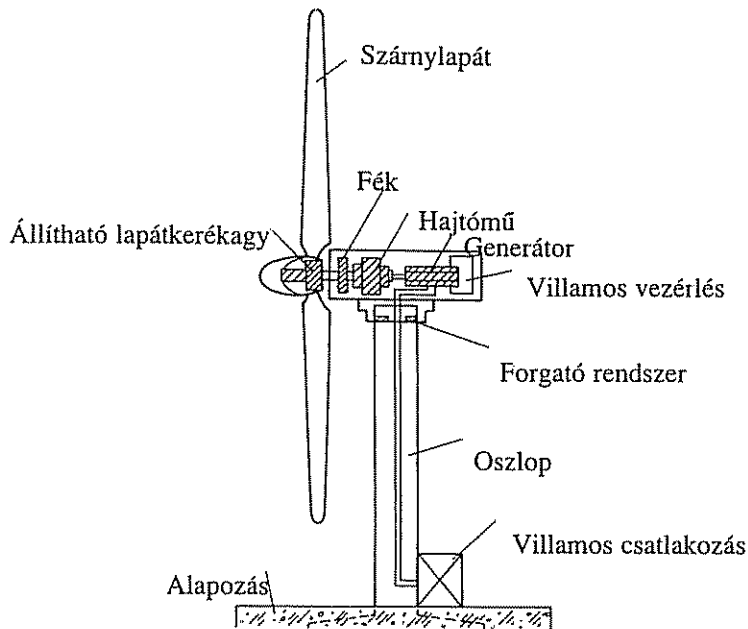


2.19. ábra. Helyi villamos hálózat ellátása és akkumulátor töltése (5,0–15,0 kW)  
 (A vezérlő és szabályzó, B fűtőegység, C inverter, D akkumulátorok,  
 E háztartási berendezések meghajtása, F vízszivattyú, G tv, rádió, videó stb.)

## 2.3.2. Szélgenerátorok szerkezeti felépítése

A villamos szélturbinák felépítése ma már mind a lapátozás, mind a kapcsolódó egységek szempontjából kiforrott. Általános felépítésüket a 2.20. ábra szemlélteti.

A következőkben részletesebben csak azokkal a megoldásokkal foglalkozunk, amelyeknél a lapátkerék tengelye megegyezik a szél irányával. E korszerű szélgenerátorok 2 vagy 3 szárnylapáttal rendelkeznek [44.].



2.20. ábra A szélgenerátor felépítése

### 2.3.2.1. Generátorház

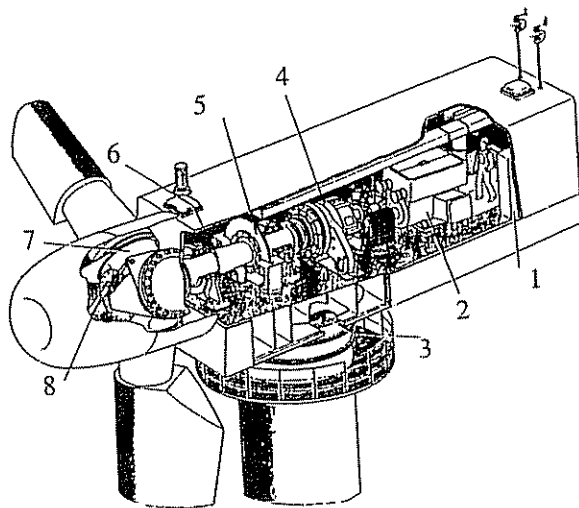
A generátorházak (gondolák) 30–120 m magas tornyokon nyernek elhelyezést. Fontos szerkezeti elemük a lapátkerekeket szélirányba beállító mechanizmus, amely függőleges tengely körül elfordítja a tornyon levő házat, és ezzel eléri, hogy a lapátkerék a mindenkori szélirányra merőlegesen álljon. A torony magassága általában 1,0–1,7-szerese a lapátkerék átmérőjének [46.].

A lapátkerékagy rendszerint a főtengelyen nyugszik, s e tengelyen található a tárcsafék, amelyet a tengelykapcsoló követ, s így jut el a lapátkerék forgatónyomatéka a generátor előtti hajtóműhöz, majd a generátorhoz (2.21. ábra). Egyszerűségük miatt az aszinkron generátorok igen kedveltek, de újabban a szinkron generátorok kerültek az érdeklődés homlokterébe.

A szabályozó rendszer feladata, hogy illessze (kihasználhatóvá tegye) a rendelkezésre álló szélenergiát a generátorba beépített teljesítménnyel, vagyis szélirányba szabályozza a lapátkereket, a tengelye körül forgatható lapátokat a szélesebbességnek, ill. a villamos terhelésnek megfelelő szöghelyzetbe hozza (Pitch rendszer), működtesse a védelmi rendszert (lapátfék, tengelyfék), optimalizálja a kimenő teljesítményt stb.

A főtengely jó minőségű edzett, ötvöztött acél. A főcsapágyak rendszerint többsoros golyós, vagy görgős csapágyak. A csapágy veszi fel a széllellökésekből és a lengő tömegerekből fakadó terheléseket, s így mérséklék a hajtómű igénybevételét. A rugal-

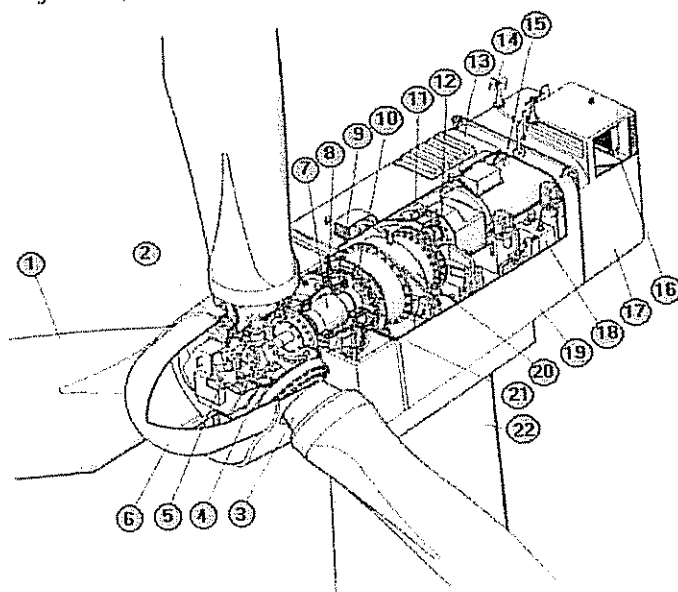




2.21. ábra A felépítmény fő egységei (MAN WKA 60 típus: 1 vezérlőszekrény, 2 generátor, 3 szélirányba forgató mechanizmus, 4 hajtómű, 5 tárcsafék, 6 tengely és csapágyazás, 7 lapátagy, 8 állítható lapátagy (Pitch mechanizmus))

mas tengelykapcsoló csillapítja a szél által lökdösött lapátkerék és a generátor változó terhelése (generátoros, motoros, ismét generátoros üzem stb.) által létrejövő csavaró lengéseket, védve mind a hajtóművet, és a tengelyt az esetleges túlterhelésektől.

A forgatónyomatékot létrehozó szárnyra ható aerodinamikai felhajtóerő erő négyzetesen arányos a szél sebességével. A szárnylapátra ható tolóerő (ellenállás) kelti az oszlopon létrejövő hajlító nyomatékot [58.].



2.22 ábra. A szélturbina szerkezeti egységei (1 lapát, 2 a lapát csapágyazása, 3 a lapát csatlakozó része, 4 lapátkerékagy, 5 hidraulikus munkahenger, 6 elülső borítólemez, 7 fő tengely, 8 főcsapágy-ház, 9 főcsapágy, 10 tengelykapcsoló (alacsony sebességnél), 11 mechanikus fék (nagy sebességhez), 12 hajtómű, 13 burkolat, 14 anemométer, 15 generátor, 16 olajhűtő, 17 hátsó borítólemez, 18 hidraulikus egység (szivattyú, tartály stb.), 19 borítólemez, 20 hajtóműház, 21 mechanikus fék (alacsony sebességhez), 22 torony.)

Részletesebben egy aszinkron generátoros szélturbina generátorházában (gondolójában) található fő szerkezeti részeket a 2.22. ábra szemlélteti.

A hengerelt acél csőtorony a legelterjedtebb Európában, míg az Egyesült Államokban kedvelik a rácsszerkezetű kiviteletet. A kisebb szélgenerátoroknál az acél-sodronyos kifeszítés is alkalmazott megoldás. A tornyoktól a villamos kábel a földben vezet a transzformátorhoz [83.].

A csoportos telepítésnél (park) a vezetékekből először hurkot készítenek, majd azután kapcsolódnak a transzformátorra, ill. a villamos hálózatra. Beruházási költségcsökkentési okokból a legjobb szélpotenciállal rendelkező környezetben is figyelembe kell venni a kábelezés elrendezését, a fő hálózat csatlakozási pontjától való távolságot.

A generátorházra szerelt anemométer fontos részegysége a szélerőműnek. Segítségével mérhetjük, ellenőrizhetjük a szélerőmű vagy a szélerőmű park hatásfokát, de a szabályozás és viharvédelem is a szélesebségtől függően vezérelt. Az anemométer közvetlen kapcsolatban áll a vezérlő számítógéppel. A vezérlési elvekről a későbbiekben szólnunk.

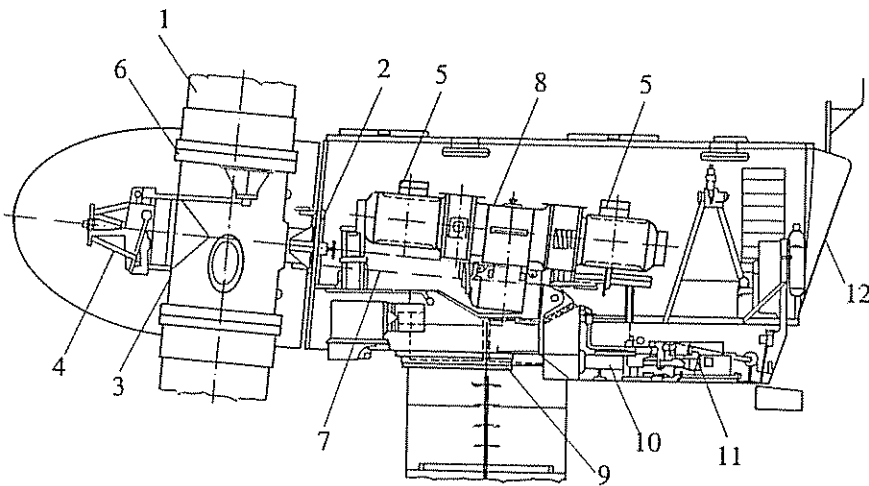
Pólusváltás aszinkrongenerátornál (pl. 4/6 pólusú) a kisebb szélesebségeknél a vezérlés a 6 pólusú rendszert működteti, nagyobb szélesebségeknél pedig átkapcsol a 4 pólusú körre, s ezzel biztosítja az optimális teljesítményt, és a szinkron közeli fordulatszámot.

A generátorházba telepített folyadék hőcserélő a súrlódások (csapágy, hajtómű, generátor, fék) okozta hőt szállítja el és ezzel a rendszert állandó hőmérsékleten tartja.

A hatékonyabb szélgenerátorok két aszinkron generátorral is dolgozhatnak, a kisebb teljesítményű a kis szélesebségnél, a nagyobb pedig a 6–8 m/s feletti szélesebségnél kapcsolódik a rendszerre.

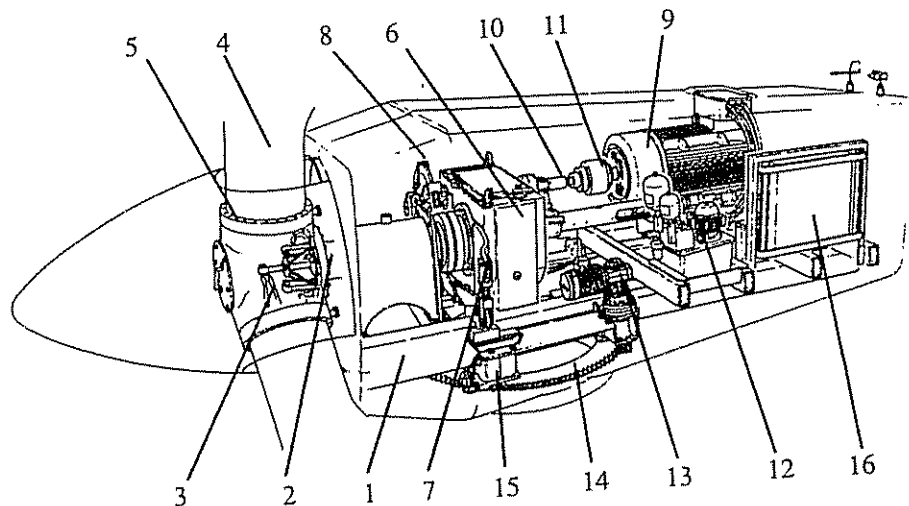
Vannak típusok, amelyeknél e kétgenerátoros változatot kettős tekercselés alkalmazásával oldják meg.

A következőkben, a típusok közötti sokféleség érzékeltetése céljából néhány jellemzőbb megoldást mutatunk be a 2.23., 2.24., 2.25., 2.26., 2.27. és 2.28. ábrákon.

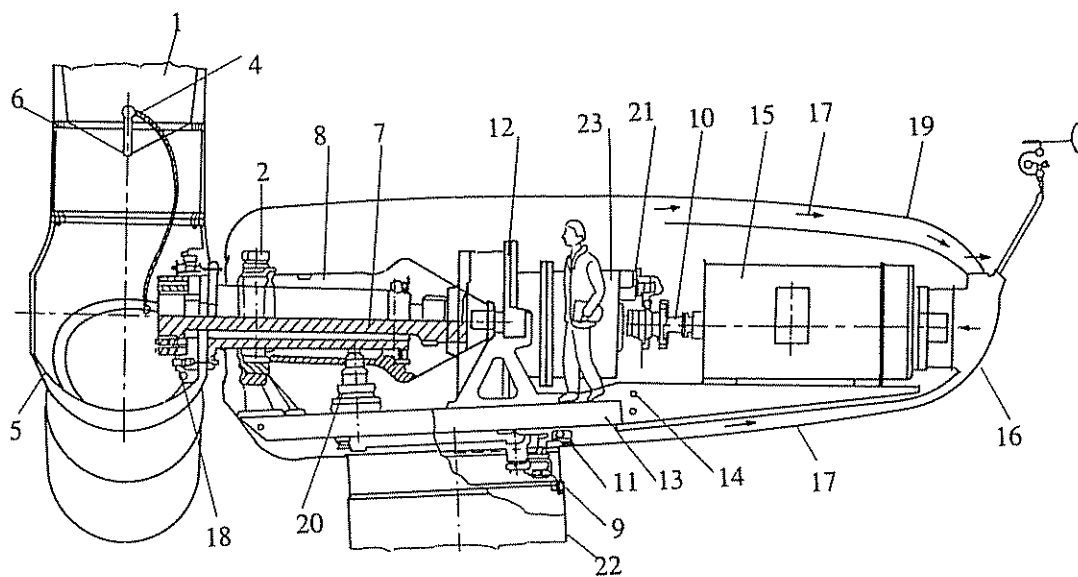


2.23. ábra. NEDWIND 50 típusú 2 generátoros változat, Pitch szabályzóval  
(52,6 m lapátkerék-átmérő, 1000 kW teljesítmény), fő részei:

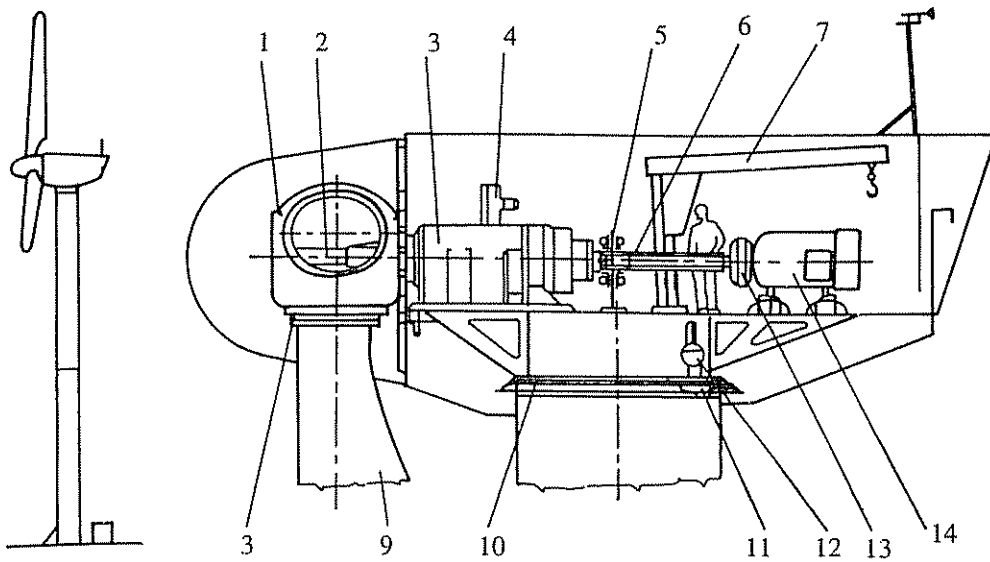
(1 lapát, 2 fő tengely-csapágy, 3 lapátkerékagy, 4 Pitch szabályzó, hidraulikus munkahengerek, 5 generátorok, 6 lapátelfogás és csapágyazás, 7 fő tengely, 8 generátor, 9 hajtómű, 10 fogaskoszorú, 11 iránybaállító hajtómű, 12 iránybaállító motor, 13 hátsó borítólemez.)



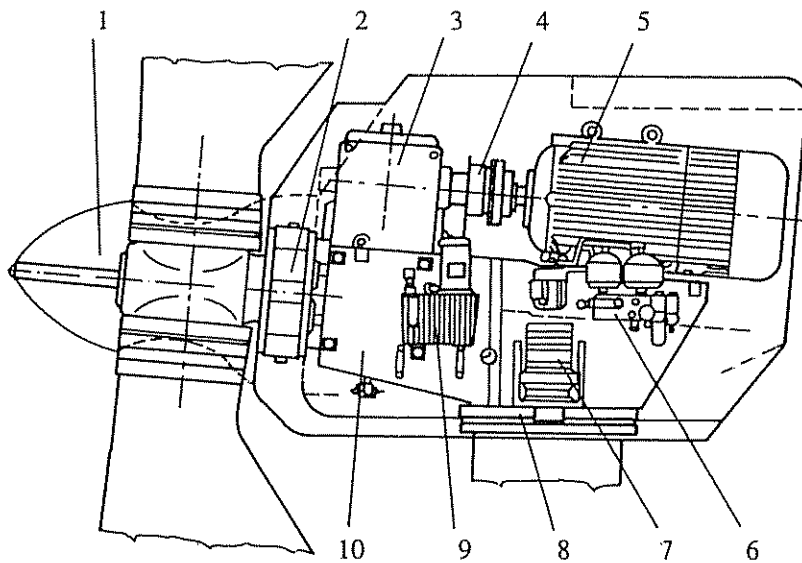
2 24. ábra VESTAS 27-225 típusú aszinkron generátor, Pitch szabályzóval  
 (1 platform, 2 főtengely, 3 Pitch szabályzó, hidraulikus munkahengerek, 4 lapát, 5 lapátfelfogás és csapágyazás, 6 hajtómű, 7 hajtómű rugalmas felfogása, 8 fék, 9 pólusváltós aszinkron generátor, 10 tengely, 11 tengelykapcsoló, 12 hidraulika, 13 iránybaállító hajtómű, 14 fogaskoszorú, 15 iránybaállító fékrendszere, 16 olajhűtő.)



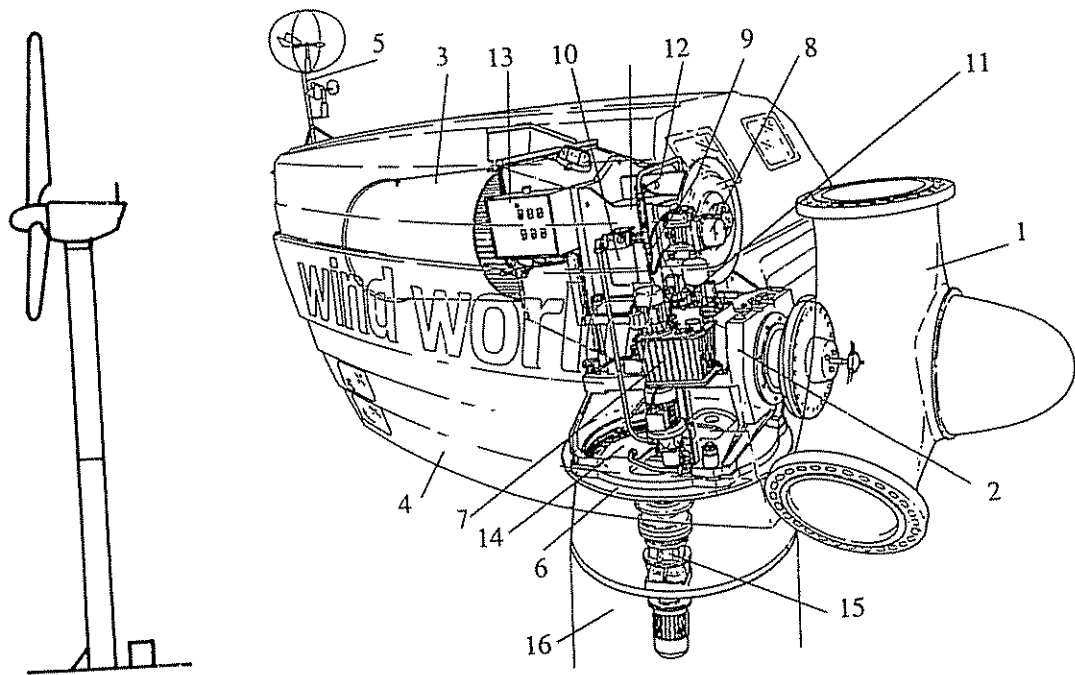
2 25. ábra NORDEX N52 típusú generátor  
 (52 m lapátkerék-átmérő, Stall-rendszer, 800 kW teljesítmény)  
 (1 lapát, 2 főtengely-csapágy gumiházban, 3 lapátkerékagy, 4 hidraulikus munkahenger, 5 elülső borítólemez, 6 lapát felfogása, 7 főtengely, 8 főcsapágyház, 9 mechanikus fék (irányba állításhoz), 10 tengelykapcsoló, 11 fogaskoszorú, 12 hajtómű, 13 alaplemez, 14 generátortartó, 15 generátor, 16 olajhűtő, 17 burkolat, 18 a főtengely és agy csatlakoztatása, 19 hátsó borítólemez, 20 iránybaállító motor, 21 tárcsafék, 22 torony, 23 fékhidraulika.)



2.26 ábra. Husumer Schiffswerft HSW 750 típusú generátor, szervizdaruvál  
 (1 lapátkerékagy, 2 lapátállásszög-szabályzó, 3 főtengely, csapágyház, tengelykapcsolók, 4 olajhűtő,  
 5 tárcsafék, 6 Pitch szabályzó, hidraulikus munkahengerek, 7 szervizdaru, 8 lapát felfogása, 9 lapát,  
 10 fogaskoszorú, 11 fék az irányba állításhoz, 12 hajtómű (irányba állítás),  
 13 rugalmas tengelykapcsoló, 14 generátor.)



2.27. ábra. VENTIS 20-200 típusú generátor Pitch szabályzóval  
 (1 egy és Pitch szabályzó, hidraulikus munkahengerek, 2 rotorfék, 3 hajtómű, 4 tengelykapcsoló,  
 5 pólusváltós aszinkron generátor, 6 hidraulikaszivattyú, 7 iránybaállító hajtómű,  
 8 fogaskoszorú, 9 hidromotor, 10 vázszerkezet.)



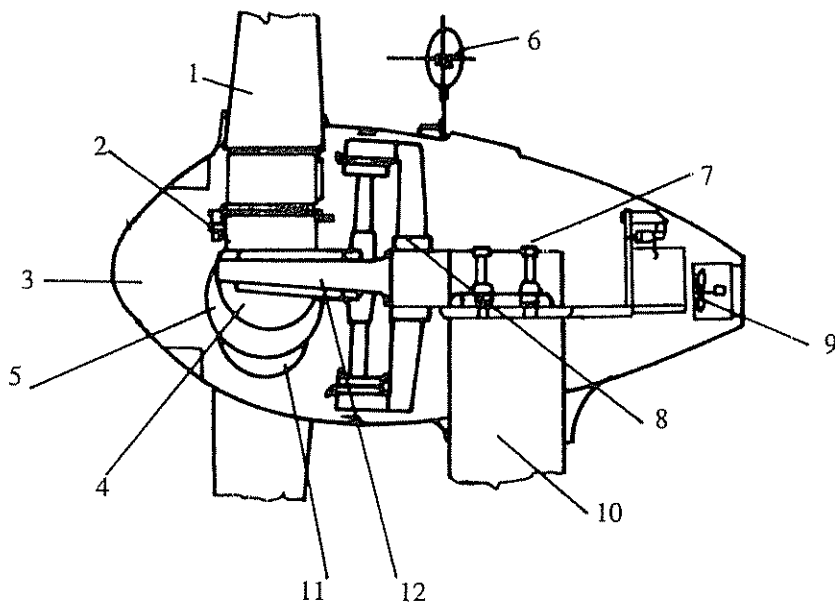
2 28. ábra. Wind World W2700 típusú generátor bolygókerékes hajtóművel  
 (1 lapátkerékagy, 2 bolygókerékes hajtómű, 3 aszinkrongenerátor, 4 burkolat, 5 szélérzékelők,  
 6 fogaskoszorú, 7 hidraulika, 8 fék, 9 hidraulikaszivattyú, 10 olajsűrő, 11 hidromotor,  
 12 hőmérséklet-érzékelő, 13 elektronika, 14 oszlopsatlakozó,  
 15 gondolaforgató motor, 16 acélcső tartóoszlop.)

A lapátkerék forgási sebességének beállításához és a lapátkerék szélirányba állásához használt elektrohidraulikus szabályozó egység meghajtásának, valamint a lapátszög beállításához rendszeresített elektromotorok áramforrása a kapcsolódó villamos hálózat. A ház a tartóállványon csapágyazott, s az elfordítását a villamos, vagy elektrohidraulikus hajtóműhöz kapcsolt homlokfogaskerékpár végzi. Önzáró áttételek, és fékek (pl. frikciós) segítik, valamint védik a széliránykövető rendszert, a pontos iránytartásban, továbbá a gondola rögzítésében. (2.29. ábra)

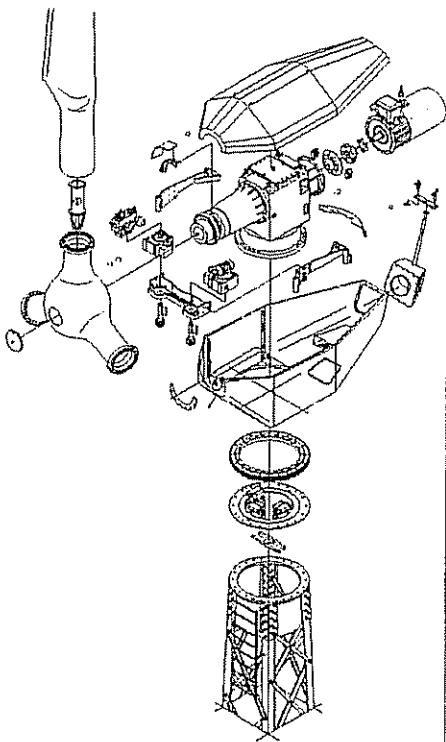
Minden generátor saját vezérlőprogrammal rendelkezik, melynek ellenőrzése, adatok lehívása, és parancsok, információk beírása a toronyban található terminál segítségével történik. A saját kijelzővel és billentyűzettel ellátott terminál a vezérlő szekrényben található. Ennek révén meg lehet vizsgálni a különféle időszakokban a rendszer pontos működését, melyek a gép működtetésére hivatott menedzsmunkáját segíti. A vezérlés „on-line”, de rádiófrekvenciás üzemmódra is kiterjeszhető, s így létesíthető kommunikációs kapcsolat a központi vezérlővel, vagy egyéb terminállal [83.].

Általában a torony alsó részében található a villamos elosztó szekrény és a vezérlő terminál. Innen létra vezet fel a gondolába, amely bármikor megközelíthető. (2.30. ábra)

A toronyokat villám- és rövidzárlati védelemmel is ellátják. A villámcsapás levezetése céljából, pl. az üvegszálbetétes kompozit műgyanta lapátoknál a lapát homlok részében alumínium lemezcsíkot építenek be, s a ház burkolatához a villamos csatlakozást csúszó kefépár biztosítja.



2.29. ábra ENERCON E40 típus, hajtómű nélküli, sokpólusú szinkrongenerátorral (1 lapát, 2 lapátforgató motor, 3 burkolat, 4 tengely, 5 csapágy, 6 szélesség- és széliránymérő, 7 alkatrészdaru, 8 tengely felfogása, 9 hűtőventilátor, 10 állvány, 11 generátor-forgórész, 12 generátor-állórész.)



2.30. ábra. A teljes felépítmény részegységeinek, ill. alkatrészeinek elrendezése

A lapátok-, a generátorház- és az oszlopok felületének korrózióvédelmét többrétegű festés biztosítja.

A földelés általában 80–100 mm<sup>2</sup> keresztmetszetű rézvezeték, amely a torony földelési pontjait köti össze a 6–8 m mélyre lefektetett kétszeres gyűrű alakú földelő vezetékkel.

A hálózatnak szolgáltatott áram fázis-kompenzációját és a túlfeszültségvédelmet is (pl. villámcsapás) a vezérlő mikroprocesszoros látja el. A PCU többek között 3 fő kimenő paramétert vizsgál folyamatosan:

- a feszültség,
- az áram és
- a frekvenciát.

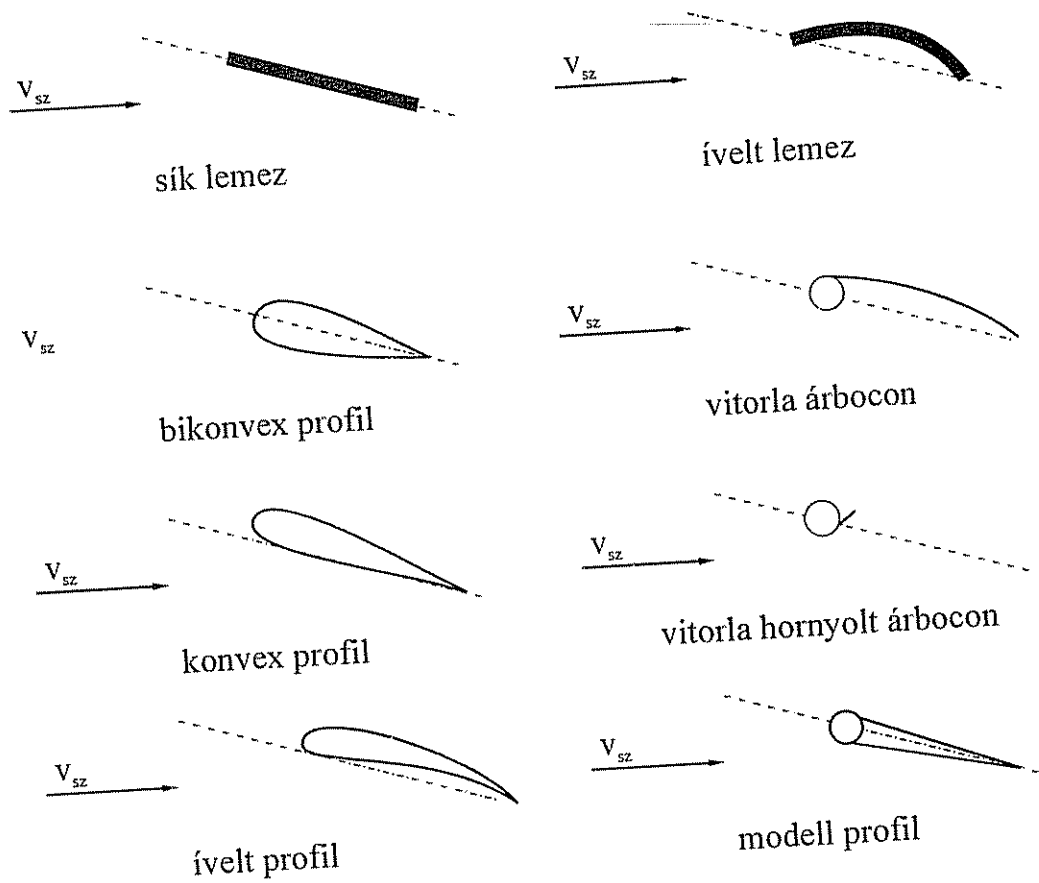
Ha bármely paraméter a megengedett értékhatáron kívülre esik, és a vezérlés a korrekciót nem képes megoldani, a vezérlés a generátort lekapcsolja a hálózatról, a rendszer önmagát (pl. befékezi) biztosítja és a hibakód felvételével regisztrálja az eseményt.



### 2.3.2.2. Szárnylapát

A szélmotorok legfontosabb része a szárnylapát, amelyen a szélnyomás hatására aerodinamikai erő képződik, s az így kialakuló nyomaték hozza forgásba az energia átvitel tengelyét.

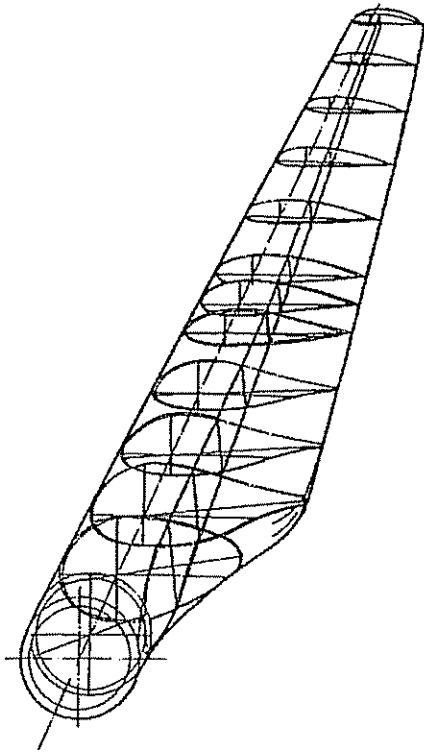
A szélalmoknál az 5–15 m hosszú szárnyak vászonborítással készültek. fordulatszámuk általában 10–14 min<sup>-1</sup> volt. A szélalmok aerodinamikai tulajdonságai kedvezőtlenek, hatásfokuk gyenge. A sűrűlapátos, lassú járású szélmotoroknál enyhén konkáv profilú, főként lemezlapátokat alkalmaznak (2.31. ábra). Ezek a profilok önmagukban nem elég szilárdak, ezért a lapátkerék vázát kör alakú fémgűrűvel erősítik meg. A sűrű lapátos, ún. amerikai változatú kerék átmérője a 15 m-t is elérheti [16.]



2.31. ábra Szárnylapátprofilok



2.32. ábra. A gyors járású szélmotorok szárnylapátai  
a) ívelt, b) konvex



2.33. ábra. Szárnylapátprofilok változása a lapát hossza mentén (DEBRA 25)

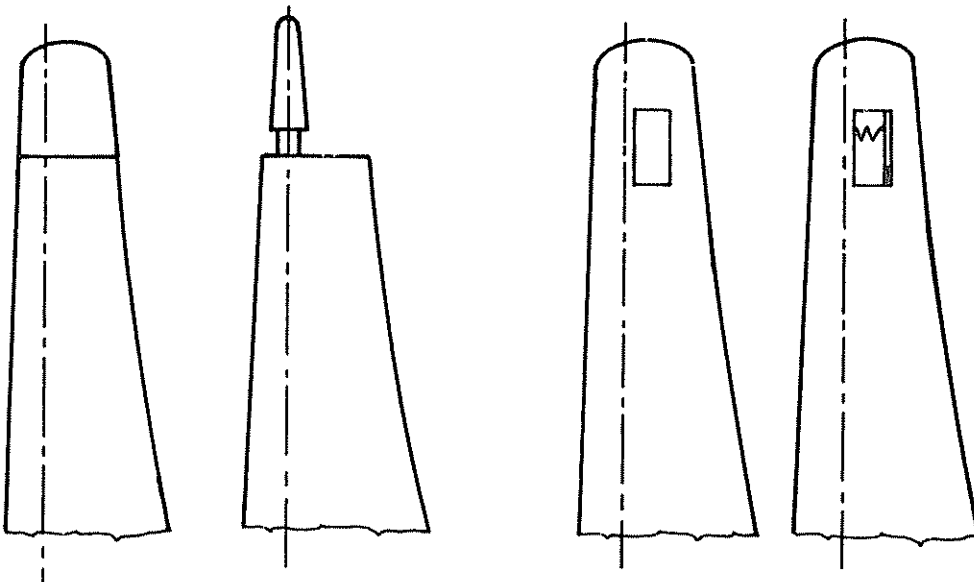
A 2–4 lapátos gyors járású szélmotoroknál a szárnylapátok kialakítása általában konvex (A), ritkábban aszimmetrikus bikonvex (B) jellegű (2.32. ábra).

Ezek a profilok már igen jó aerodinamikai hatásfokkal működnek. A szélmotorok lapát-szerkezetei igen szélsőséges időjárási viszonyok között működnek. El kell viselniük a por koptató hatását, az eső, a fagy és a vegyi anyagok támadását, mechanikai szempontból pedig az igen erős szélviharokat. (A szárnylapát hosszanti alakját mutatja a 2.33. ábra.)

A lapát biztonsági rendszeréhez egy aerodinamikus fék tartozik, amely a szárnylapátok végén, vagy oldalán helyezkedik el, de hidraulikus fék is védi a főtengelyen (2.34. ábra).

A lapátkereket, a főtengelyt, a nyomaték-váltót és az oszlopot szilárdsági szempontokból a nagy széllelkésekre méretezik. A főtengely közel merőleges az oszlop szimmetriatengelyéhez képest, s ezáltal a szélirány követésekor a tornyon hajlító és csavaró igénybevételek jelentkeznek [17.].

A fékrendszer általában két-, vagy háromlépcsős. A fordulatszám beállító, ill. túlpörgés elleni fékezéseket normál üzemben a lapátkerék végzi (Pitch-, vagy Stall-rendszer), de szabályozó fékezések a generátor terhelésével is eszközölhetők. Kizárólag vészhelyzetben történik teljes erejű fékezés, pl. a lapátvég befordítása, vagy a tengely fékezése a tárcsafékkal.



2.34. ábra. Aerodinamikus fék a lapátvégeken és a lapátok oldalán

A széllekek 5–10-szer nagyobbak lehetnek mint az átlagos szélesség. Ilyenkor az állványban és a rögzítő-szerkezetekben fellépő feszültségek sokszorosára növekszenek, mint ami a statikus állapotban fennáll. A későbbiekben bemutatjuk, hogy dinamikai szempontból a háromlapátos konstrukció a leginkább kiegyensúlyozott [26].

A tartószerkezetre a lapátkerék terheléséből fakadóan hajlító, csavaró és vibrációs terhelés hat. A korszerű szárnylapátok általában üvegszállal erősített poliészterből készülnek. A lapátok konstrukciója az előállító cégek számtalan széria és kísérleti megoldásának tapasztalatai alapján módosulnak (2.35., 2.36. ábra). A lapátot mind statikai, mind aerodinamikai terhelésekkel tesztelik a felhasználás előtt [25].

Stall rendszereknél a lapátszöveget az összeszerelésnél az agyhoz történő rögzítő-csavarozással állítják be fix értékre (2.37. ábra).

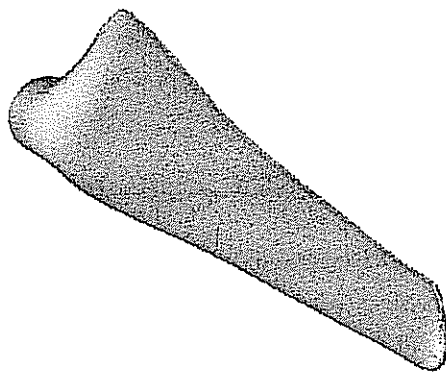
A lapátkerék tömegéből, a gravitációs és a centrifugális erőből, valamint a nyomatókából eredő terhelésekből fakadóan nagy feszültségek indukálódnak a lapát csatlakozásánál. A szélbeállásnál jelentkező hajlító nyomatékok, továbbá az indításnál és fékezésnél fellépő terhelések ugyancsak átmeneti jellegűek, de extrém mértékűek lehetnek.

A lapátkerék agyon fellépő terheléseket a tengely közvetíti az oszlop felé, s kiegyenlítésük az oszlopra hárul. A későbbiekben e terhelésekkel (statikus, dinamikus) részletesebben foglalkozunk, amikor rávilágítunk az egyes szerkezetek önlengésének és a gerjesztő erők frekvenciakülönbségének fontosságára.

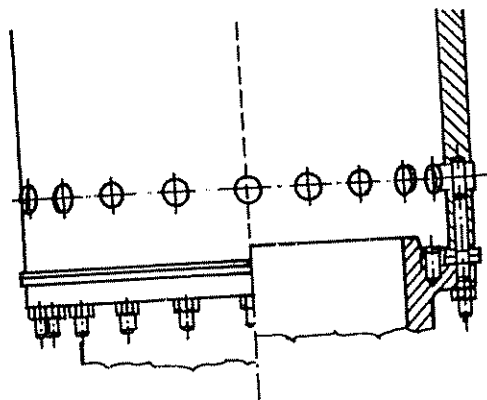
A változó és az összetett terhelés hatására a szárnylapát anyaga kifárad. Az egyes anyagokra vonatkozó kifáradási görbék tájékoztatóul szolgálnak, mégse tudják megközelíteni a valóságban lejátszódó folyamatot. A turbulencia és a szél nyomásának változásai viszonylag „lassan” változtató tényezők. Kísérletek bizonyították, hogy a kifáradást az alacsony frekvenciájú nagy amplitúdójú vibrációk fokozzák. A 2.38. ábrán a külön-



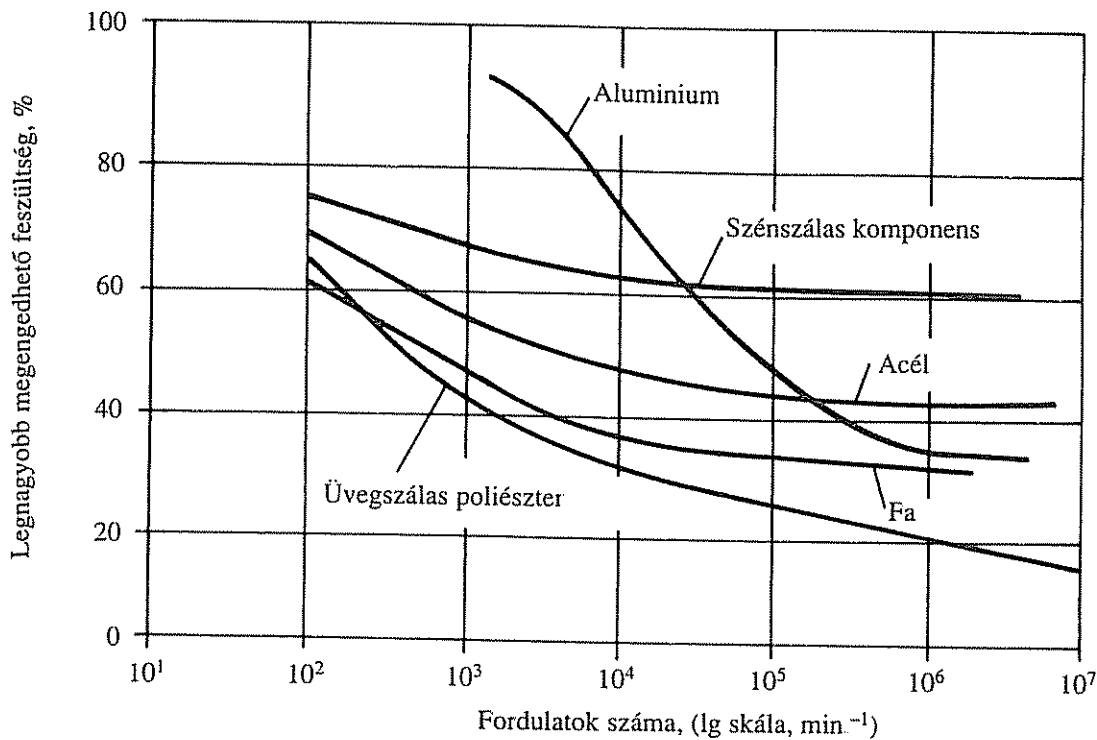
2.35. ábra. Lapátprofilok a sugár (hossz) mentén



2.36. ábra. A lapát háromdimenziós képe (folyamatos vékonyodása a sugár mentén)



2.37. ábra. A lapát felfogó karimájának rögzítése az agyhoz



2.38. ábra. Kifáradási görbék

böző anyagok kifáradási görbéje látható. Az ábrán feltüntetett értékek a gyakorlatban széles határok között változnak, mint ahogy a lapátkerék  $3,0-4,0 \times 10^6$  ford/év fordulatától is lényegesen eltér a tényleges igénybevételek száma.

A fémeket ma már egyre ritkábban használják a lapátok gyártásához, miközben az acélok viszonylag kedvezőek, az alumínium rövidebb használat után veszít kedvező tulajdonságából.

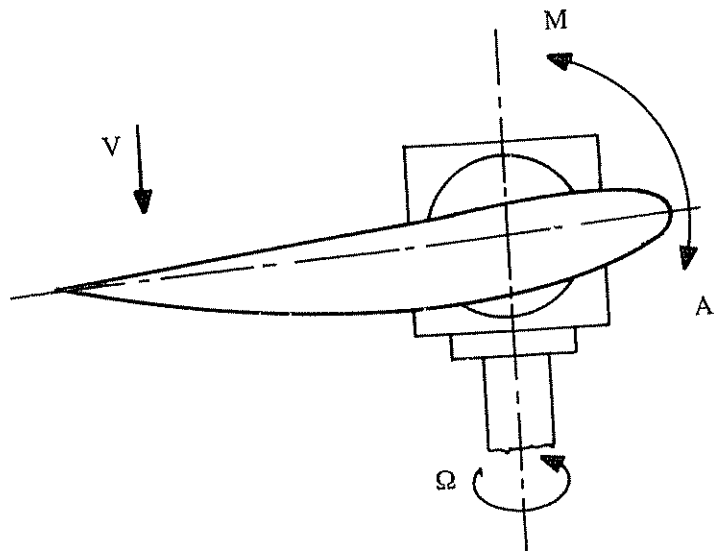
Az üvegszálás poliészter a legelterjedtebben használt lapát anyag, de egyre jobban terjednek a nagyon jó tulajdonságokkal rendelkező a szénszál erősítésű műanyagok.

A lapátok tervezésnél fokozottan kerülni kell a nagyarányú keresztmetszeti átmeneteket (kisebb rádiuszokat) [33.].

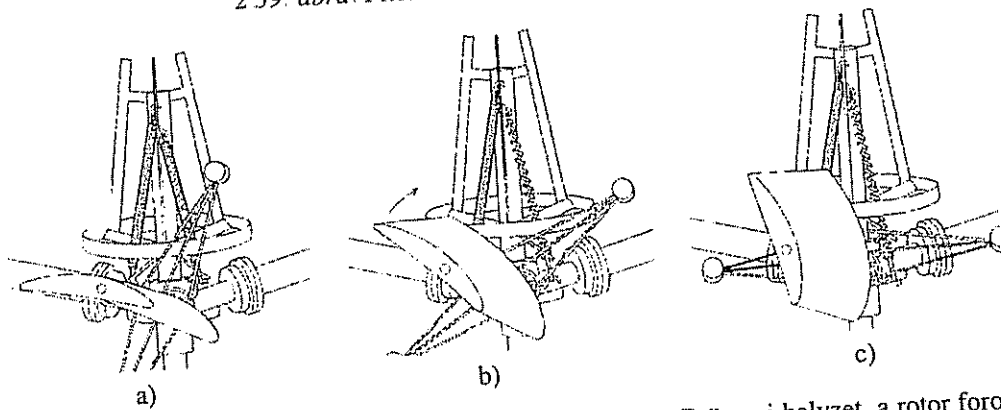
A környezeti hatások közül legjellemzőbbek: a korrodáló savas esők és a por kopató hatása. Az utóbbi a hosszú szárnylapátoknál a lapátvégeken a legvalószínűbb, ahol a sebessége elérheti a 100 m/s-ot is.

### 2.3.2.3. A lapátkerékagy és a Pitch mechanizmus

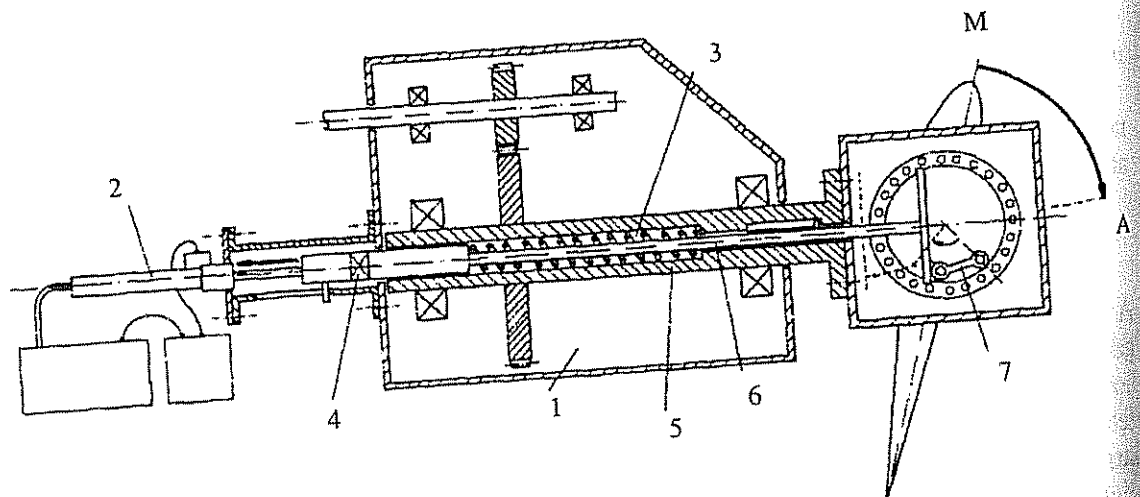
A lapátkerékagy általában acélöntvény, s csavarozott csőkarimával rögzítik a főtengelethez [9.]. A Pitch-rendszerrel a lapátot az elforgatható, csapágyazott csőkarimához rögzítik. A lapát elforgatása történhet hidraulikus és mechanikus úton. Alaphelyzetei: A álló helyzet, amikor a lapát a legnagyobb nyomaték felvételére képes, a szerkezet „várokozik a szélre”, B üzemi helyzet, szabályozási állapot, a lapát a szélesebséghez igazodva az optimális nyomaték felvételére kész, a rotor forog, C viharos szélben a lapát a nem vesz fel nyomatékot, a forgást lefékezi, a lapátkerék megáll (2.397. 2.40. és 2.41. ábrák).



2.39. ábra. Pitch mechanizmus (elvi működés)



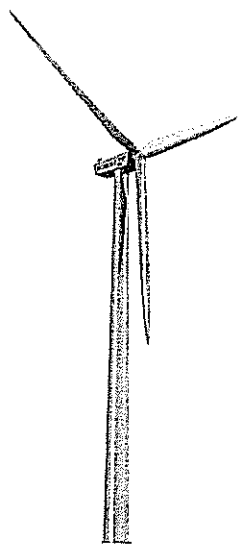
2.40. ábra. Pitch mechanizmus (röpsúlyos) (A álló helyzet, B üzemi helyzet, a rotor forog, C viharos szél)



2.41. ábra. Hidraulikus rendszerű Pitch mechanizmus (1 hajtóműház, 2 hidraulikus munkahenger, 3 nyomórugó, 4 csapágy, 5 rotortengely, 6 összekötő rudazat, 7 lapátforgató rúd, A a lapát álló helyzete, M a lapát üzem közben.)

### 2.3.2.4. A tartószerkezetek

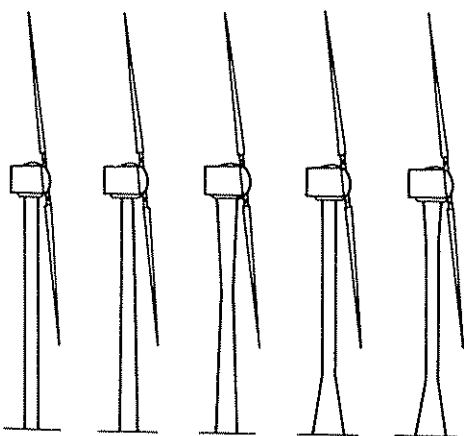
szélmotorok állványzatához (tartóoszlop) a legkülönbözőbb anyagok használhatók (pl. acél, beton stb.). (Példákat a 2.42., 2.43., 2.44. ábrákon láthatunk.)



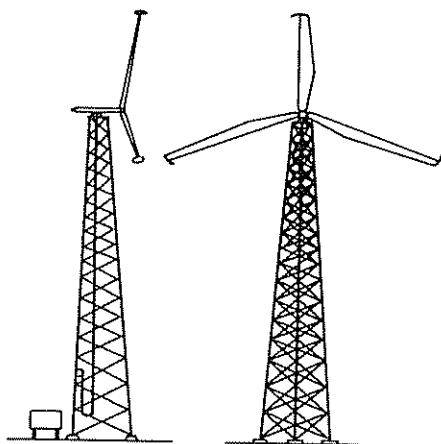
2.42. ábra. Korszerű, formatervezett csőoszlopos háromlapátos szélgenerátor

A szélerőművekhez leggyakrabban a geometriai alakjukat tekintve egyenszilárdságú horganyzott acél rács- és csőszerkezeteket használnak. Az állványzatok kialakításánál alapvető feltétel, hogy önfrekvenciájuk eltérő legyen a forgó lapátkerék okozta vibrációk frekvenciájától (lásd később).

A legelterjedtebb tartószerkezet a 40–100 m magas kúpos kivitelű acéltorony. A tornyon belül létra vezet (több pihenőszinten keresztül) a torony tetején lévő gépházba. A tornyok villámcsapástól és rövidzárlattól is védettek. Villámvédelmi okokból a tornyszerkezeteket a magas létesítményekre vonatkozó előírásoknak megfelelően földelni kell. A szivattyúzós szélmotoroknál a földelő vezetékét a kút vízterével célszerű összekötni, amelynek vezetéke a csőhálózat is lehet.



2.43. ábra. Oszlopos állványszerkezet-kialakítások



2.44. ábra. Rácsos tartószerkezet

### 2.3.2.5. A főtengely és a csapágó

A főtengely ötvöztött acélból kovácsolással készül. A lapátok vezérlőjelének átvezetése miatt középpontjában furat van. A főtengely általában kétsoros golyóscsapágóval felültetve.

A főcsapágó veszi át a szél nyomását, amely a rotoron keresztül kerül a tengelyre. A csapágóház a gondola aljzatlemezére közvetlenül van rögzítve. A csapágó általában 100%-os szintetikus zsírkenésű.



### 2.3.2.6. A nyomatékvtó

A szélerőmű nagy jelentőséggel bíró alkotóeleme, a hagyományos, vagy a speciális többfokozatú homlok – bolygóműves nyomatékvtó. Az első fokozat lassú homlok-kerekes nyomatékvtó. A rotor általában 20–30 fordulatot tesz meg percenként. A nyomatékvtók ezt a fordulatot gyorsítják fel 1000–3000 fordulatra percenként. Emiatt a nagy igénybevétel miatt a nyomatékvtó befecskendezéses olajkenést kap, amely külön olajhűtővel rendelkezik.

A nyomatékvtó gumituskókon keresztül van a gépház aljzatlemezéhez rögzítve, s ezzel a rezgések jelentősen lecsökkennek. Egy hőmérséklet-figyelő végzi az olajhőmérséklet, csapágy és a tengely felügyeletét. Rendkívüli esetben a turbinát üzemen kívül helyezi.

### 2.3.2.7. A tengelykapcsoló

A nyomatékvtó és a generátor között helyezkedik el az univerzális tengelykapcsoló, amely két rugalmas részből áll. A kuplung mérsékli az esetleges remegést, és átadja az energiát a generátornak.

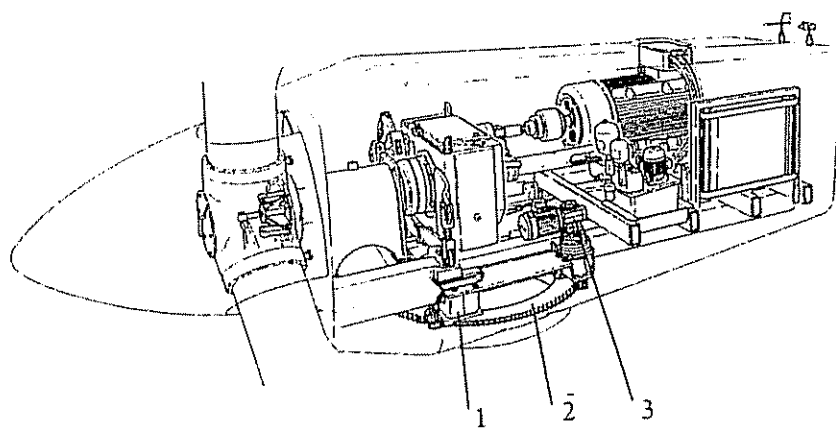
### 2.3.2.8. A generátor

A szélerőműveknél szinkron és aszinkron generátorokat használnak. A szerkezetekről és működésükről a 4. fejezetben részletesen beszámolunk.

A nyomatékvtó nagy igénybevétel miatt egyes gyártók előtérbe helyezik az ún. gyűrűs szinkron generátort, mely nyomatékvtó nélkül közvetlen hajtást kap a rotortól.

### 2.3.2.9. A mechanikus fék

A mechanikus fék a tengelyen, a nyomatékvtó házon van rögzítve. A fék gyakorlatilag kibiztosított hidraulikus fékpofákból áll. A fékrendszer általában kétfokozatú, az egyik a turbina normális leállításakor, a másik a vészleállításakor működik.



2.45. ábra. Szélirányba forgatás 1 vezérlés, 2 fogaskoszorú, 3 meghajtó motor

### 2.3.2.10. A széliránykövető

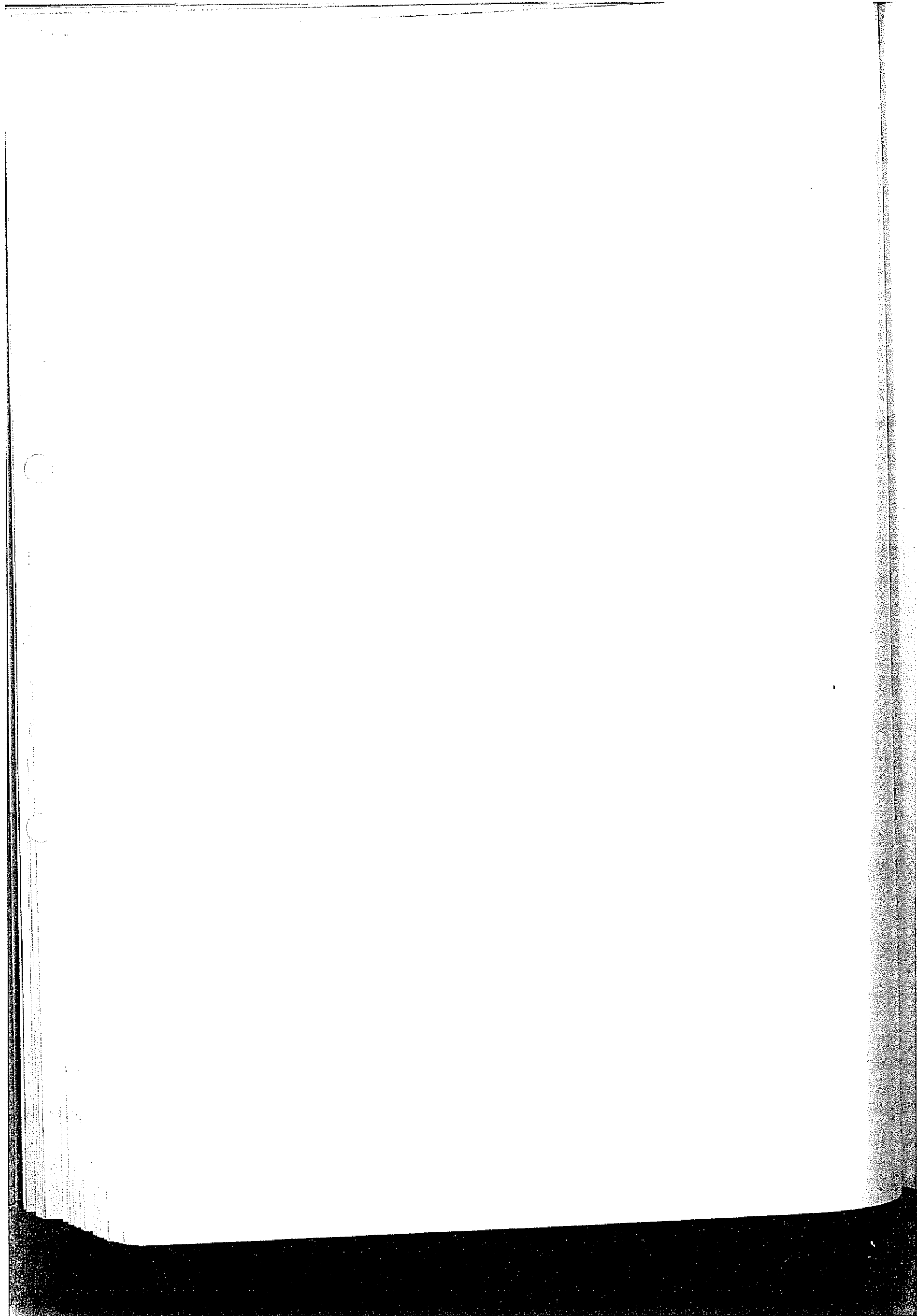
gépházak általában 3 teljes körbefordulásra képesek. Egy passzív fékberendezés a fék a váratlanul az esetleges túlfordulás ellen. Ha a fék üzembe lép, akkor leáll a turbina, és a motor automatikusan visszafordítja a gépházat. (2.45. ábra)

### 2.3.2.11. A vezérlés

A szélenergia-vezérlésének alapja az erre a célra fejlesztett ipari mikroprocesszor. A rendszer öndiagnosztizáló. A vezérlés beállításai billentyűzet és monitor segítségével történik. A távvezérlés, és távolsági felügyelet könnyen és egyszerűen megvalósítható telefonos vagy GSM hálózat igénybevételevel.

### 2.3.2.12. Az üzemi és biztonsági rendszer

A szélenergia-vezérlés automatikusan üzemel mindenfajta szélviszony mellett. Ha a szélesség eléri a 2,5–3 m/s értéket a szélenergia-turbina automatikusan bekapcsol. A lapátkerék körbefordulásával a nyomatékváltón keresztül bekapcsol a generátor. kétgenerátoros kiviteleknel a kis generátor fokozat 5–7 m/s-os szélességig működik. Magasabb szélességnél a generátor fő teljesítményre aktiválódik egészen 5–25 m/s-os szélességig. Ekkor lép működésbe a teljesítmény szabályozás. ami történhet a lapátvégekkel, ill. a lapátok aerodinamikai fékhatásával (Stall), vagy lapát teljes elfordításával (Pitch). A tengelyfékkel rögzítik a már leállt szélenergia-turbinát. Amennyiben a szélesség értéke a megengedett határ fölé kerül, úgy a turbina automatikusan újra bekapcsol.



## 3. A SZÉL ENERGETIKAI CÉLÚ JELLEMZÉSE

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

### 3.1. A szél jellemzői

#### 3.1.1. A szélerő

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

A Föld azon részein, ahol a légtömegek leszálló ágban vannak, nagy légnyomású területek alakulnak ki, ahol emelkednek, ott alacsony légnyomásúak jönnek létre. Ez a nyomásemelkedés irányítja a légtömegek áramlását a magasabb légnyomású területekről a kisebb légnyomásúak felé. Ez a szél keletkezésének oka. A szélre hatással van a Föld forgásából eredő Coriolis-erő, amely a forgó viszonyítási rendszerben a horizontálisan mozgó légtömegekre hat, ezért a kialakuló szél keleti vagy nyugati irányba fordul. A geosztrofikus szél – egyfajta egyensúlya a nyomásból származó erőnek és a Coriolis-erőnek –, amely párhuzamos az egyenlő légnyomású pontokat összekötő vonalakkal. A nyomáskülönbség mentén létrejövő légáramlás a szél. A szél hajtóereje a nyomáskülönbség. Ez azonban egy idealizált eset, mely csak a magas ill. alacsony légnyomású helyek jelenlétének figyelembevételéből adódik [1.].

A szélre még a felszínhez való súrlódó erő is hat. A felszín közelében a szél lelassul.

#### 3.1.2. A globális széljárás

Az előzőekben leírt áramlás leginkább egy sima gömbfelület felett alakulhatna ki. A Föld felszíne óceánokkal és szárazföldekkel tagolt, s ezek az eltérő felszínek különbözőképpen befolyásolják az áramlást, pl. a

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

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

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

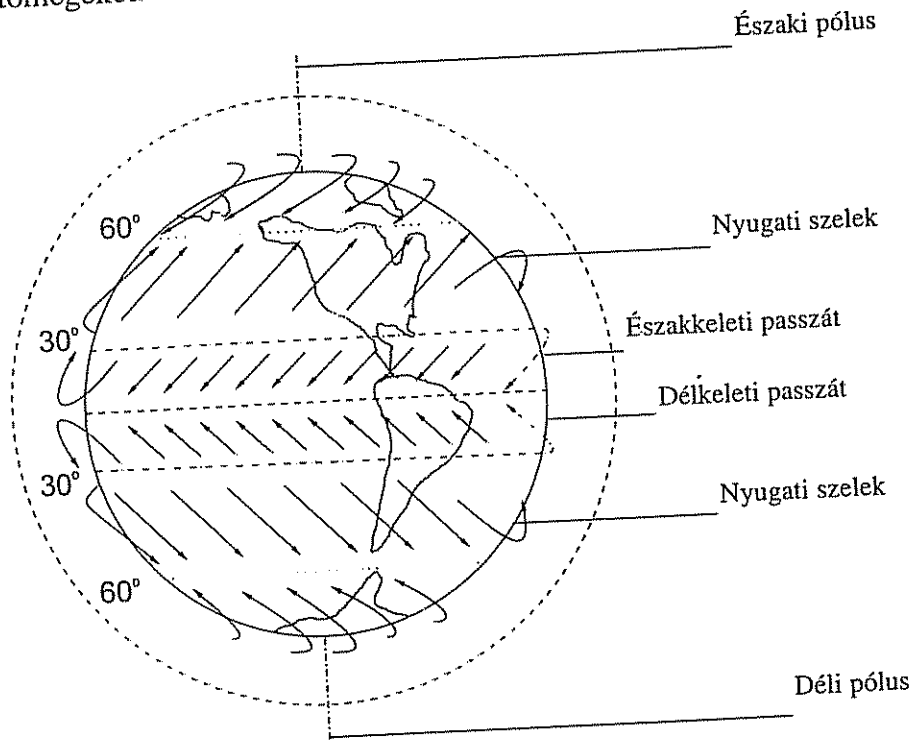
A légáramlást az egyenlítő és a trópusok között, az ún. Hadley-cirkuláció irányítja. A légtömeg az egyenlítőtől száll felfelé: a lehűlt levegő kb. a 30-as szélességi foknál ereszkedik le. A felszíni szél aztán visszatér az egyenlítőhöz keleti irányból. Ezt hívjuk passzátszélnek, mely egész évben megfigyelhető (3.1. ábra).

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

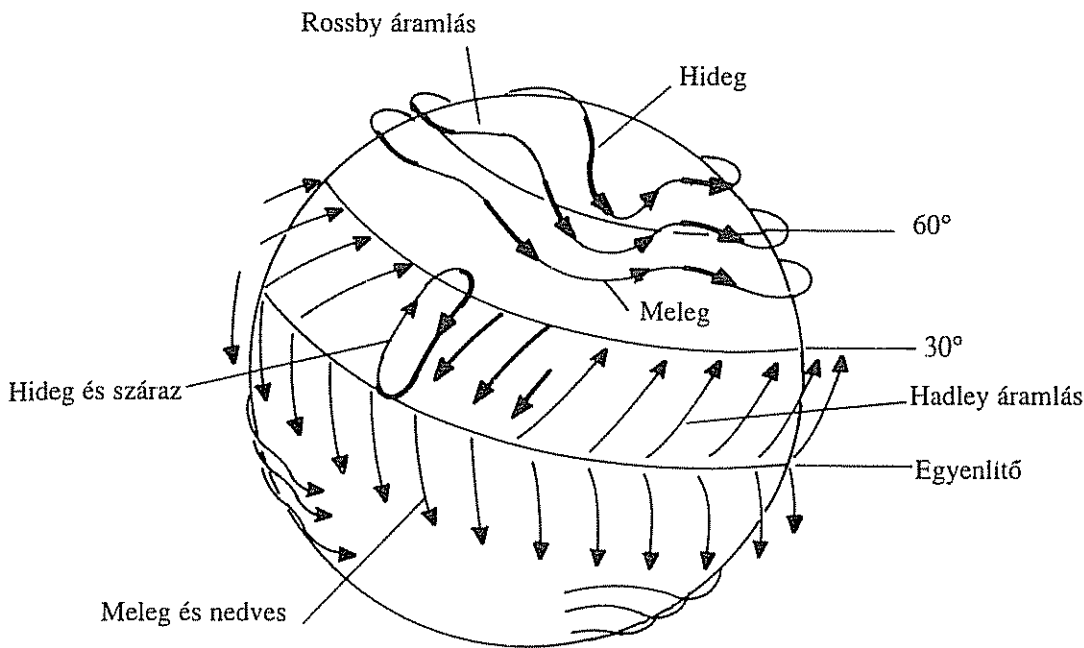
Az ázsiai kontinens és az óceán hőmérsékletének változása szezonális szelet eredményez, ez a monszun. Nyáron a kontinens erősen felmelegszik, alacsony légnyomású terület jön létre és hűvös párás levegő áramlik az Indiai-óceán felől a szárazföld belseje felé. Télen a kontinens lehűl, és nagy légnyomás alakul ki. A szél ekkor a szárazföld felől fúj az óceán felé [74.].

A közepes szélességi fokoknál megfigyelhető áramlásokat az atmoszférában az ún. Rossby-hullámok irányítják, összekeverik a sarkok közeléből származó hideg levegőt a trópusi, melegebb levegővel. A légáramlás ezen a területen jellemzően nyugati, de a keveredések a szélesség nagy változékonyságához vezet, s frontok képződnek (3.2. ábra).

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



3.1. ábra. Széljárások a Földön



3 2. ábra Globális légmozgások

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

### 3.1.3. A szél struktúrája

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

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

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

*Labilis* egyensúly esetén a hőmérséklet-gradiens nagyobb, mint az adiabatikus gradiens, s így a konvekció által előidézett és a mechanikus turbulencia egyaránt kialakul.

6 m/s-nál kisebb szélesebességeknél – szorosan a talaj fölött – a turbulenciát főként konvekció okozza. Nagyobb szélesebességeknél az akadályok okozta mechanikus turbulencia játszik nagyobb szerepet. A nagyobb légtömeg az akadályokon mind kisebb energia- és impulzus-értékűekre oszlanak, s egy bizonyos ideig, tér egyes pontjain szélesebesség- és szélirányváltozások formájában megtartják tulajdonságaikat.



### 3.1.4. A földi határréteg

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

A felszíni sűrűlódás fékezőerőt fejt ki az áramló légtömegre, melynek sebessége gyakorlatilag nulla a talajszinten. Lefelé ható nyomatókok és nyíróerők ébrednek a szél szabad áramlási rétegéig. A szabad áramlás a geosztrofikus, vagy a határréteg feletti szél. A nyíróerők által uralt határréteget hívják semleges, vagy semlegesesen könnyű határrétegnek. A szélsébség növekedése a magasság függvényében igen fontos az energianyeres szempontjából. Ez a felismerés vezetett el a magas építésű szélgenerátorok építéséhez.

A határréteg alsó 100 métere az ún. felszíni réteg. Itt a földfelszín által okozott sűrűlódás a legjelentősebb hatás. Ezzel szemben a magasság függvényében a Föld forgásának hatására ébredő Coriolis-erő változása elhanyagolható. Ez az áramlatok egyszerűbb áttekintését teszi lehetővé, és mivel a berendezések ebben a rétegben található, az energiatartalom számításánál jelentős könnyebbítés. A felszíni szél a nyomásból, a Coriolisi-, és a sűrűlódási erő egyensúlyából keletkezik, iránya az alacsonyabb légnyomás felé mutat.

### 3.1.5. A szél változásai

A szél sebessége folyamatosan változik, ami jól érzékelhető bármely anemométeres szélsébség mérés során. Ha a hosszú távú szélsébség-mérési eredményeket, mint idősorokat átalakítjuk gyakorisági függvénné, akkor egyfajta energiaspektrumot kapunk, vagyis megismerhetjük, hogy mely szélsébségek tartalmazzák a legtöbb energiát. Ez alapján megbecsülhetjük a kinyerhető energia mértékét is. A mérsékelt égövet két kiemelkedő érték jellemzi. Az egyiket a nagy időjárási rendszerek elhaladása, a másikat pedig ezen áramlatokban lévő turbulencia okozza [74.].

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

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

$$v(t) = v + v'(t), \text{ m/s.}$$

(3.1)

Az átlagos szélsébség, leírja a turbina számára elérhető energiamennyiséget. A változó komponensnek (turbulenciának) is van hatása az energiatermelésre, de nem közvetlen módon, mivel a lapátkerekek nem képesek rögtön reagálni a szél

sebességének vagy irányának megváltozására. Ezek a változások jól megérthetők, ha a szél struktúráját úgy képzeljük el, mint különféle méretű, háromdimenziós örvények sorozatát a fő áramlás mentén. Amint egy örvény elhalad a mérési pontnál, a szélmérő felveszi annak a sebességét az örvény méretével arányos időtartamra. Ezek gyakorlatilag a széllökések.

A legtöbb esetben ezek nem okoznak extra terhelést a szerkezeteken, de ha az örvény mérete megegyezik a turbina méretével, akkor hatása kiterjedhet az egész berendezésre. Három másodperces széllökés megfelel a 20 m, 15 másodperces, pedig az 50 m átmérőjű örvénynek. Az ilyen széllökéseket kiváltó örvények mérete megegyezhet a szárnylapátok méretével. Ezért a méretezés során számításba kell venni – a turbina élettartama miatt is – a várható legnagyobb széllökésből származó terheléseket is. Az adott területen a legnagyobb értéket mindig az utolsó 50 évben mért legnagyobb szélesebesség jelenti [24.].

A széljárás megváltozik, amint az időjárási front áthalad. A szélnek ez a változékonysága azt okozza, hogy az elektromos áram termelése is folyton változni fog. A mérési hely szélstatistikája leírja ezeket a változásokat. A szél állandóságának hiánya adott helyen érv lehet a szélturbinák telepítése ellen. Ha pontosan előre adott időpontra és területre nem is lehet jelezni a várható szélesebességet, de statisztikai módszerekkel jól becsülhető annak átlaga és maximális értéke. Így az elektromos hálózatra történő táplálás aránya is megmondható a turbina kapacitásának és terhelési tényezőjének függvényében. Ilyen megfontolások alapján a szélenergia hasznosítását „iparszerűnek”, előre tervezhetőnek tekinthetjük [22.].

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

### 3.1.6. A szél időbeni változásának jellemzői

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

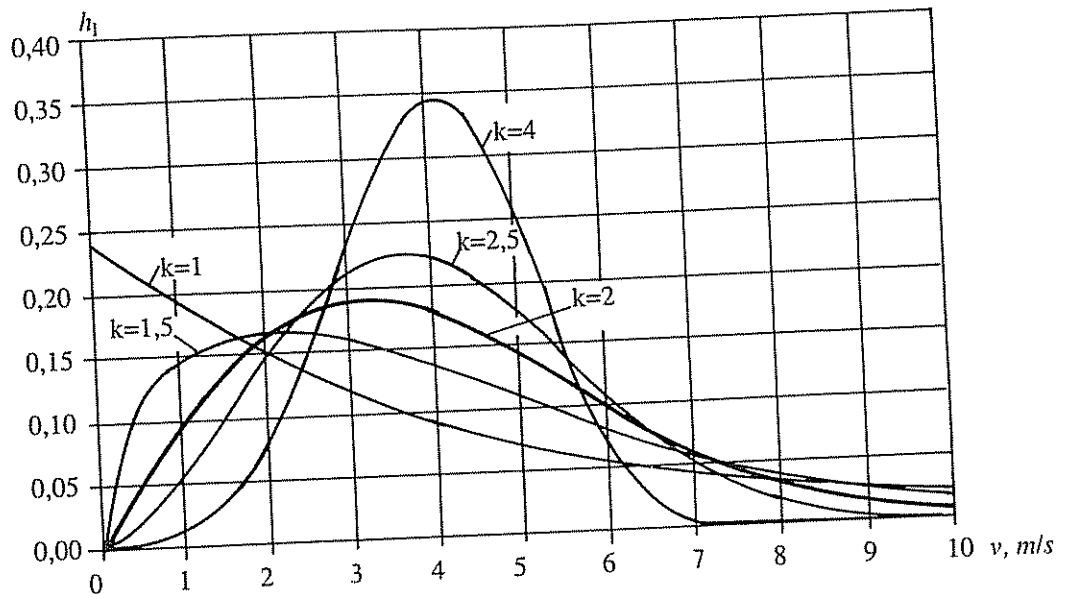
Az éves átlagos szélesebesség elfedi a rövidebb ideig tartó változásokat. Mivel a ki nyerhető energia a szélesebesség köbével arányos, az elhanyagolása komoly kihatással lehet az éves energiapotenciál becslésére. E probléma csak a szélesebességek várható éves eloszlásának leírásával hidalható át. Ezért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

Mivel a mintavétel hosszának jelentős szerepe van a statisztikai eredményekre, ezért nagy körültekintéssel kell eljárni. Számos statisztikai eloszlásfüggvényt kipróbáltak a szélesebességek leírásához. A kétparaméteres Weibull-eloszlás bizonyult a leginkább alkalmasnak azért, hogy az adatsorokhoz megfelelő pontossággal illeszkedik:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad \% \quad (3.2)$$

ahol:  $v$  a szélesség (m/s);  $c$  a méret tényező (m/s);  $k$  az alaktényező.

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



3.3 ábra. A Weibull-tényező eloszlása 4 m/s-os átlagos szélesség esetén. A két Weibull-paraméter,  $k$  és  $c$ , a mérési eredményekből származtatható. Gyakori eset, hogy a Weibull-görbe jól illeszkedik az adatok többségéhez, néhányhoz kevésbé. Ha ezek a kis szélesség-tartományba esnek, vagyis a bekapcsolási sebesség alá, akkor eltekinthetünk a figyelembevételétől, és nem lesz különösebb hatása a becslésben.

A szélesség-gyakoriságok matematikai leírása lehetővé teszi a generátorok teljesítménygörbéivel való összevetést. Így megkapható a turbina éves energiahozama, valamint lehetséges olyan turbina kiválasztása, be- ill. kikapcsolási szélességének figyelembevételével, amely lehetővé teszi a legnagyobb termelékenységet.

### 3.1.7. A szélváltozás a magasság függvényében

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

$$v = \frac{v_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z+D}{z_0}\right), \quad \text{m/s.} \quad (3.3)$$

Ahol:  $z$  az adott magasság;  
 $v$  adott magasságban a sebesség m/s;  
 $v^*$  a súrlódási sebesség m/s;  
 $\kappa$  a Kármán-állandó;  
 $z_0$  a felszíni egyenetlenség mértéke;  
 $D$  a helyettesítő magasság; mely azt a magasságot jelöli, melyen az áramlás már akadálytalan m.

A Kármán-állandó értéke általában 0,4. A felszíni egyenetlenség mértéke,  $z_0$ , a területen található növényzettel van kapcsolatban, erre vonatkozóan több forrásból léteznek táblázatok.

3.1. táblázat. Egyenetlenségi osztályok

Egyenetlenségi osztály ( $z_0$ tartomány)	$z_0$ , m	Terület jellege
3 (0,40–0,26)	1,00	Város, erdő
	0,50	Külváros
	0,30	Fasor, erdősáv
2 (0,13–0,07)	0,20	Cserjék, bozótos
	0,10	Körülzárt mezőgazdasági terület
1 (0,05–0,02)	0,05	Nyílt mezőgazdasági terület
	0,03	Mezőgazdasági terület kevés építménnyel, fával; Repülőtér épületekkel, fákkal
0 (0,0003–0,00015)	0,01	Kifutópálya, nyírt füves terület
	0,005	Simított földfelszín
	0,001	Sima havas felület
	0,0003	Sima homokos felület
	0,0001	Nyílt vízfelszín

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

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

$$\frac{v}{v_R} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)} \quad (3.4.)$$

ahol:  $v$  a referencia szélesebbé, m/s; a  $z_0$  magasságon, m;  $v_R$  a szélesebbé, m/s, a  $z_R$  magasságon, m.

A referenciamagasság a meteorológiai méréseknél általában 10 m, mivel a legtöbb átlagos szélesebbé érték erről a magasságról származik.

Mérnökök inkább hatványkitevős képletet használnák, a könnyebb kiértékelhetősége miatt:

$$\frac{v}{v_R} = \left( \frac{z \pm D}{z_R} \right)^\alpha \quad (3.5.)$$

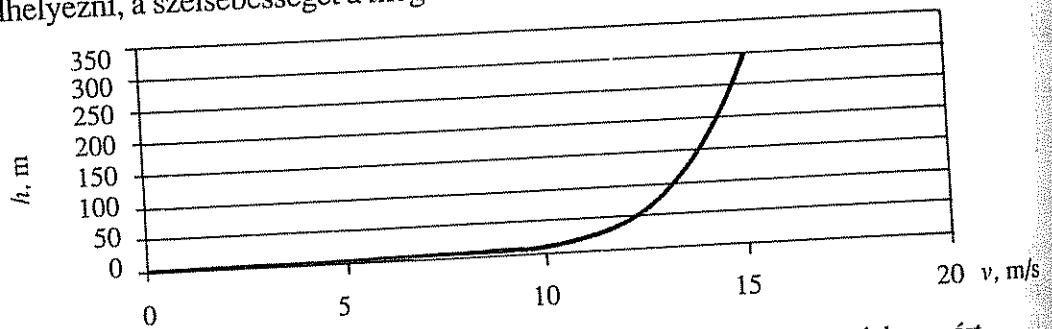
Az  $\alpha$  kitevő értéke jellemzően 0,1 és 0,5 között változik, a táj felszínének jellegétől függően. A kitevő értéke az egyenetlenségek mértéke alapján kiszámítható.

$$\alpha = \frac{\ln \left( \frac{(z/z_0)}{(z_R/z_0)} \right)}{\ln \left( \frac{z}{z_R} \right)} \approx \frac{1}{\ln \sqrt{\frac{z \cdot z_R}{z_0}}}, \quad (3.6.)$$

ahol  $z$  a mérési magasság,  $z_R$  a referencia magasság,  $z_0$  a felszíni egyenetlenség mértéke.

Az  $\alpha$  kitevő értéke ezen kívül változik még a mérési magasság változásával is.

A szélgenerátorokkal energiatermelés céljából 30–40 m fölé kell, de legfeljebb 100–200 m talajszint fölötti magasságig tudunk hatolni, így csak ezen magasság érdekel bennünket. Ha a mérőberendezést csak 10–20 m-es talajszint feletti magasságokban tudjuk elhelyezni, a szélesebbéget a megfelelő magasságra át kell számítani (3.4. ábra).



3.4 ábra. DAVENPORT szerinti szélesebbégetprofil sík terepen 10 m-es magasságban mért 10 m/s átlagsebességnél

A földfelszín feletti magassággal növekszik a szélesebbéget. A növekedés a terepalakulattól (a talaj egyenetlenségétől), a gradiens-szélesebbégettől és a függőleges hőmérsékletprofiltól (az atmoszféra egyensúlyi állapotától) függ.

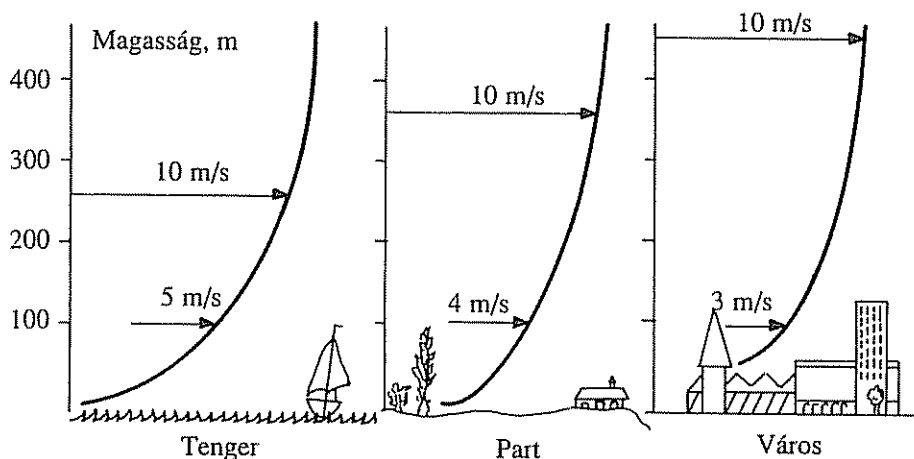
A légkör termikus rétegződése kihat a gyenge szél profiljának a függőlegességére. Erős szél esetén (6 m/s felett), 10 m feletti magasságban ez a hatás elenyészően kicsi, ha erős mechanikus turbulencia lép fel (viharak, zivatarok vagy frontok alkalmával kivételek is előfordulhatnak, ha alul igen meleg levegő áramlik). A gradiens-sebességnek itt annyiban van hatása, hogy az erős szél magassággal kapcsolatos sebességnövekedése kisebb, mint a gyenge szélé. Erős szél esetén a terep egyenetlensége a döntő. A szél magasságtól való függése exponenciálisan fejezhető ki:

$$\frac{v}{v_g} = \left( \frac{h}{h_g} \right)^\alpha, \text{ m/s}, \quad (3.7)$$

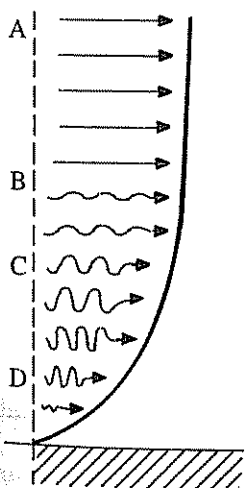
ahol:  $h$  magasság, m;  $h_g$  határmagasság;  $v$   $h$  magasságban mérhető sebesség;  $v_g$  gradiens szél sebessége a határmagasságban;  $\alpha$  a terep egyenetlenségétől (érdességétől), a szélességtől függő tényező.

A terep egyenetlenségét, az a értékét a beépítés sűrűsége, a meglevő építmények nagysága, valamint a fa-, ill. bokorállomány határozza meg. Az egyenetlenség nem az egyes akadályok hatásából, hanem számos akadály összegződött hatásából származik. DAVENPORT vizsgálta ezt, szerinte az a kitevő értéke a földfelszín minőségétől függően a következőképpen alakul (3.5. ábra).

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



3.5. ábra A felszíni egyenetlenségek befolyásoló hatása



A felszíni réteg, ill. a talajhoz közeli áramlás pontos ismerete nélkül igen körültekintően kell használni ezt a kifejezést. Mind a kétféle kifejezés csak egyszerűsített módja az igazi szélprofil leírásának. Az érvényességi körük sima, egyenletes területekre terjed ki. Ez azt jelenti, hogy nem foglalják magukba a domborzat hatását, zavaró objektumokat, vagy a felszíni egyenetlenségek változását. A nem homogén területekre ezeknek a törvényeknek módosított változatai használhatók fel, ezekhez táblázatok és grafikonok állnak rendelkezésre (3.6. ábra).

3.6. ábra. Turbulencia a magasság függvényében. A geosztrofikus, B Hardy-féle turbulencia, C határréteg szerinti turbulencia a talaj közelében; D talaj közeli nagy turbulencia



### 3.1.8. Atmoszferikus turbulencia

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

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

A turbulencia erősségének mértékét a következő összefüggés adja:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0 - T/2}^{t_0 + T/2} [v(t) \pm v_a]^2 dt, \quad (3.8)$$

Ahol:  $v(t)$  a pillanatnyi szélsébség,  $v_a$  az átlagos szélsébség,  $T$  a vizsgált idő-tartam.

A szél viharossága a turbulencia fokával mérhető.

$$I_v = \frac{\sigma_v}{v_a}. \quad (3.9)$$

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

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

A szélturbinák tervezése során szintén figyelembe kell venni a gyorsan forgó rotornál kialakuló turbulencia hatását is. Különösen azért, mert az áramlás képe megváltozik, miközben áthalad a szárnylapátok között.

### 3.1.9. A földfelszíni változások hatása

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

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

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

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

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

A tájkép jellege még hatással lehet a felszín hőmérsékletére, nedvesség tartalmára, melyek szintén befolyásolhatják a szélprofil alakulását. Ez különösen jellemző nagy, nyílt vízfelszín – szárazföld, ill. jég – szárazföld átmenetekenél. Ezeknek a hatása megváltoztatja a profil stabilitását, a függőleges légmozgások szerepe megnőhet.

### 3.1.10. Változások az atmoszferikus stabilitásban

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

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

A logaritmusos szélprofil az alsó 100 m-ben továbbra is alkalmazható, megfelelő kiegészítésekkel:

$$v(z) = \frac{v_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \pm \Psi\left(\frac{z}{L}\right) \right], \text{ m/s}, \quad (3.10.)$$

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

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

$$L_{MO} = \frac{T_0 c_p v_*^3}{g \cdot k H_0}, \text{ m,} \quad (3.11.)$$

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

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

$$\Psi(z/L) = \left(1 \pm 16 \frac{z}{L}\right)^{1/4} \pm 1 \text{ instabil helyzetre,} \quad (3.12.)$$

$$\Psi(z/L) = \pm 4,7 \frac{z}{L} \text{ stabil helyzetre.} \quad (3.13.)$$

### 3.1.11. Akadályok az áramlás útjában

A **dombok és hegyek** akadályokat jelentenek a légtömegek áramlása számára. A levegő felettük, vagy azokat megkerülve halad tovább. Ezek mérete és formája jelentős hatással van a kialakuló áramlási képre.

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

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

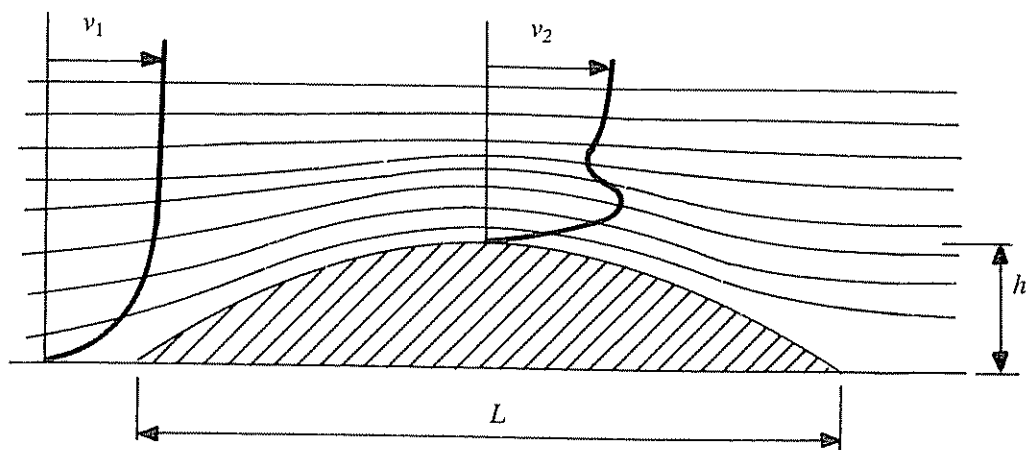
$$\Delta S = \frac{\Delta v}{v} = \frac{h}{L} \frac{\ln^2(L/z_0)}{\ln^2(l/z_0)}, \quad (3.14.)$$

ahol:  $Dv/v$  a szélsébség-változás aránya az eredeti szélsébséghez képest, adott magasságon.

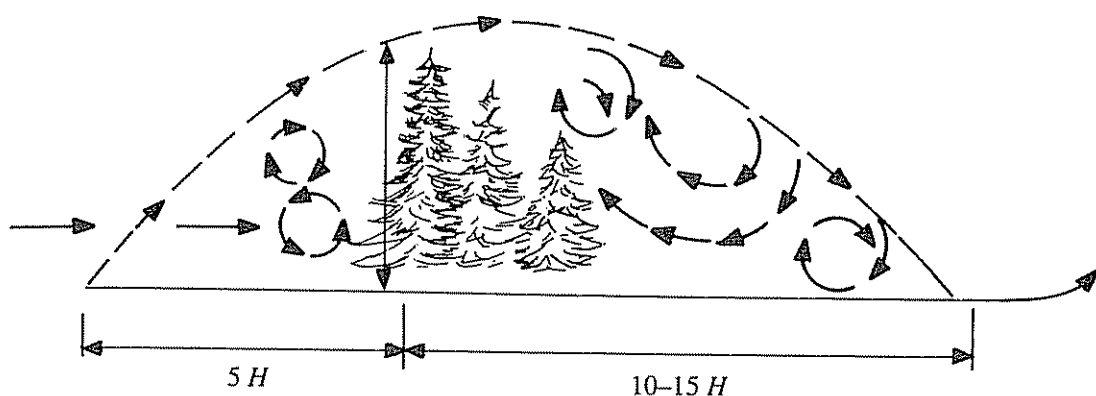
Az  $l$  sűrűség  $0,1 L$  nagyságrendű. A gyakorlatban ennek a gyorsítási tényezőnek az értéke  $2h/L$  nagyságrendű. Ekkor feltételezzük, hogy az egyenetlenség mértéke dombon is ugyanakkora, mint környezetében. Amennyiben a szél egyenetlen terület felől érkezik egy sima dombra, két tényező is, melyek hatása közelítően összeadható a légsébség növekedését okozza. Az ilyen területek ideálisak a szélenergia kinyerésére (3.7. ábra)

Magas fasoroknál (3.8. ábra) turbulencia lép fel (különösen a mérőállomások telepítésénél fontos).

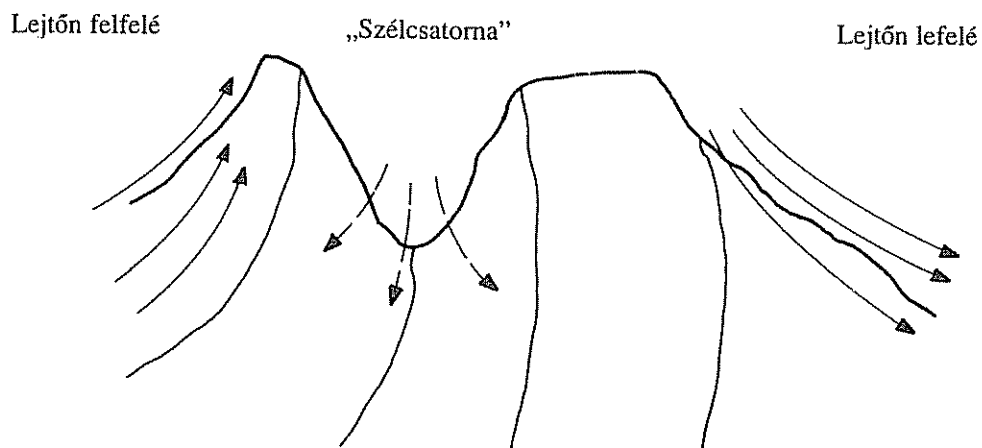
Az ideális dombok igen ritkák, a területek ennél sokkal összetettebb képet mutatnak. Számos nagy szélsébségű terület van hegyvidékeken, ahol a hegyek, gerinc-



3.7. ábra. Lankás és egyenletes felszínű domb felett a szél besűrűsödik



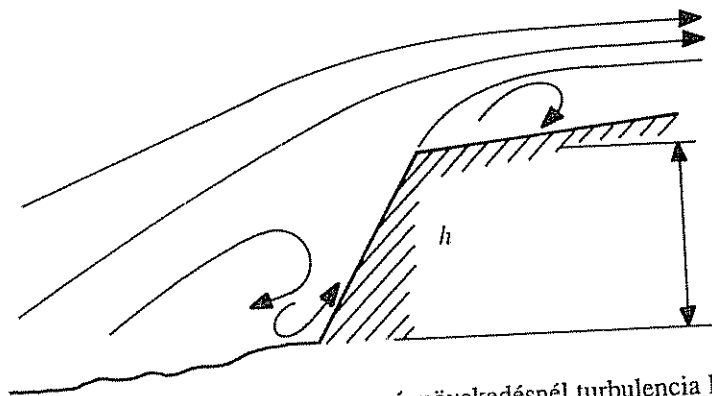
3.8. ábra. Turbulencia kialakulása



3.9. ábra. Meredek dombokon kialakuló légmozgások

cek felgyorsítják a légáramlást. De az ilyen területeken figyelembe kell venni azt a tényt is, hogy a turbulencia általában nagyobb méretű. Ráadásul a hegyoldalak növényzete gyakran egyenletlenebb, és a gyorsítóhatást ellensúlyozza ennek lassító hatása (3.9. ábra).

A meredek dombok, melyek lejtőszöge 30 foknál nagyobb, függőleges falként viselkednek, és az áramlás leválását eredményezik a belépő élnél, vagy a dombtetőn, a domb formájától függően. A dombok formája így nem kívánt hatásokat is okozhat a nagyobb turbulencia és az áramlás leválása miatt. Ez esetenként igen kis szélsőségeket jelent a leválási buborék közelében. Mivel a dombok ritkán szimmetrikusak, ezért néhány igen jó áramlási képet hoz létre az egyik irányból, de más irányokból rosszat (3.10. ábra).



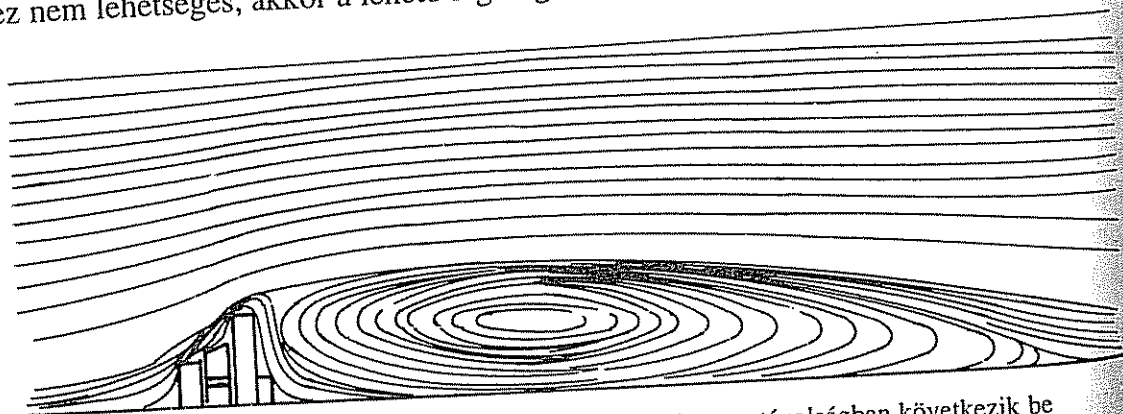
3.10. ábra. Hirtelen magasságnövekedésnél turbulencia lép fel

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

**Épületek és egyéb akadályok** (pl. nagy fasorok) a turbina közelében jelentősen megzavarhatják az áramlás képét. Akadályozzák az áramlást, és turbulenciát okoznak. A nagyobb akadályok hatása az áramlásra a magasságának legalább tízszeresén érződik hosszanti irányban, felfelé pedig a kétszeresén (3.11. ábra).

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

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



3.11. ábra Akadályok mögött a kiegyenlítődécs csak nagy távolságban következik be

### 3.1.12. Helyi hőmérséklet-ingadozások

A talaj borítása miatti felszínnek közötti hőmérsékletkülönbség, ill. a napsütés felszínre gyakorolt eltérő hatása helyi szelek kialakulásához vezethet.

A **tengeri szelek** a szárazföld és a víztömeg hőmérséklet-különbségének hatására jönnek létre, hiszen a tenger általában nyáron hűvösebb, télen melegebb, mint a szomszédos szárazföld. Ez vezet a parti légáramlatokhoz, nyári nappalokon a tenger felől, esténként és télen a tenger felé. Ezeknek a szeleknek jelentős sebességük lehet, akár 5–8 m/s 10 m magasságban a tenger szintje felett. Több kilométeres mélységbe képesek behatolni a szárazföld belseje felé. Tengeri szelet a parttól 50 km-es távolságban is lehet tapasztalni Angliában, vagy akár Ausztráliában is (SIMPSON 1994).

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

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

**Hegyi szelek** alakulnak ki amint egy völgy oldala felmelegszik a nap folyamán, a légtömegek elindulnak a lejtőkön felfelé, ezt nevezzük felszálló szélnek. A felszín közelében a sebességük alacsony, 3 m/s körüli, energiatermeléshez nem megfelelőek. De a felszálló szél által okozott turbulencia fontos tényező a gerinceken lévő szélturbinák elhelyezése szempontjából (3.9. ábra).

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

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

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

## 3.2. A szélgenerátorok telepítési helyének meghatározása

A kontinentális széljárás lényegesen változékonyabb mind az irányát, mind az erősségét tekintve. Ebből következik, hogy az ilyen területeken felállítandó szélgenerátorok tervezése nagyobb körültekintést igényel.

A telepítés fő kérdés már nem is annyira a konkrét konstrukcióra vonatkozik, hanem a telepítés optimális helyének meghatározására. Ezt felismerve kezdték meg a területi felméréseket a széljárásokra (havonkénti átlagos szélesebességekre és szélirányokra) vonatkozóan.



### 3.2.1. A potenciális szélturbina telephely-kiválasztásának fő szempontjai

Szélturbina szinte bármely kellően nyitott területen elhelyezhető, de a turbinák teljesítménye több meteorológiai tényezővel is összefüggésben van. Ilyen hatások pl.:

- gyakori leállás különösen nagy szélsőségek miatt,
- homokszemcsék koptató hatása, ill. behatolása,
- extra lapáttérhelés a jegesedés miatt,
- vízbehatolás nagy esőzések alkalmával,
- villámcsapás.

A szélturbinák felállítását, javítását és üzemeltetését is megnehezíthetik a rossz időjárási körülmények és a telephelyek megközelíthetősége. A berendezések elérhetősége kiemelkedően fontos az éves energiatermelés szempontjából. A fent említett hatások a berendezés javításáig tartó leállását eredményezhetik.

A villámcsapás tönkretelheti a rotort, és akár több hónapos állásidőt okozhat. A magas páratartalom, vagy a víz bejutása korróziót okoz, az elektromos berendezésekben is károsíthatja, és a rendszer megbízhatóságát csökkenti. A lerakódó jég által okozott extraterhelés töréshez vezethet, ha a turbina még jeges állapotban kezd üzemelni. Az anemométerek lefagyása vagy sérülései a turbinák működésének ellenőrzésében okozhatnak zavarokat.

A szélfarmok üzleti vállalkozások, a termelékenységet a hozama szempontjából optimalizálni kell a farm üzemeltetési idejére vonatkozóan. Mivel a szélben rejlő energia köbösen növekszik a szélsőséggel, a lehető legnagyobb átlagos szélsőséggű helyek kiválasztása döntő fontosságú a vállalkozás jövedelmezősége szempontjából.

A szélturbinák telepítési helyének kiválasztására szolgáló módszereket HESTER és PENNELL (1981) részletesen leírja, de néhány fontos szempontot a kontinentális területekre itt is megemlítünk:

- Dombtetők és gerincek általában szelesek.
- A körülmények kedvező alakulása esetén völgyben és hágóban igen erős lokális szelek lehetnek.
- A körülzárt völgyekben és medencékben kisebbek a szélsőségek.
- A fennsíkok általában szelesek.

*Térképek, és esetleg a megfelelő helyismeret elegendő a remélhetően megfelelő széljárású helyek kiválasztására.* Ezen helyek felkeresése során számos fontos adatot szerezhetünk az uralkodó szél irányáról, és erősségéről pl. a fák deformációja alapján.

Az átlagos szélsőségek izovent térképeken kerültek ábrázolásra, melyeken az azonos, éves átlagos szélsőséggű pontok görbékkel kötik össze. Ezeknek az adatoknak a használata kizárólag csak durva becslésekhez ajánlható, nagyobb területekre vonatkozóan. Ha a helyi domborzat hatását nem vették figyelembe, akkor komoly hibaforrás lehet ilyen adatsor felhasználása az átlagok számításánál. A nem megfelelő magasságban végzett mérések a szélerőforrás komoly alulbecsléséhez vezethetnek. A szélatlazok adatai csak egyes területekre érvényesek, s annál inkább felhasználhatóak, minél jobban figyelembe vették a felszín változásait is.

Számos országban alakítottak olyan szervezeteket, amelyek feladata a helyi szélenergia-potenciál, és az adott régióban a legalkalmasabb szélgenerátor telep-

helyek felmérése volt. Az ilyen felmérések végzésére többnyire számítógépes modelleket, és már meglévő, archivált adatokat használtak.

Létrejöttek a nemzeti szélerenergia programok, s ezek eredményei pl. a *Wind Energy Resource Atlas of the US* (Egyesült Államok Szélerenergia Atlasza), a *Wind Atlas for Denmark* (Dán Szélatlasz) stb. Kiadtak ún. telepítési kézikönyveket is (pl. USA, Hollandia, Kanada). Az *European Wind Atlas* (Európai Szélatlasz) már mind a két célt szolgálja, vagyis szélerőforrás atlasz és telepítési kézikönyv is.

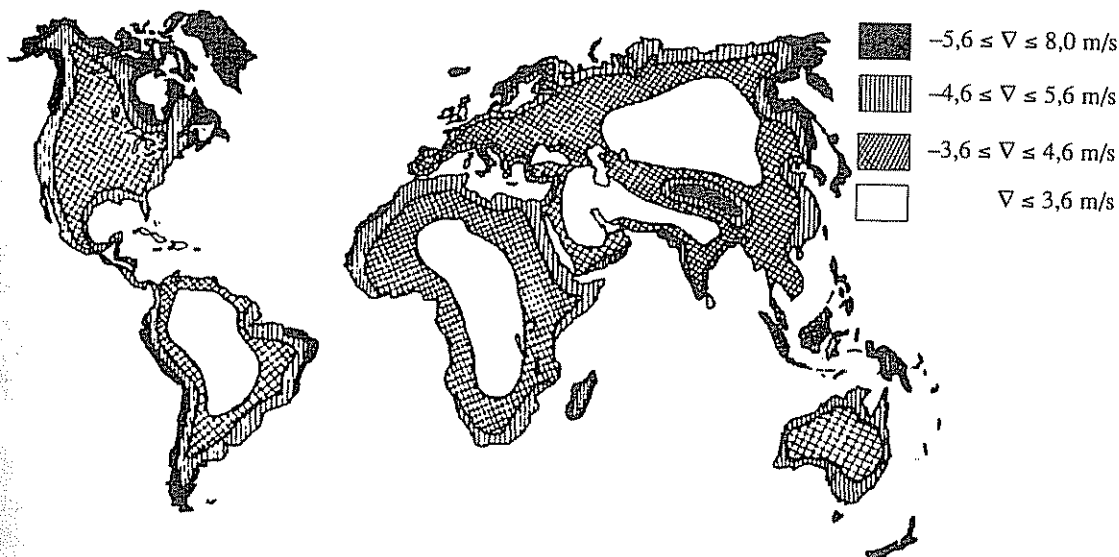
Az 1990-es években a verseny kiéleződött a szélturbina gyártók, és a nagy beruházásokat előkészítő mérnöki irodák között is. Döntő szemponttá vált a turbinák élettartamára vonatkoztatott energiatermelő képesség minél pontosabb meghatározása.

A felmérések eredményeként olyan térképek készültek, amelyek alapján nagy pontossággal meg lehet mondani – adott területre – a szélerenergia hasznosíthatósága szempontjából lényeges adatokat, ezzel könnyítve a tervezők munkáját.

### 3.2.2. Adott területen a globális szélerenergia-potenciál

Becslések szerint a világ jelenlegi energiaigénye a légmozgások összes energiájának közel 1%-val egyenlő. A *World Meteorological Organisation (WMO, 1981)* meteorológiai állomások globális hálózatának adatait alapján tanulmányt készített a világ szélerőforrásairól, s a földfelszín felett 10 m-es magasságra vonatkoztatva ( $W/m^2$ -ben) szélerenergia-térkép formájában publikálta. A meteorológiai állomásokat nem a szélerenergia felmérésére létesítették, más szempontok voltak döntők: a repülésügy, a mezőgazdaság és az időjárás-jelentések készítése. Általában a szél mérése sem tartozik a legfontosabbak közé, amíg nem olyan erősek, hogy károkat okozzanak. A mérőállomások sem az előnyös helyeken vannak az akadálytalanul fújó szelek sebességének méréséhez, s csak ritkán található a legnagyobb átlagos szélersebességű helyeken.

A 3.12. ábrán a térkép átfogó képet csak a globális szélerenergia potenciálról ad. Minden kedvező szélersebességű terület nem szerepel, mivel jelentős részük csak kis helyre korlátozódik, de sok területen az adatok is hiányoznak. A szélerenergiára vonatkozó becslések pontossága nagyban függ a szélmérési adatok megbízhatóságától. A meteorológiai ada-



3.12. ábra. Globális szélerenergia-potenciál a világon (meteorológiai mérések alapján)

tok egyszerű kiértékelése – pl. a szélenergia térképekhez – az erőforrás alulbecsléséhez vezet. A domborzat és a felszín hatását figyelembe kell venni minden felhasználáshoz.

Számos ország elvégezte a saját szélenergia potenciáljának felmérését, leginkább figyelemre méltó az USA. Az egész területére, és kiválasztott térségekre vonatkozóan is számos tanulmány készült. Egy teljes felmérés készült el 1991-ben a Battelle Pacific Northwest laboratórium munkája nyomán. Ezek a tanulmányok mind meghatározzák a rendelkezésre álló teljes erőforrást, de tekintetbe vesznek más tényezőket is a hozzáférhető energia eléréséért. Ilyeneket mint:

- turbina technológia – a kinyerhető energia mennyiség,
- hálózatra kapcsolás lehetősége,
- toronymagasság,
- domborzat,
- kizárandó (érzékeny környezetek) területek (városok, védett helyek).

### 3.2.3. Európa szélerőforrása

Az európai szélenergia potenciál felmérésének eredménye az Európai Szélatlaszban található. A térképeket Európa nyugati felére teljesen összeállították. A kiindulási adatok jó elhelyezésű meteorológiai állomásokról származnak, hosszú idejű megfigyelésekből. Az adatokat módosították a domborzat, felszín és a helyi árnyékoló hatások függvényében, majd ezután vonatkoztatták át azokat más területekre. Az adatok kiterjesztése ismét azt eredményezte, hogy egyes nagy szélsébségű helyek nincsenek kielemezve, valamint kimaradtak egyes alacsony szélsébségű területek. Időközben több európai ország elvégezte a felmérést egész területére, vagy egyes részeire is.

### 3.2.4. A konkrét hely kiválasztása

Amikor már számos lehetséges helyszín kiválasztása megtörtént, a kör további szűkítéséhez újabb, részletesebb széljárás adatokra van szükség. Ekkor már pontosan a kiszemelt helyekre vonatkozó információk kellenek. Az adott telephely várható átlagos éves teljesítményét megfelelő pontossággal csak kellő pontosságú széljárás adatok birtokában lehetséges megbecsülni. Elsősorban a szélsébségek időbeni eloszlására van szükség. A jó becslésekhez évek hosszú sorára vonatkozó adatsorok szükségesek, de ennél rövidebb időszakokra vonatkozó mérési eredmények alapján is dolgoznak.

A szélsébségek gyakoriságának eloszlása elég információt szolgáltat az adott helyre vonatkozó átlagos és a leginkább várható szélsébségről. Ebből megismerhetjük a szélcsendes, vagy éppenséggel az erősen szeles időszakok arányát is. Az a telephely, ahol a túl nagy szélsébségek (nagyobb mint 25 m/s) gyakoriak, kevésbé megfelelőek, mivel a szélturbina gyakori leállítása várható. A szélsébségek gyakoriságának eloszlása lehetővé teszi a tervező számára, hogy az adott viszonyokhoz a legmegfelelőbb jelleggörbéjű turbinát válassza ki. Fontos szempont a bekapcsolási, leállítási és a névleges szélsébség nagysága.

A széljárás nagymértékben változhat az összetett területeken, így adott szélfarmon az egyes turbinák lényegesen eltérő eredményt produkálhatnak. Ez természetesen nagyban befolyásolhatja az egész farm teljesítményét, ezért az előzetes pontos felmérés igen hasznos.

Egy telephely vizsgálatához szükséges adatok több forrásból is származhatnak:

- archivált meteorológiai adatok,
- helyszíni mérések,
- numerikus vagy fizikai modellekből származó adatok.

A széljárás mellett számos egyéb tényezőt kell figyelembe venni az optimális telephely kiválasztásához. Ezek nagyvonalakban:

- elektromos hálózat elérhetősége,
- helyi környezeti hatások (pl. tájkép),
- helyi úthálózat,
- lakóhelyek közelsége,
- zajhatás,
- interferencia a tv- és rádiójelekkel stb.

### 3.3. A szél, mint energiaforrás

#### 3.3.1. A szél mozgási energiája

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

Az A keresztmetszeten,  $v$  sebességgel átáramló légtömeg tömegárama:

$$m^* = \rho A v, \text{ kg/s} \quad (3.15.)$$

amelynek egy másodpercre vonatkozó mozgási energiája:

$$P_k = \frac{1}{2} (\rho A v) v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3, \text{ W}, \quad (3.16.)$$

ahol  $\rho$  a levegő sűrűsége,  $\text{kg/m}^3$ ,  $A$  a vizsgált (pl. generátoroknál a rotor által súrolt) felület  $\text{m}^2$ ,  $v$  a zavartalan szél sebessége  $\text{m/s}$ .

Az egyenlet három tényezőre is felhívja a figyelmet:

A szélenergia arányos a levegő sűrűségével. Vagyis a magasabb hegységekben ugyanahhoz a szélesebességhez kevesebb energia tartozik.

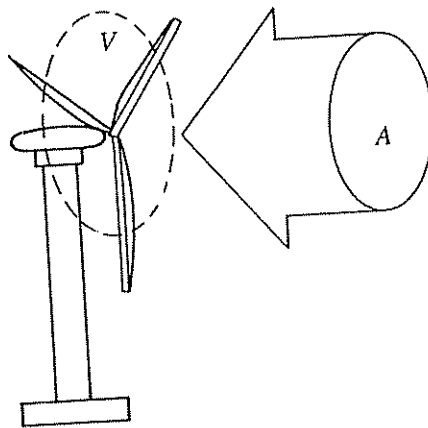
A szélenergia a szélesebesség köbével arányos, ezért igen fontos a nagy szélesebességű helyek kiválasztása *10%-kal nagyobb szélesebesség kb. 30%-kal több energiát jelent.*

A szélgenerátoroknál a szélenergia arányos a rotor által súrolt felülettel, vagy a rotor átmérőjének a négyzetével.

A könyv más fejezetében tárgyaljuk, hogy a szélenergia csak egy részét képesek hasznosítani, mégpedig:

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A v_{\infty}^3, \text{ W}. \quad (3.17.)$$

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



3.13. ábra. A lapátkerék által súrolt felület

Látható, hogy a turbinák teljesítménye alapvetően függ a szélesebségtől. A teljesítményük a szélesebséget megduplázva a nyolcszorosára, viszont a rotor által súrolt felület megkétszerezésével csupán a kétszeresére fog változni. Ezért a turbinák telepítési helyének optimalizálása döntő jelentőségű a gazdaságosság szempontjából.

A turbina karakterisztikájától függetlenül a turbina energia előállítási képességét a területen mért szélesebségtől függő energiasűrűséggel fejezhetjük ki normál atmoszféránál, 1,225 kg/m<sup>3</sup>-es légsűrűségnél:

Szélesebség, m/s	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
Teljesítmény W/m <sup>2</sup>	76,6	612,5	2067,2	4900,0	95700,3

A levegő sűrűsége csökken a hőmérséklet és a magasság növekedésével. A sűrűség értéke körülbelül 0,9–1,4 kg/m<sup>3</sup> között változik. E a változás a hatása lényegesen kisebb a szélesebségénél, ezért is a gyakorlatban, pl. a szélesebség méréseknél nem szokták figyelembe venni.

### 3.3.2. A szél dinamikus energiaegyenlete

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

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

$$p \cdot V = m \cdot R_1 \cdot T, \quad (3.18)$$

ahol  $R_1$  a levegő gázállandója, J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>

Ezzel a levegő sűrűségfüggvénye:

$$\rho(p, T) = \frac{m}{V} = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{p}{T}, \quad (3.19)$$

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

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

$$h_1 = \frac{p_{\max} \pm p_0}{p_0} \approx \frac{1040 \pm 1025}{1025} \approx 0,014 \rightarrow 1,4\%, \quad (3.20)$$

$$h_1 = \frac{p_{\min} \pm p_0}{p_0} \approx \frac{980 \pm 1025}{1025} \approx 0,044 \rightarrow 4,4\%, \quad (3.21)$$

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

A szélturbinák általában a névleges teljesítményt, a névleges szélesebségnél szolgáltatják. A névleges szélesebséget az adott terület széljárásának megfelelően lehet meghatározni, ami gyakran 1,5-szerese a térség átlagos szélesebségének.

A szélturbina teljesítménye nullától, a bekapcsolási sebességtől a maximális teljesítményig növekszik, amely érték a névleges szélesebségnél van. Ezt követően a turbina folyamatosan a névleges teljesítményt szolgáltatja, mígnem a szélesebség a szerkezet veszélyessé válik, s ekkor a szabályozó rendszer a turbinát leállítja (20–25 m/s).

*fenti határértékek megismerése céljából egyértelmű, hogy a szélturbinák energiatermelésének pontos meghatározásához a telepítési pontra (területre) vonatkozó éves szélesebség-adatbázis ismerete nélkülözhetetlen. A következőkben a méréssel kapcsolatban néhány alapfogalmat mutatunk be, nem a teljesség igényével.*

### 3.3.3. A széleenergia-potenciál meghatározása helyszíni mérésekkel

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

#### 3.3.3.1. Mérési adatok gyűjtése

A meghatározott telephelyre vonatkozó adatok gyűjtésére a telepítés várható helye közelében mérőoszlopokat szokás felállítani. Ezekre kerülnek a kiválasztott mérőműszerek. Minden mérési adatot tárolni kell valamilyen formában a mérési helyen pl. szalagon, vagy automatikusan le kell tölteni egy távolabbi helyre, ahol a feldolgozás és tárolás történik.

A részletesebb tárgyalás előtt néhány kapcsolódó fogalom:

**Szélesebség.** A szélesebség az a pillanatnyi sebesség, amellyel a levegő adott földrajzi helyen, a terepszinttől meghatározott magasságban mozog. Jelölése:  $v$ , mértékegysége: m/s.



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

*Az átlagos szélesség az adott földrajzi helyen adott magasságban, meghatározott időtartam alatt mért szélességek számtani átlaga. Jelölése:  $v_{\text{a}}$ , mértékegysége: m/s.*

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

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

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

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

**Relatív szélirány gyakoriság.**

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

Összességében kijelenthető, hogy szélesség és irány mérése nélkülözhetetlen, de gyakran nagyon hasznos lehet egyéb meteorológiai mennyiségek mérése is, különösen a hőmérsékleté és a légnyomásé. Ezek lehetővé teszik az adatsorok összevetését más mérési helyről származó adatokkal (3.2. táblázat).

A használt mérőműszereknek erőteljes és megbízható kialakításúaknak kell lenniük, hiszen ezeket általában hosszabb időre magukra hagyják, gyakran zord körülmények között. A szélesség és irány méréséhez legalább két magasságban

3.2. táblázat Bizonytalansági tényezők a szélenergia-méréseknél. Forrás: DEWI 2001.

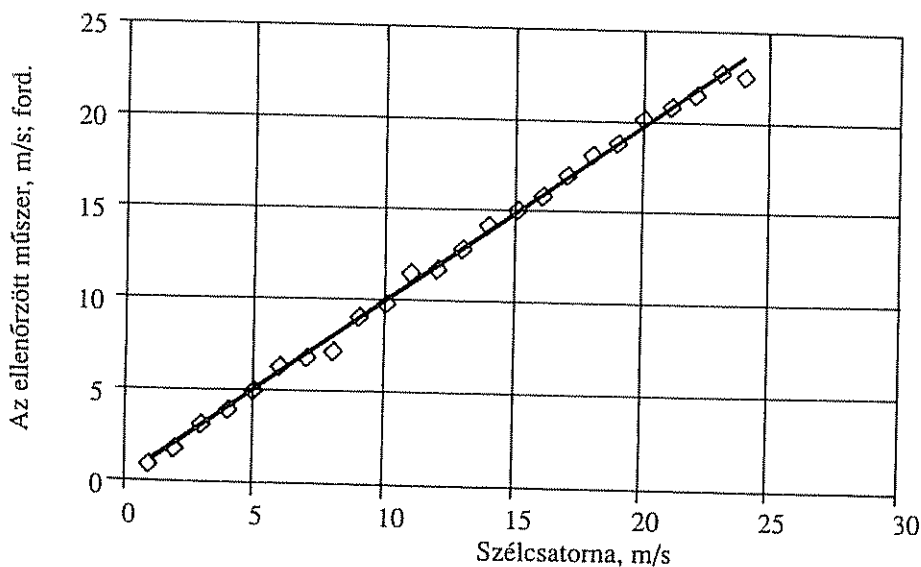
A bizonytalanság forrása	A lehetséges eltérés (%)
A mérőegységek hitelesítése	0,5–3,0
A mérési ponton a turbulencia (függőleges áramlás hatása)	0,5–4,0
Az érzékelők helyzete a mérőoszlophoz viszonyítva	0,2–3,0
A mérési hely kiválasztása	0,5–5,0
A mérés időtartama	0,3–3,0
A mérési adatok kezelése, feldolgozása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

kell elhelyezni a műszereket, 10 m-en, és a szélturbina középmagasságában. Amennyiben a mérési eredményeket a terület felszíni egyenetlenségi fokának meghatározásához is fel kívánják használni, akkor még egy másik magasságban is szükséges mérőműszert kihelyezni. Az átlagos szélességek méréséhez általában kanalas anemométereket használnak, mivel ezek elég megbízhatóak és viszonylag alacsony az áruk. Az ilyen jellegű mérésekhez felhasznált anemométereknek gyakran jobb a karakterisztikájuk, mint azoknak, melyeket a meteorológiai állomásokon használnak. A szélirány méréséhez szélzászlókat használnak, melyek csak a horizontális irányváltozásokat érzékelik.

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

A kanalas vagy a propelleres anemométernek a forgása a szél sebességének nagyságával arányos. Ezt a készülék feszültséggé vagy impulzussá alakítja. Minden forgó rendszerű anemométernek van egy küszöb légsebessége, ahol elkezd működni. Ez általában 0,5–2 m/s között van. Minden forgó rendszerű anemométernek van egy távolság-, és egy időállandója. A távolságállandó a légoszlop hosszát jelenti, melynek a műszer érzékelőjén át kell haladnia mire a műszer a sebességváltozást 63,2%-ban már érzékeli. Ez függ a levegő sűrűségétől. Az időállandó azt az időt jelenti, mely alatt a műszer már 63,2%-ban reagál a változásra. Ez a szélességgel fordítottan arányos érték. A kanalas anemométerek tehetetlenségéből következik, hogy nagy hibákkal mérik a gyorsuló és a lassuló szeleket.

Minden szélességmérő-műszert először légcsatornában kell kalibrálni (3.14. ábra). Amennyiben az adatgyűjtés hosszú távon folyik, akkor a mérőhelyen szükséges lehet a kihelyezett műszer ellenőrzése egy másik, referencia műszer segítségével.



3.14. ábra. Hitelesítési diagram

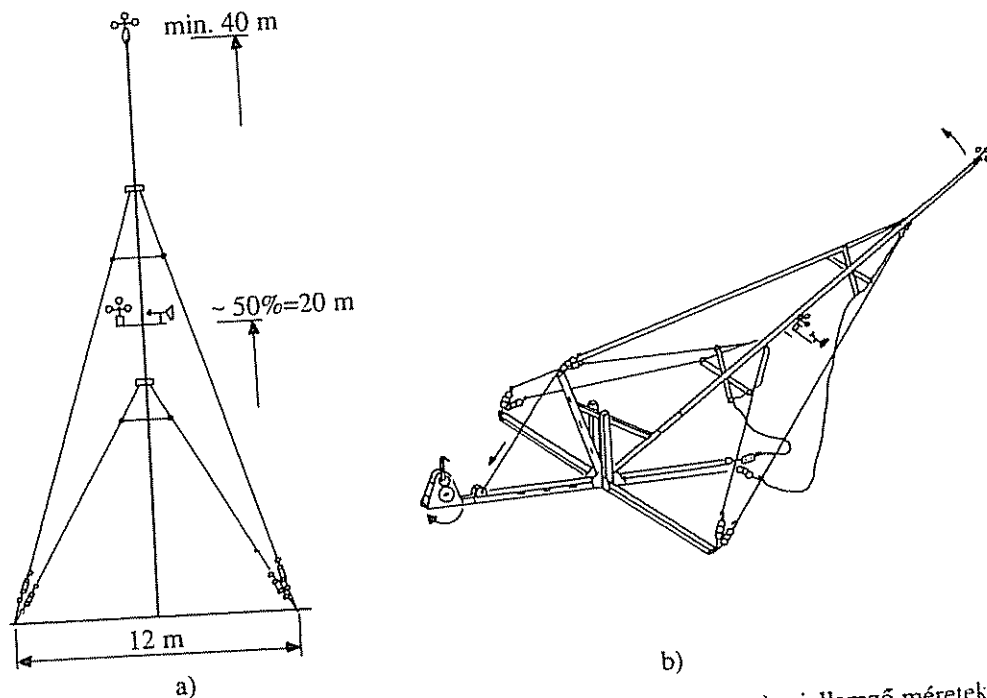
Az eredményekben torzítást okozhat maga a műszer tartószerkezete, vagy egyéb elhelyezett műszerek is, ezért a műszerek elhelyezése nagy gondosságot követel. Azokat az elemeket, melyek zavart okozhatnak, lehetőleg 9 legkevesbé gyakori szélirányba kell elhelyezni, amit általában ismerünk a meteorológiai szolgálatok adataiból (3.15. ábra).

Másik fontos tényező az adatgyűjtő megbízhatósága. A berendezés szigeteléséről feltétlenül gondoskodni kell. Lehetőség van az adatok lekérdezésére távközlési eszközökkel, például telefonon keresztül. Ennek nagy előnye, hogy az adatokat rendszeresen lehet ellenőrizni, és az esetleges meghibásodásokat igen rövid idő alatt fel lehet táni. A szerző mérései során is számos esetben volt példa a víz behatolása által okozott energiaellátási zavar miatt nagyarányú adatvesztésre, vagy adatmódosulásra. Az adatgyűjtő-tároló rendszer gondos tervezése elengedhetetlen.

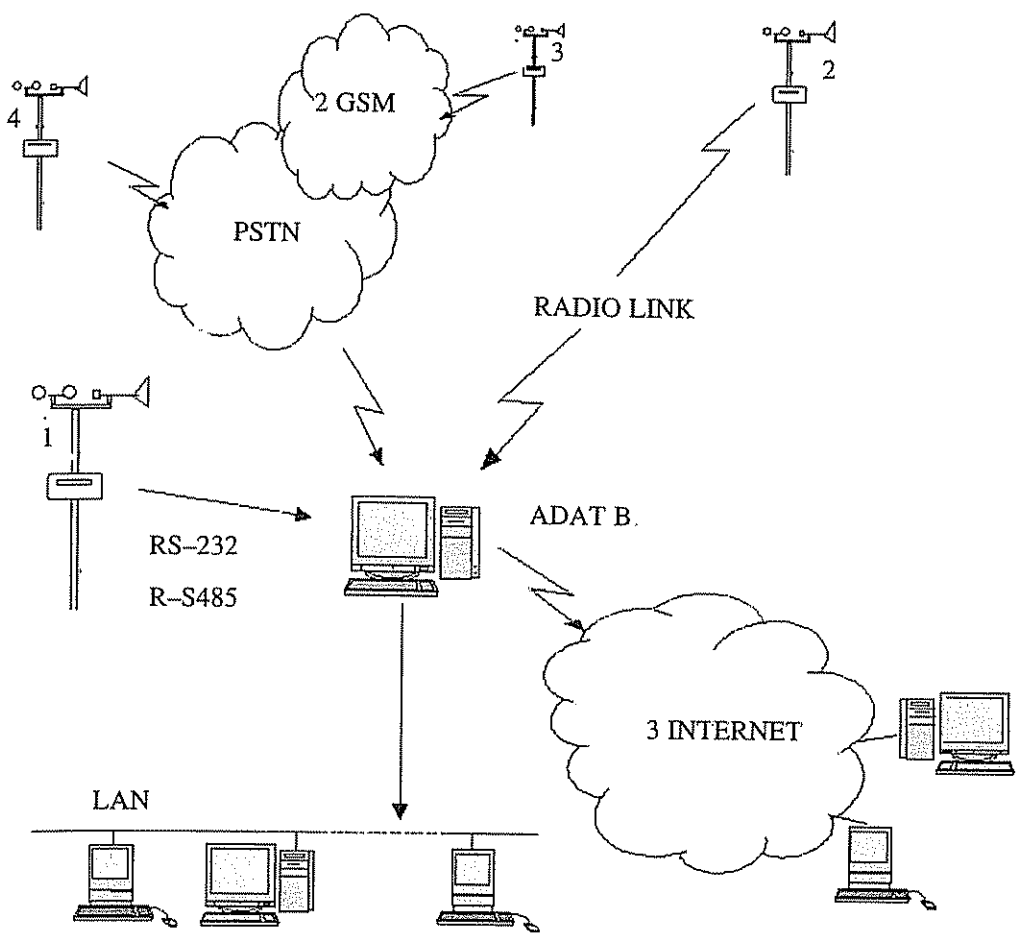
A levegő mozgásállapotára egy adott pillanatban, meghatározott helyen, egy vektor jellemző, melynek nagysága a szél sebességével arányos, és a mozgás irányába mutat. A vektor leírása kitüntetett x, y, z irányokhoz képest irányszögeivel és abszolút értékével (polárkoordinátaival), vagy x, y, z irányú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

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

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



3.15. ábra. A szélmérésekhez használható áttelepíthető állvány, a) a jellemző méretek. b) a felállítása csörlővel



3.16. ábra. Mérési adatok leolvasásának lehetőségei

A szél irányának (szélirány = ahonnan a szél fúj) megadására a gyakorlatban két-féle mód terjedt el. Az első, melyet az éghajlatkutatásban illetve az időjárás jelentésekben alkalmaznak, az úgynevezett „fő- és mellékirányok” (égtájak) leírásával.

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

A szélirányok megjelölése az égtájak angol megnevezéseinek kezdőbetűiből adódik (N-North – észak; E-East – kelet; W-West – nyugat; S-South – dél). A másik jelölési mód esetén, például a fokokat használják, vagyis a szélirány skálának 360 fokú osztása van.

### 3.3.3.2. Mérőműszerek

#### Nyomólapos szélmérők

A műszer közvetlenül a szél nyomásának a mérésére szolgál. Fő része egy fémlap, melyet a szélkakashoz hasonló szerkezet fordít szembe a széllal. A fémlap egy karon

függ, és a szél nyomásának hatására kilendülni, a kilendülés mértéke skáláról leolvasható. A kitérés a szél nyomásától és a fémlap súlyától függ.

A szélnyomás és a kilendülés közötti összefüggés pontos elméleti leírása hiányában a műszer skálázását kísérleti úton készítették el. A skálabeosztásokat egy vizuális megfigyelésre létrehozott tengerészeti szélskála, a „Beaufort-skála” alapján jelölték ki (3.3. táblázat). Napjainkban e műszereket nem használják.

3.3. táblázat. Beaufort-skála

Beaufort-fok , B°	Vizuális megfigyelés	Szélesebesség m/s
0	Teljes szélcsend.	0–0,2
1	Gyenge fuvallat. Füst éppen elhajlik.	0,3–1,5
2	Gyenge szellő. Falevelek alig mozognak.	1,6–3,3
3	Gyenge szél. Falevelek élénken mozognak.	3,4–5,4
4	Mérsékelt szél. Vékonyabb gallyak mozognak	5,5–7,9
5	Élénk szél. Vastagabb gallyak is mozognak.	8,0–10,7
6	Erős szél. Ágak mozognak.	10,8–13,8
7	Heves szél. Gyenge fatörzsek meghajlanak.	13,9–17,1
8	Viharos szél. Tetőcserepek elmozdulnak, kisebb károk.	17,2–20,7
9	Vihar. Fák gyökerestől kidőlnek.	20,8–24,4
10	Szélvész. Nagy károk.	24,5–28,4
11	Heves szélvész. Egyes épületek lerombolása.	28,5–32,6
12	Orkán. Egészen nagy és tömeges károk.	32,7–

### Szélzászlók

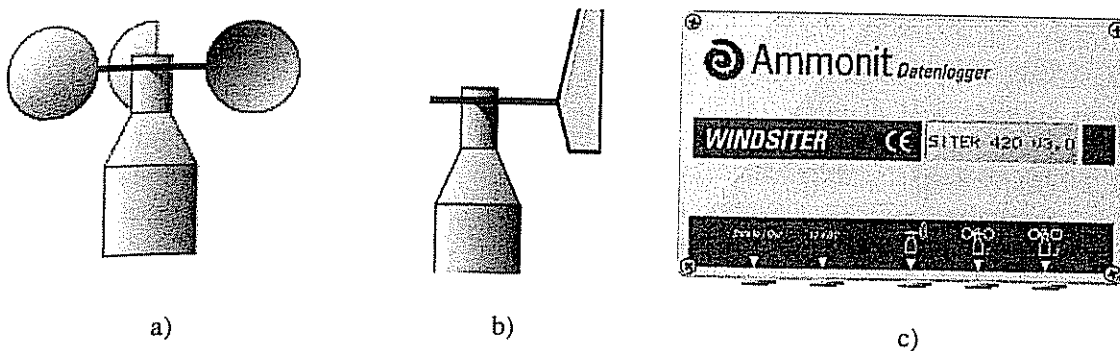
Összefoglalóan szélzászlóknak nevezzük azokat a mechanikus szerkezeteket, melyek szél irányának meghatározására szolgálnak. Ezek függőleges tengely körül szabadon elforduló nemszimmetrikus testek, melyek egyik vége, az úgynevezett vitorla, nagy akadályt képvisel a szél útjában amíg a szélirányba be nem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

### Rotációs szélesebesség-érzékelők

Ezek leggyakrabban használt formája a kanalas szélesebességmérő (anemométer). Kialakítását tekintve a szabadon forgó, függőleges tengelyre rendszerint három (esetleg négy) kanalat erősítenek. A szélesebességtől függően a szélnyomás forgáshozza a kanalakat, illetve a tengelyt [1.].

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

Ilyen pl. (a szerző által is használt) az Ammonit cég Windsiter 420 jelű adatgyűjtő és feldolgozó egysége. Ez a készülék lehetőséget biztosít két anemométer és szélirányjelző által nyert adatok statisztikai feldolgozására. Ezek a korábban jelölt összefüggésekre alapuló statisztikák a szélenergia-potenciál előrejelzést szolgálják. Az érzékelők csatlakozókon keresztül kapcsolódhatnak a központi egységhez (3.17. ábra).



3.17. ábra. A szélenergia mérőműszerei: a) kanalas anemométer, b) szélirányjelző, c) az adatrögzítő háza

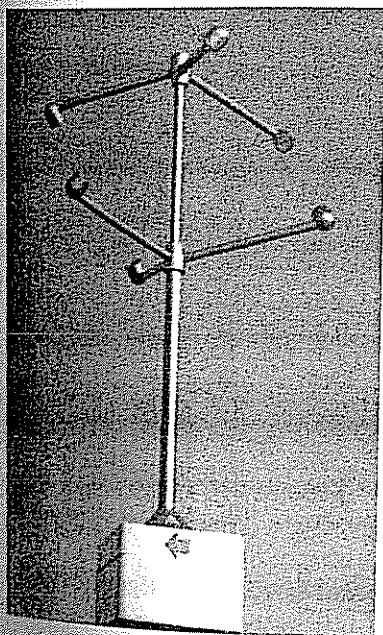
Az adatgyűjtő programozása, és az adatok letöltése soros RS 232-es csatlakozón keresztül lehetséges, melyet a PC programja illeszt. A statisztikák a műszeren is megtekinthetők, amennyiben nincs egy PC vagy laptop a lekérdezéshez. Lehetőség van az adatok azonnali kinyomtatására is (pl. kézi printer segítségével).

A Windsiter processzora minden perc végén kiszámítja az átlag szélességet, m/s-ban, 0,1 m/s-os pontossággal, valamint rögzíti a szélirányt. Amennyiben az átlagolási idő egy percre volt állítva, az eredményeket közvetlenül a statisztikába teszi. Ha átlagolási idő tíz perc volt, akkor először a tíz értékből képez egy átlagot, és csak az kerül a statisztikába. A statisztika tartalmazza az átlag és a maximum értékeket, az eloszlást, a szélcsendre vonatkozó analízist, a napi közepes szélességet és a szélirányt. A készülék 13 statisztika tárolására alkalmas (lehet havi, heti illetve napi bontású). A 13 mérési periódus vége után felülírja az első statisztikai állományt. Az adatok teljes áramkimaradás után is elérhetők maradnak [90.].

A kanalas rotorokon kívül eltérő kialakításúakat is elterjedten használnak. Ilyenek például a lapátkerekek és a propellerek. Ezeket általában a szélzászló végére szerelik fel úgy, hogy mindig szélirányba forduljanak.

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

**Akusztikus szélmérő.** Speciális fémkereten hat darab kettősrendeltetésű mérőtest van elhelyezve. Ezek feladata a hangkibocsátás és az érzékelés is. Az egyes mérőtestek által kibocsátott hangimpulzusok a széliránytól és szélességtől függően különböző



3.18. ábra. Ultrasonic USA-1 3 dimenziós szélmérő



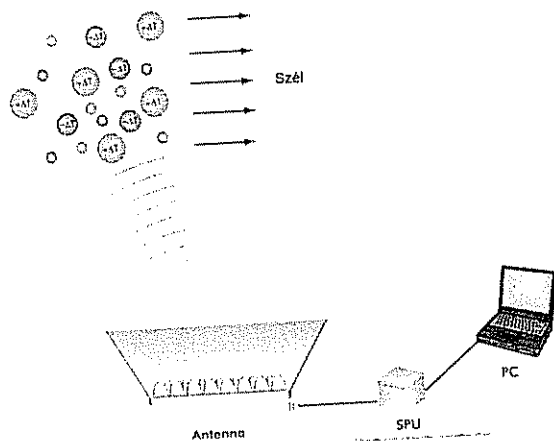
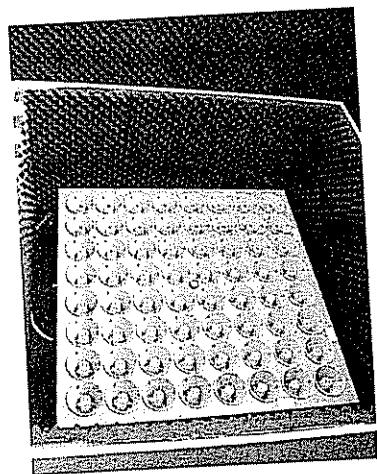
időbeli eltéréssel jutnak el a többi mérőtesthez. Az így nyert adatokat elektronikus berendezés dolgozza fel (3.18. ábra).

A Sodar rendszerű akusztikus szélmérő szélirányokra és szélsébségekre jellemző vektorsora úgy jön létre, hogy a számítógép egy-egy vektor „mögé” decimális számok formájában feljegyzi az aktuális szélsébséget is (3.19. ábra).

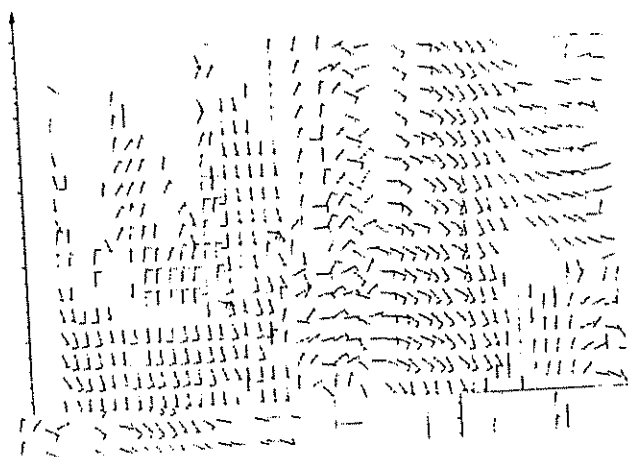
A bemutatott műszerek alkalmasak a szélsébség pontos mérésére, a széliránytól függetlenül. Ez természetesen csak akkor valósulhat meg, ha szélárnyékoló objektumok nincsenek a közelben. Mérőállványoknál akkor, ha az árnyékoló tárgy, építmény a magasságához viszonyítva legalább tízszeres távolságban van.

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

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



a)



b)



c)

3.19. ábra. Sodar rendszerű akusztikus szélmérő: a) hangimpulzusokat kibocsátó egységei, az oldalt elhelyezkedő hangelnyelő falak: a) a rendszer elvi működése, b) a mérés vektoros ábrája, c) szélirány és szélsébség

Az átlagos szélesség ismeretében az adott helyre vonatkozó szélesség gyakorisága megfelelő közelítéssel adható meg a Rayleigh-féle eloszlásfüggvény segítségével.

A  $v$  sebességű szél relatív gyakorisága:

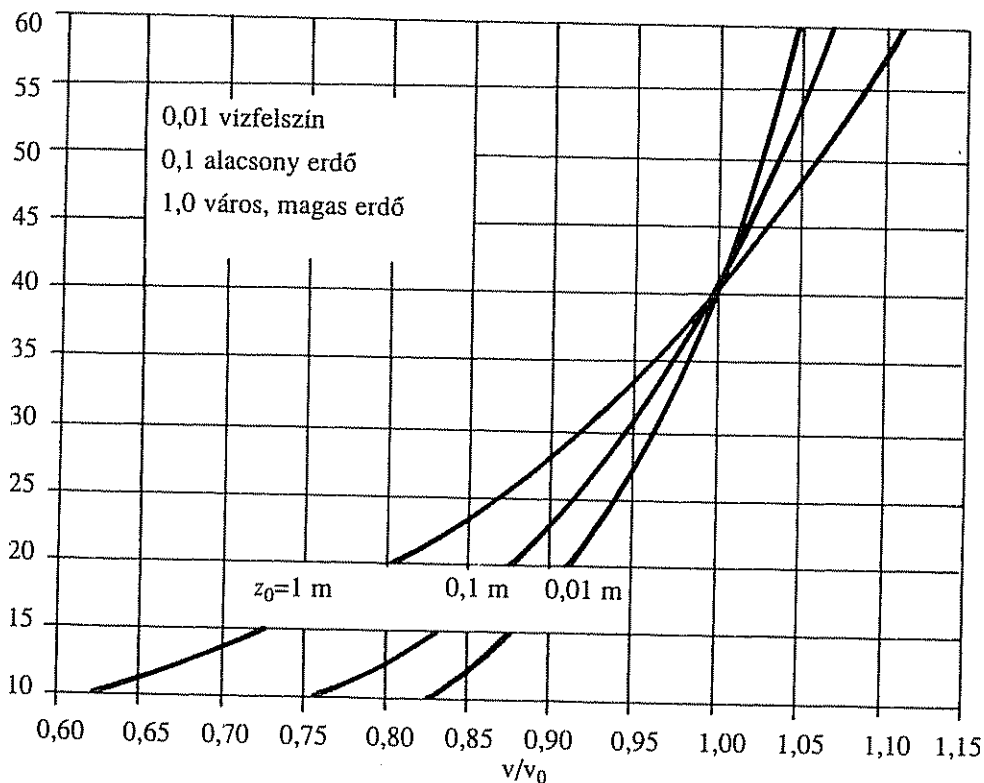
$$f(v) = \frac{\pi \cdot v}{2 \cdot v_d^2} \cdot e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_d}\right)^2}, \quad \%, \text{ ahol } v_d \text{ az átlagos szélesség (3.22)}$$

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

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

Energiacélú szélméréseket min 40 m-es, vagy a fölötti magasságban kell végezni. A jelenleg telepítésre kerülő szélturbinák tengelymagassága 60–120 m. A tervezéshez szükséges reális kiinduló adatok megszerzésére alapvetően két lehetőség áll rendelkezésre. A min. 40 m-es minimális magasság azért is fontos, mert a különféle felületek eltérő turbulenciát okozhatnak. A 3.20. ábrán látható, hogy az egyenletlenség a sebességhányados függvényében eltérő, de 40 m magasságban már közel azonos.

$H$  magasság

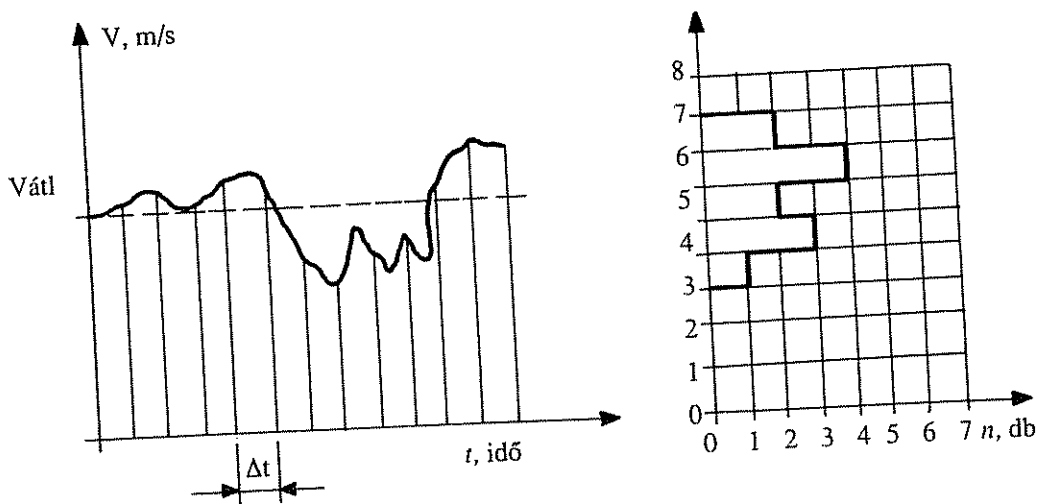


3.20. ábra. Turbulencia a sebességhányados és a magasság függvényében

### 3.3.3.3. A mérési eredmények elemzése

A mérési adatokat általában másodperctől a percenkénti gyakorisáig rögzítik. A nagyobb frekvenciájú mintavétel lehetőséget ad a turbulens viszonyok megismerésére. Az adatokat mindig minőségi ellenőrzés alá kell vetni, hogy a kirívó, nem reprezentatív adatokat kiszűrjessük. Az adathalmazból általában 10 perces átlagokat készítenek. A mérést egész éven át kell végezni, hogy a szezonális változások megmutatkozzanak [20.].

Ha digitális mérőberendezésünk van, akkor a mérőberendezésen beállítjuk a mintavételi (mérési) időközöket ( $\Delta t$ ), amellyel tulajdonképpen közelítjük a szélsébség tényleges, szabálytalan függvényét. Nyilvánvaló, hogy minél kisebb  $\Delta t$ , közelítésünk annál pontosabb. A műszer a két mérési időpont közötti szélsébség-átlagokat méri, és ezeket az átlagértékeket ( $\bar{v}_i$ ) tárolja vagy küldi a feldolgozó számítógépbe. A mérési időtartam alatt kapott adatmennyiség a mérési gyakoriságtól függ, a  $\Delta t$  időközök meghatározásánál a tárolókapacitást ezért szigorúan figyelembe kell venni, egyébként adatvesztés következhet be a mérési ciklus végén (3.21. ábra).



3.21. ábra. A mért adatok osztályba sorolása

Tehát van a  $t$  hosszúságú időtartamra vonatkozó  $n = t/\Delta t$  számú szélsébségadatunk, feladatunk a fajlagos szélpotenciál vagy a fajlagos széltejeljesítmény meghatározása. Mint láttuk, a szél energiatartalma a szélsébség harmadik hatványával arányos, ezért nem mindegy, hogyan számolunk [70.].

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

$$v_{\bar{a}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{v}_i)}{n}, \text{ m / s.} \quad (3.23)$$

Helytelen azonban energetikai számításokhoz ezt a módszer alkalmazni, mert így alábecsüljük a szélben rejlő energiát [72.]. Ezért a feldolgozásnál a

zélsebesség-köbök átlagát kell kiszámítani, és ennek alapján meghatározni a fajlagos szélteljesítményt:

$$v_a^3 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{v}_i)^3}{n}, \text{ m/s}^3. \quad (3.24)$$

Bizonyításul, hogy

$$\left( \sum_{i=1}^n \bar{v}_i \right)^3 \ll \sum_{i=1}^n (\bar{v}_i)^3 \quad (3.25)$$

Nézzünk egy példát. Legyen egy 10 mérésből származó adatsorunk a 3.4. táblázat szerint, és számítsuk ki a két módszer alapján kapott fajlagos szélteljesítmény értékeket.

3.4. táblázat. Példa a fajlagos szélteljesítmény meghatározásához

	$\bar{v}_i [\text{m/s}]$	4	6	5	7	8	3	5	4	6	5	$\sum \bar{v}_i = 53$	$v_a = 5,3$	$v_a^3 \approx 149$
I.	$\bar{v}_i^3 [\text{m}^3/\text{s}^3]$	64	216	125	343	512	27	125	64	216	125	$\sum \bar{v}_i^3 = 1817$	–	$v_a^3 \approx 182$

A két fajlagos szélteljesítmény viszonya:

$$\xi = \frac{P_{f_i}}{P_{f_n}} = \frac{v_{a_i}^3}{v_{a_n}^3} = \frac{149}{182} \approx 0,82, \text{ azaz közel } 20\% \text{-kal alábecsüljük a szél energiatar-}$$

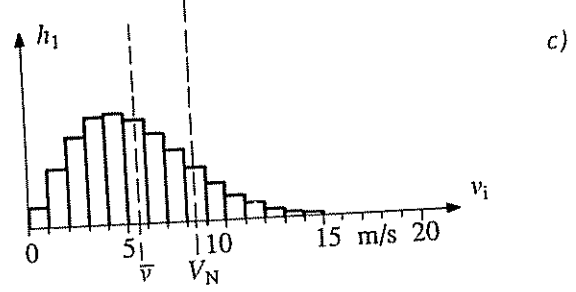
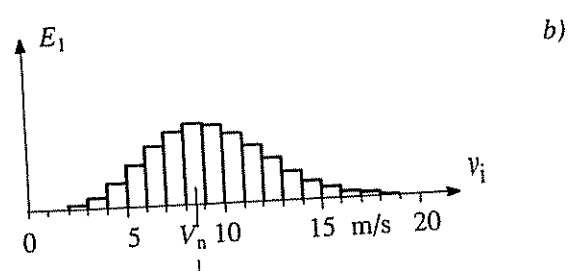
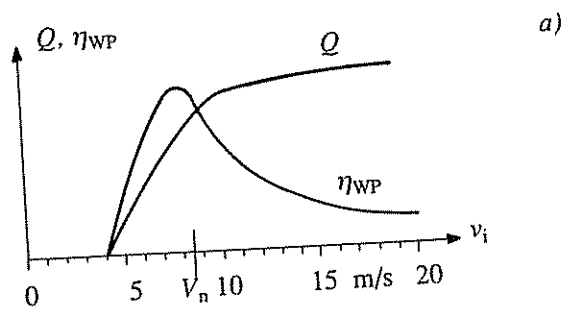
almát, ha nem a helyes módszerrel számolunk.

A méréssel felvett adatok pontossága kulcsfontosságú az energetikai előrejelzések szempontjából. Gondoljunk ismét arra, hogy a szél energiataralma a szélesebesség armadik hatványával arányos. Ezért egy kis hiba is a szélesebességmérésnél hatványozottan jelentkezik a szélpotenciál meghatározásában.

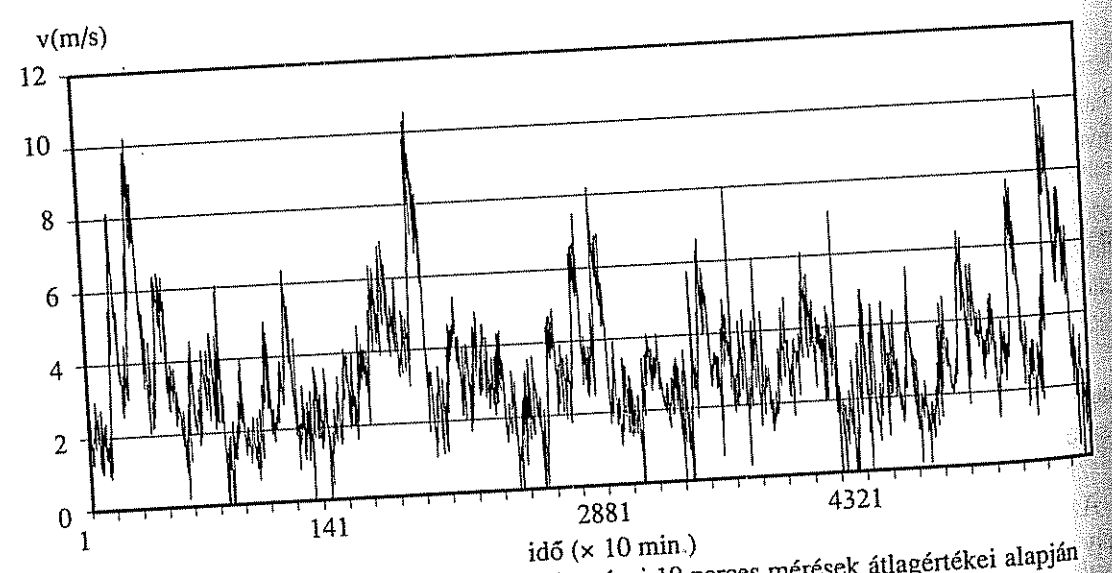
Tételezzük fel, hogy egy olyan szélmérővel dolgozunk, amelynek pontossága  $\pm 5\%$ . Mérési adataink annál inkább szórnak, minél nagyobb szélesebesség-tartományban mérünk, de a mért szélesebességértékből számított szélpotenciál is annál jobban tér(het) a tényleges értéktől. A mérésnél egy viszonylag kis hiba, pl. a gazdaságosság megítélése során, teljesen téves következtetés levonását eredményezheti.

Az adatokat különféle szélesebesség osztályokba válogatják szét szélirányonként, hogy összesítéseket készítenek. Az egyes osztályokba eső adatok számának, és az összes mérési adatok számának alapján gyakoriság-eloszlási diagramokat lehet készíteni (3.22. ábra).

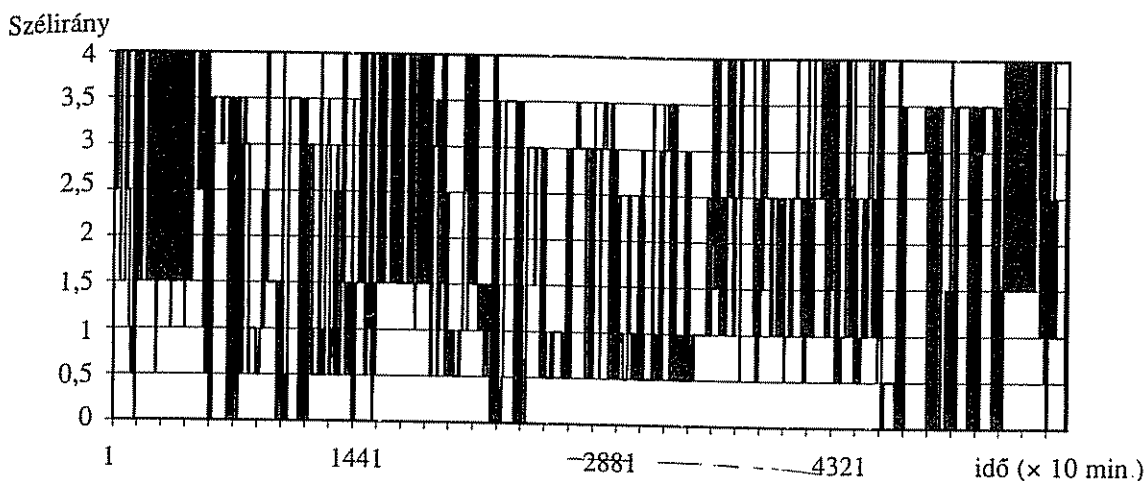
Az átlagolt és osztályozott mérési adatok az energia meghatározását segítik, de a hely meghatározása céljából fontos ismerni a rövid időtartamú szélesebesség- és szélirányváltozásokat is a berendezés kiválasztása, szélirány-követési képessége, szerkezeti kialakítása miatt.



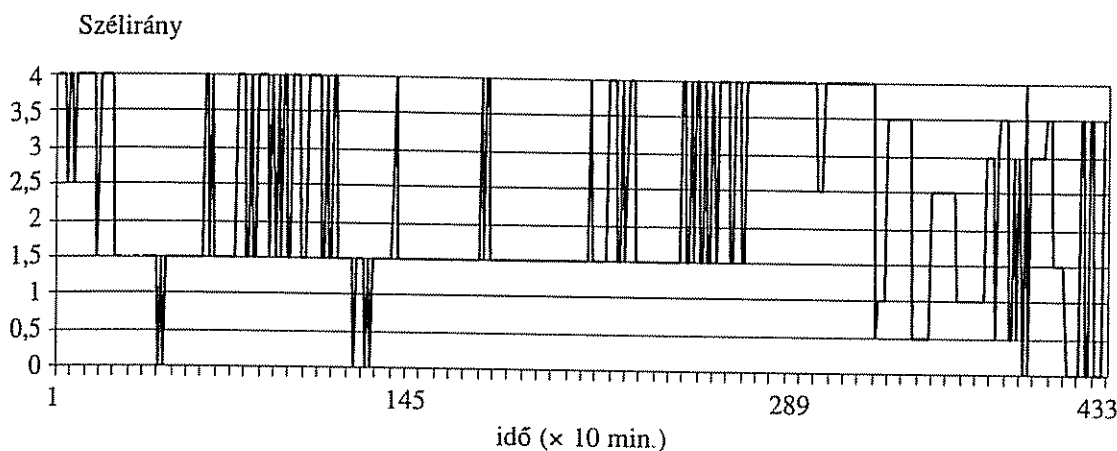
3.22. ábra. A szélesség-mérési eredmények (a) összefüggése a szélben rejlő energiával (b) és a generátorok teljesítményével, ill. hatásfokával (c),  $v_N$  névleges szélesség;  $h_i$  gyakoriság;  $\bar{v}$  átlagos szélesség;  $E_1$  energiatartalom, kWh;  $Q$  generátorteljesítmény;  $\eta_{WP}$  hatásfok



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



3.24. ábra. 4 hetes időtartam szélirány-változásai 10 perces mérések átlagértékei alapján



4–3,5 észak, 3,5–3 északnyugat, 3–2,5 nyugat, 2,5–2 délnyugat, 2–1,5 dél,  
1,5–1 délkelet, 1–0,5 kelet, 0,5–0 északkelet

3.25. ábra. 3 napos időtartam szélirány-változásai 10 perces mérések átlagértékei alapján

A rövid periódusokat is megjelenítő mérések a helyi turbulenciákat tárják fel, azokat a szellőkéseket, amelyek esetleg nem hasznosíthatók, de a berendezésekre túlzott igénybevételt jelentenek [10.]. Rövidebb időszakok mérési diagramjait szemléltetik a 3.23.–3.25. ábrák.

A széljárásra vonatkozó legfontosabb információk a szélesebbesség eloszlási statisztikákból nyerhetők ki.

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

Ezek az adatok hozzárendelhetők a kétparaméteres Weibull-eloszláshoz, amelynél a paraméterek ( $c$  és  $k$ ) meghatározására különféle technikák vannak használatban [20.].

Rayleigh-eloszlás:

$$f(v) = \frac{\pi \cdot v}{2 \cdot v_d^2} \cdot e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_d}\right)^2}, \quad [\%], \quad \text{ahol } v_d \text{ az átlagos szélesebbesség.}$$



Weibull-eloszlás:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, [\%]. \quad (3.26)$$

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

$$P_{G, \text{átl.}} = P_{Gn} \left[ \frac{e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_n}{c}\right)^k}}{\left(\frac{v_n}{c}\right)^k - \left(\frac{v_i}{c}\right)^k} \pm e^{-\left(\frac{v_{\max}}{c}\right)^k} \right]. \quad (3.27)$$

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

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

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

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

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

$$P_{G, \text{átl.}} = P_{Gn} K_F = \eta_e \frac{\rho}{2} A_2 v_n^3 K_F. \quad (3.28)$$

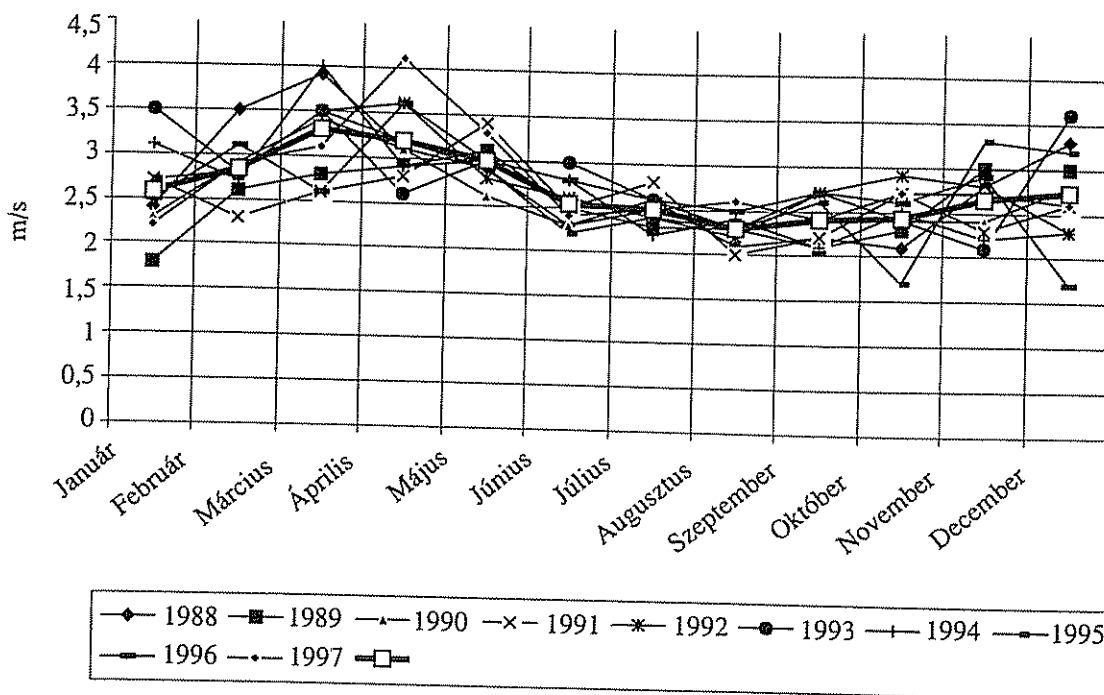
Az erőmű éves energiatermelése:

$$E = P_{G, \text{átl.}} t_{\text{év}} = K_F P_{Gn} \cdot 8760. \quad (3.29)$$

Fontos tudni, hogy a szélsőbesség adatsor, amellyel dolgozunk reprezentatív-e, vagyis nem egy olyan évből származik amely kiugróan széles, vagy éppen szélcsendes volt. Hogy biztosan megállapíthassuk ezt, legalább 10 évre vonatkozó adatsorokra van szükségünk (3.26. ábra).

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

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



3.26. ábra. 10 év meteorológiai szélmerési adatainak havi átlagai – Debrecen –, a 10 év átlagának bejelölésével (Forrás: TARR K. 2001)

1. Hozzárendelt Weibull-paramétereket a telephelyre, és a referencia mérőállomásra vonatkoztatva kell meghatározni, a mérési időszakra vonatkozóan viszonyítani kell ezeket egymáshoz, és végül korrekciókat kell végezni a többi adatra vonatkozóan.
2. A telephely és a referencia állomás közti szélesség-faktor számítása a mérési periódus alatt minden szélirány-tartományra vonatkozóan (3.27. ábra).
3. Egy folyamatos függvény illesztése a mérési periódusra vonatkozó adatokra, majd ennek alkalmazása a többi referencia adatra.
4. A kiértékelés menetét egy konkrét magyarországi példán keresztül mutatjuk be (a helység megjelölése nélkül).

### 365 nap mérési adatai

A mérés 15 és 30 m-es magasságokban folyt kanalas anemométerekkel, síkvidéki viszonyok között, mezőgazdasági területeken. A két mérési magassággal a szélprofil ellenőriztük, a későbbi vetítési magasság miatt. A kiértékelés adatait itt a 30 m-es magasságban kapott értékekkel szerepeltetjük.

A mérési eredményeket és a kiértékelést a 3.5.–3.10. táblázatok és a 3.27.–3.33. ábrák tartalmazzák.

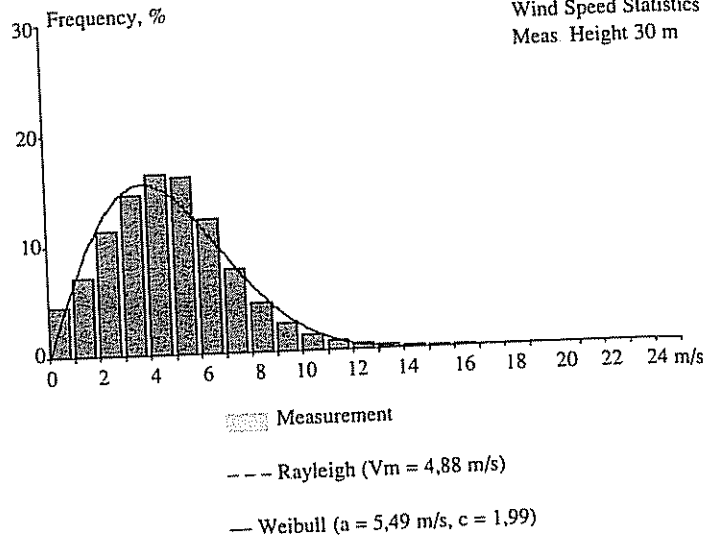
Az adott mérési év havi szélesség átlagait össze kell hasonlítani a hosszabb távú függvényekkel. Jó korreláció esetén a turbina várható éves energiatermelése néhány százalékkal eltéréssel megegyezik a várható valós adatokkal. Természetesen az adatok különféle turbina típusokhoz is kipróbálhatók, hogy az optimális konfiguráció kerüljön kiválasztásra [92.].

Wind Speed Statistics 30.0 m

V, m/s	F (meas), %	F (ray), %	F (wei), %
0- 1:	4,46	3,24	3,32
1- 2:	7,09	9,11	9,23
2- 3:	11,28	13,32	13,40
3- 4:	14,49	15,32	15,34
4- 5:	16,29	15,15	15,12
5- 6:	15,97	13,34	13,27
6- 7:	12,17	10,64	10,57
7- 8:	7,64	7,75	7,70
8- 9:	4,46	5,20	5,16
9-10:	2,48	3,22	3,20
10-11:	1,44	1,85	1,84
11-12:	0,89	0,98	0,98
12-13:	0,53	0,49	0,49
13-14:	0,30	0,22	0,23
14-15:	0,19	0,10	0,10
15-16:	0,13	0,04	0,04
16-17:	0,09	0,01	0,01
17-18:	0,05	0,00	0,01
18-19:	0,03	0,00	0,00
19-20:	0,02	0,00	0,00
20-21:	0,00	0,00	0,00
21-22:	0,00	0,00	0,00
22-23:	0,00	0,00	0,00
23-24:	0,00	0,00	0,00
24-25:	0,00	0,00	0,00

Site: -----  
Start Meas : 16.01.01

Altitude: 176 m  
Temperature: 10.0 °C  
No. of Averages: 365 days (525600 à 1 min)



a)

b)

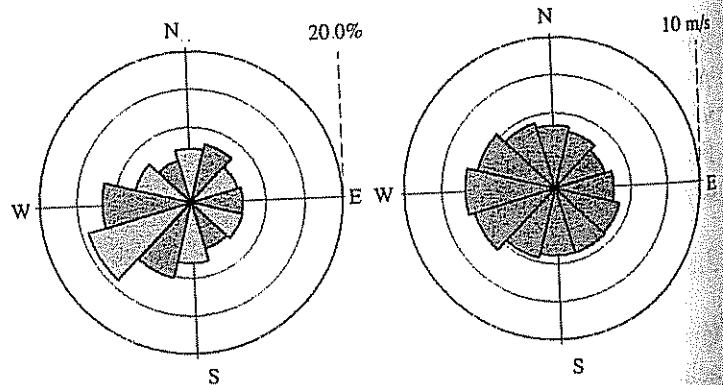
3.27. ábra. 30 m magasságban az átlagos szélességek alakulása az év során a mérési adatokkal, valamint Rayleigh és Weibull eloszlási függvények szerint (a) táblázatosan, b) ábrázolva

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

Site: -----  
Start Meas : 16.01.01

Altitude: 176 m  
Temperature: 10.0 °C  
No. of Averages: 365 days (525600 à 1 min.)

Wind Direction Statistics Average and Maximum Wind Speeds



3.28. ábra. Szélirányok %-os alakulása az év során (bal), átlagos szélességek a szélirányok %-os alakulása szerint az év során

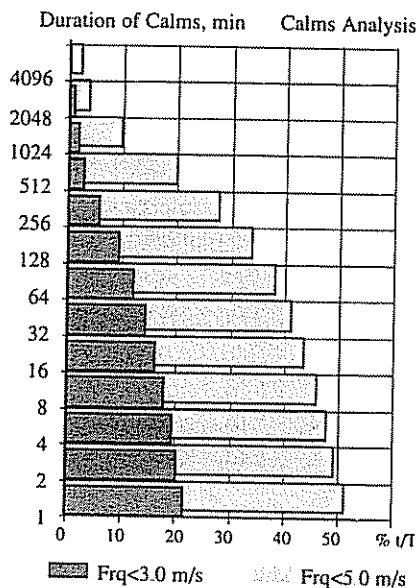
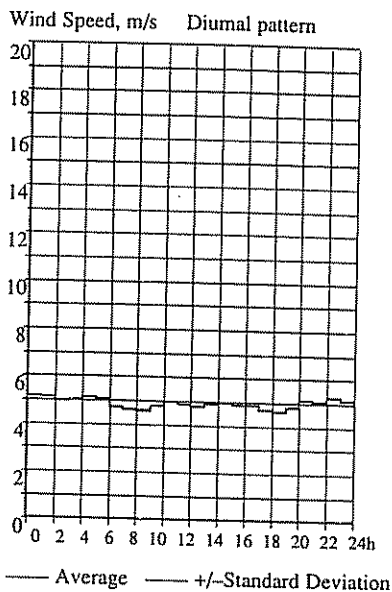
Calms Analysis

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

Average, min	12	21
Maximum, min	2205	5557

Site: -----  
Start Meas : 16.01.01

Altitude: 176 m  
Temperature: 10.0 °C  
No of Averages: 365 days (525600 à 1 min)



a)

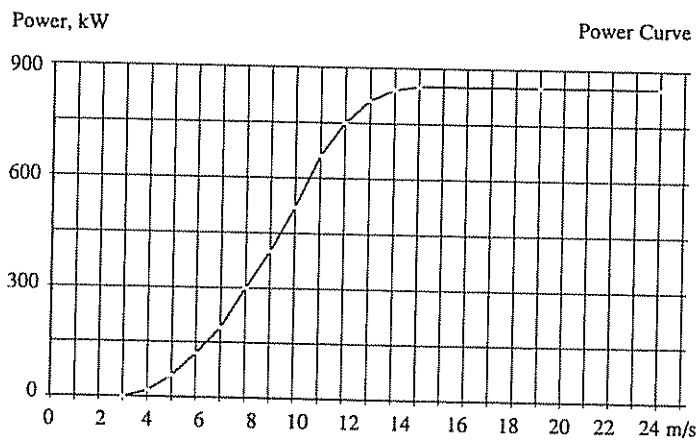
b)

3.29 ábra. A szélesség-analízis: a) a napi óras átlagos szélesség-eloszlás, b) a 3, ill. kisebb, valamint az 5, ill. kisebb szélességek %-os aránya az év során

V, m/s	Power, kW
0,00:	0,00
1,00:	0,00
2,00:	0,00
3,00:	0,00
4,00:	20,00
5,00:	60,00
6,00:	120,00
7,00:	190,00
8,00:	300,00
9,00:	400,00
10,00:	520,00
11,00:	660,00
12,00:	750,00
13,00:	810,00
14,00:	840,00
15,00:	850,00
16,00:	850,00
17,00:	850,00
18,00:	850,00
19,00:	850,00
20,00:	850,00
21,00:	850,00
22,00:	850,00
23,00:	850,00
24,00:	850,00

Wind Energy Converter:  
Vesta V52

Catalog: WEC CAT  
Hub Height: 60.0 m  
Control: Pitch

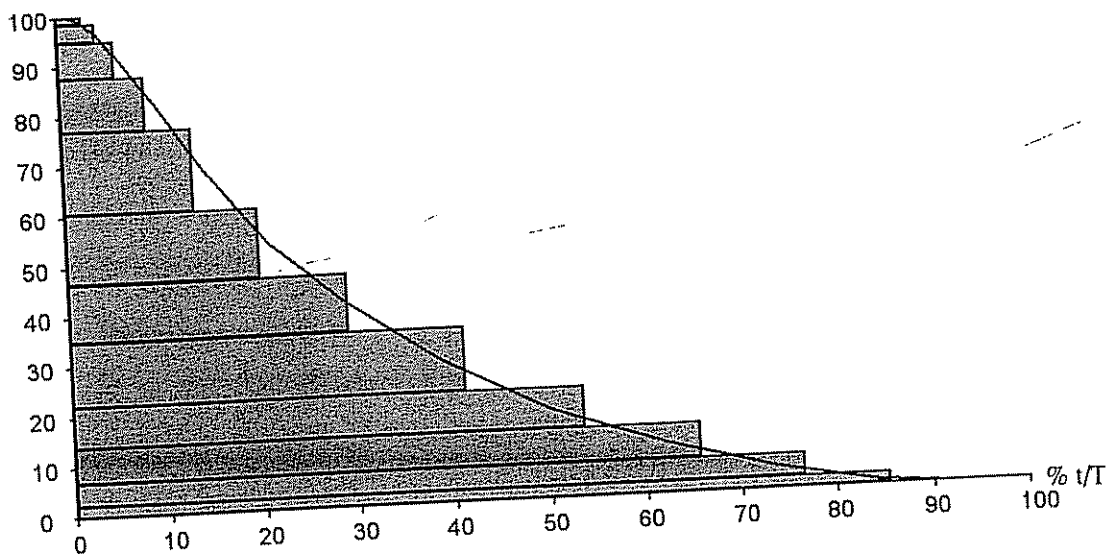


b)

a)

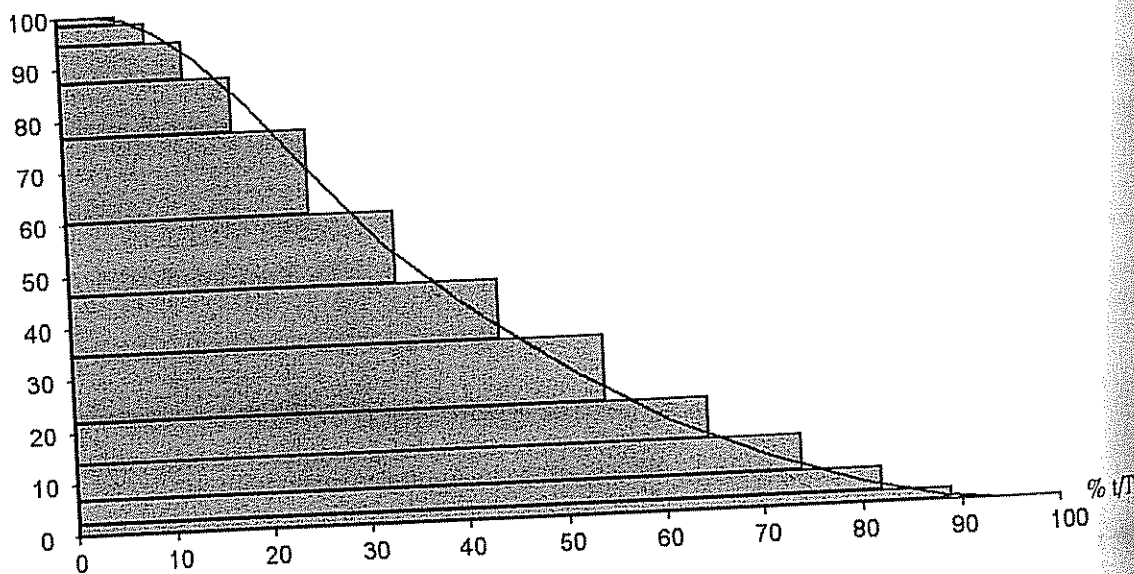
3.30. ábra. A választott VESTAS 800 kW névleges teljesítményű, (D=52 m) Pitch rendszerű generátor teljesítmény-jelleggörbéje a szélesség függvényében (a) táblázatosan, b) ábrázolva

P% (kWh)

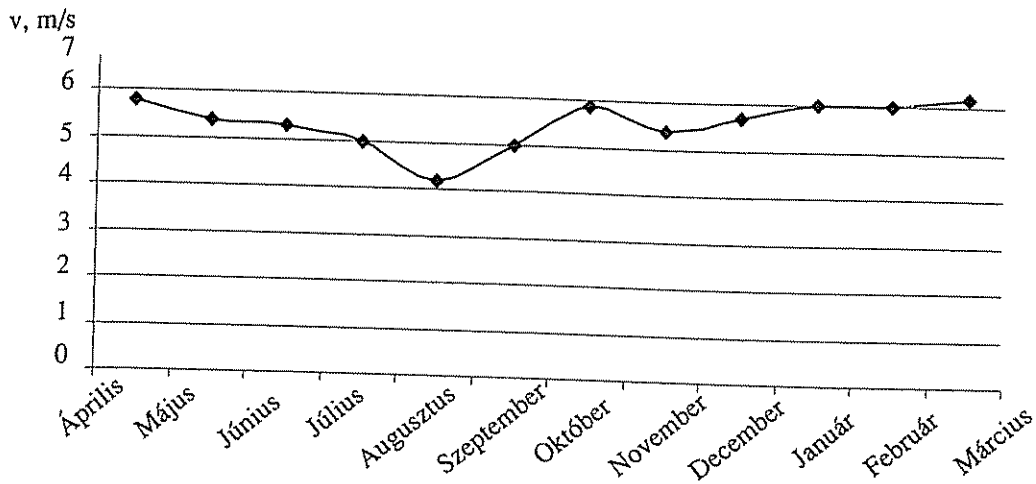


3.31. ábra. Energiatermelés és a gépkihhasználás, valamint a gépkihhasználás 60 m magas tornyon, VESTAS 800 kW névleges teljesítményű Pitch rendszerű generátor esetén, a mérési adatokkal, valamint Rayleigh- és Weibull-eloszlási függvényekkel számítva, az átlagos szélsébségek 30 m-ről 100 m-re átszámítva

P% (kWh)



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



3.33. ábra Éves átlagos szélességek

3.5 táblázat. Szélirányok %-os alakulása és a hozzájuk tartozó szélességek átlaga az év során

Sector (fok)	Frg, %	Avg, m/s
345-15	7,3	4,2
15-45	8,0	3,9
45-75	6,5	3,5
75-105	6,9	3,9
105-135	7,1	4,3
135-165	6,5	4,5
165-195	8,1	4,5
195-225	10,3	4,8
225-255	14,1	5,6
255-285	11,8	6,0
285-315	7,5	5,3
315-345	5,9	4,5

3.6 táblázat A 3, ill. kisebb, valamint az 5, ill. kisebb szélességek %-os aránya az év során (3.29. ábra)

Calms Analysis		
Calms, min	t/T(<3,0), %	t/T(<5,0), %
>= 1	21,7	51,2
>= 2	20,4	49,3
>= 4	19,4	47,9
>= 8	17,9	46,1
>= 16	16,2	43,7
>= 32	14,3	41,2
>= 64	12,1	38,3
>= 128	9,5	33,8
>= 256	5,7	27,7
>= 512	2,9	20,1
>= 1024	1,8	9,9
>= 2048	0,9	3,8
>= 4096	0,0	2,2
Averga, min.	12	21
Maximum, min.	2205	5557



3.7. táblázat. A teljesítmény és az energiatermelés 60 m magas tornyon, VESTAS 800 kW névleges teljesítményű Pitch rendszerű generátor esetén, a mérési adatokkal, valamint Rayleigh- és Weibull-eloszlási függvényekkel számítva (3.31. ábra)

V, m/s	Power, kW	t/T (meas), %	t/T (ray), %	t/T (wei), %
0-1	0,00-0,00	100,00	100,00	100,00
1-2	0,00-0,00	96,61	98,11	98,06
2-3	0,00-0,00	91,85	92,66	92,53
3-4	0,00-19,79	85,28	84,24	84,03
4-5	19,79-59,38	76,58	73,72	73,45
5-6	59,38-118,75	65,56	62,10	61,82
6-7	118,75-188,02	53,54	50,36	50,09
7-8	118,02-296,88	41,26	39,31	39,08
8-9	296,88-395,83	29,43	29,54	29,36
9-10	395,83-514,59	20,18	21,36	21,24
10-11	514,59-654,64	13,65	14,87	14,80
11-12	654,64-746,24	8,99	9,97	9,93
12-13	746,24-807,28	5,84	6,43	6,42
13-14	807,28-838,54	3,96	3,99	3,99
14-15	838,54-849,48	2,74	2,39	2,39
15-16	849,48-850,00	1,87	1,37	1,38
16-17	850,00-850,00	1,25	0,76	0,77
17-18	850,00-850,00	0,85	0,41	0,41
18-19	850,00-850,00	0,60	0,21	0,21
19-20	850,00-850,00	0,43	0,10	0,11
20-21	850,00-850,00	0,29	0,05	0,05
21-22	850,00-850,00	0,19	0,02	0,02
22-23	850,00-850,00	0,12	0,01	0,01
23-24	850,00-850,00	0,08	0,00	0,00
24-25	850,00-850,00	0,04	0,00	0,00
25-26	850,00-0,00	0,02	0,00	0,00
26-27	0,00-0,00	0,00	0,00	0,00

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

$$v_2 = v_1 \cdot \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}, \text{ m/s.} \quad (3.9)$$

Az előbbi összefüggést főként a mérnöki energiaszámításoknál használjuk. A szél irodalomban számos egyéb ajánlás is található, a meteorológiában például a már ismertetett logaritmus-függvényeket használnak [60.].

3 8. táblázat. A teljesítmény és az energiatermelés és a gépkihhasználás 100 m magas tornyon, VESTAS 800 kW névleges teljesítményű Pitch rendszerű generátor esetén, a mérési adatokkal, valamint Rayleigh- és Weibull-eloszlási függvényekkel számítva (3.32. ábra)

V, m/s	Power, kW	t/T (meas), %	t/T (ray), %	t/T (wei), %
0-1	0,00-0,00	100,00	100,00	100,00
1-2	0,00-0,00	97,12	98,63	98,60
2-3	0,00-0,00	93,47	94,64	94,54
3-4	0,00-19,70	88,88	88,35	88,17
4-5	19,70-59,09	81,86	80,24	80,00
5-6	59,09-118,19	73,84	70,89	70,62
6-7	118,19-187,13	64,48	60,93	60,65
7-8	187,13-295,47	54,18	50,95	50,68
8-9	295,47-399,96	43,71	41,45	41,21
9-10	399,96-512,15	33,39	32,81	32,61
10-11	512,15-652,21	24,83	25,26	25,11
11-12	652,21-744,54	17,44	18,92	18,81
12-13	744,54-806,06	12,51	13,79	13,72
13-14	806,06-837,88	8,83	9,77	9,73
14-15	837,88-849,24	6,04	6,74	6,72
15-16	849,24-850,00	4,44	4,52	4,52
16-17	850,00-850,00	3,18	2,95	2,96
17-18	850,00-850,00	2,25	1,87	1,88
18-19	850,00-850,00	1,67	1,16	1,17
19-20	850,00-850,00	1,19	0,70	0,70
20-21	850,00-850,00	0,85	0,41	0,41
21-22	850,00-850,00	0,64	0,23	0,24
22-23	850,00-850,00	0,47	0,13	0,13
23-24	850,00-850,00	0,35	0,07	0,07
24-25	850,00-850,00	0,25	0,04	0,04
25-26	850,00-0,00	0,18	0,02	0,02
26-27	0,00-0,00	0,12	0,01	0,01

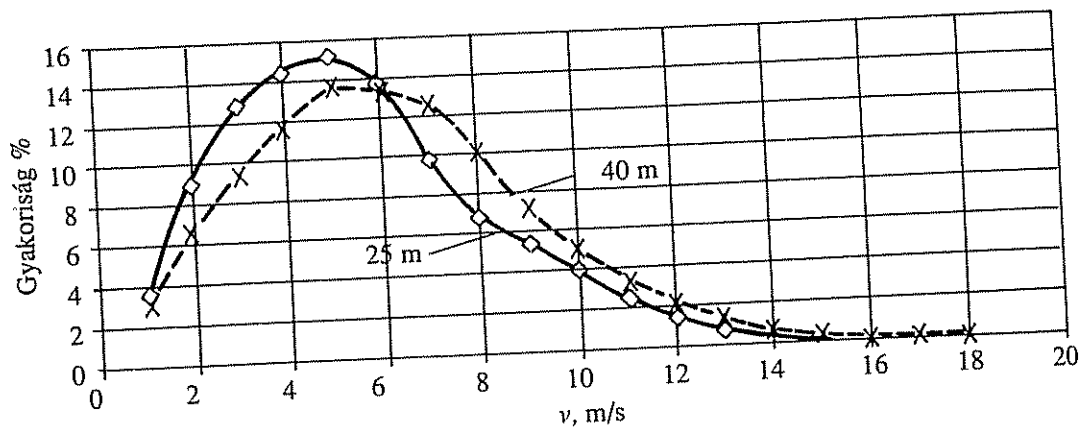
3 9. táblázat. Energiatermelés és a gépkihhasználás 60 m magas torony esetén (3.31. ábra)

<i>Calculated from Measurement:</i>	
Average Power:	222,3 kW
Energy (meas.):	1947,0 MWh
Capacity Factor:	26,1%
<i>Calculated from Rayleigh Distribution:</i>	
Average Power:	220,5 kW
Energy (meas.):	1931,2 MWh
Capacity Factor:	25,9 %
<i>Calculated from Weibull Distribution:</i>	
Average Power:	219,3 kW
Energy (meas.):	1921,5 MWh
Capacity Factor:	25,8 %

3.10. táblázat. Energiatermelés és a gépkihasználás 100 m magas torony esetén  
 A termelési növekmény: 735 400 kWh/év,  
 ami  $(735\,400 \times 17,8 =) 13\,090\,120$  Ft/év többleteredményt jelent. (3.32. ábra)

<i>Calculated from Measurement:</i>	
Average Power:	306,2 kW
Energy (meas.):	2682,4 MWh
Capacity Factor:	36,0 %
<i>Calculated from Rayleigh Distribution:</i>	
Average Power:	301,3 kW
Energy (meas.):	2639,8 MWh
Capacity Factor:	35,5 %
<i>Calculated from Weibull Distribution:</i>	
Average Power:	299,8 kW
Energy (meas.):	2626,5 MWh
Capacity Factor:	35,3 %

A kitevő értékének helyes megválasztására mutatjuk be a következő példát. Ha a mérést csak egy ponton végeztük volna a korrekciónál az 5-ös gyökkitevőt választottuk volna. Mivel a mérés két ponton folyt a kitevőt ellenőrizni tudtuk (3.11., 3.12. táblázat és 3.34. ábra).

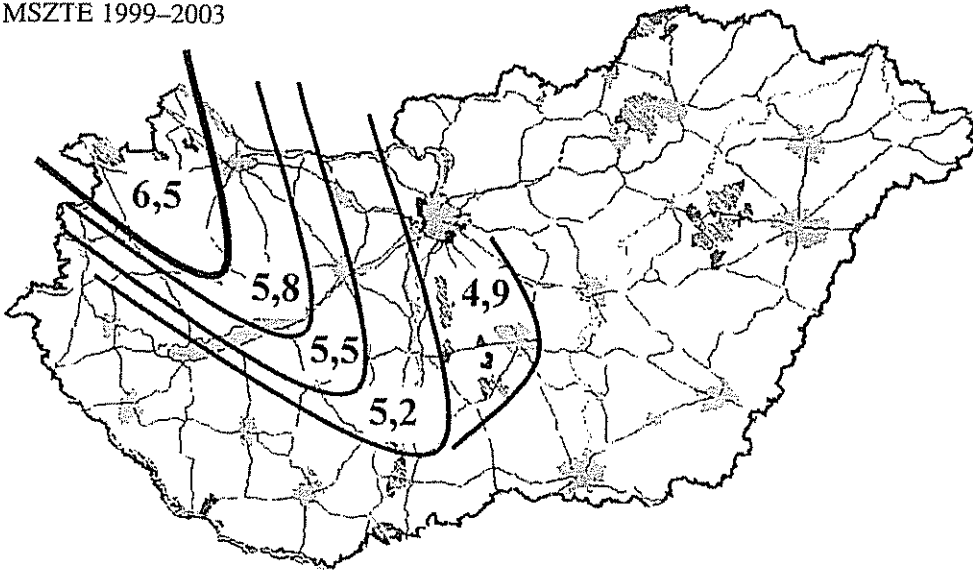


3.34 ábra. Eloszlási függvények a mérések alapján

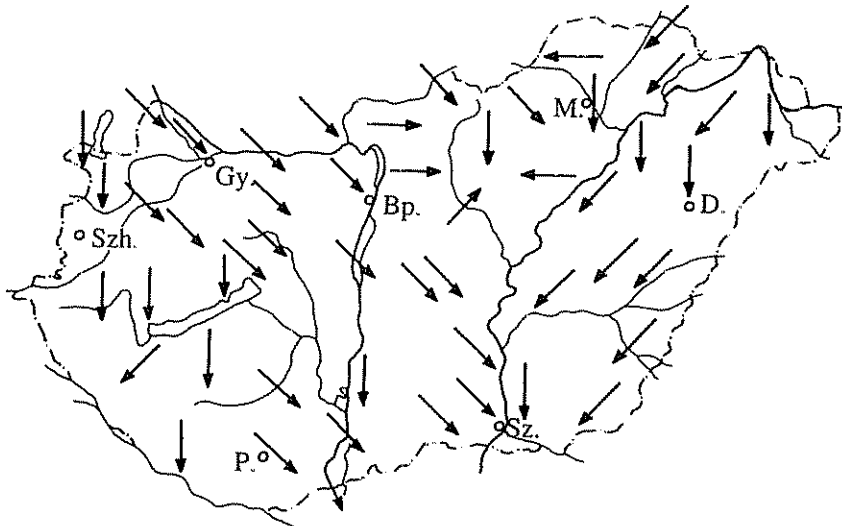
A példából látható, hogy helyesen 6-os hatványkitevőt kellett volna választani, mivel az 5-ös a nyerhető energia felülkalkulálását eredményezi [94.].

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

Az optimális telepítési hely kiválasztásához alapvetően kétféle adathalmazra van szükség. Egyrészt a potenciális területek pontos topográfiai adataira, illetve az azokra vonatkozó meteorológiai adatokra: főként az átlagos szélsősebességekre és a hozzájuk tartozó gyakorisági értékekre (3.13. táblázat, 3.35., 3.36. ábra).



3.35. ábra. Szélsebességek alakulása 35–45 m magasságban  
(globális feltételezés ezekben a körzetekben végzett 22 mérési hely alapján)



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

3.12. táblázat A magassági korrekciós tényezők megválasztása okozta hiba

	Magasság		Korrekciós tényező	Kalkulációs hiba	Kihatása az eredményre
	25 m	40 m*			
	V <sub>átl</sub>	V <sub>átl</sub>	$\alpha$	kWh/év	Ft/év
Számított értékek	4,95	5,5498	0,165 (1/6)	-102	-1 828
	4,95	5,4544	0,14 (1/7)	-47 767	-859 801
	4,95	5,6861	0,2 (1/5)	70 898	1 276 171
Mért érték	4,95	5,55		0	0

\* Számított értékek

3.13. táblázat. A magyarországi szélesebesség-mérési eredmények 1988. évi mérése

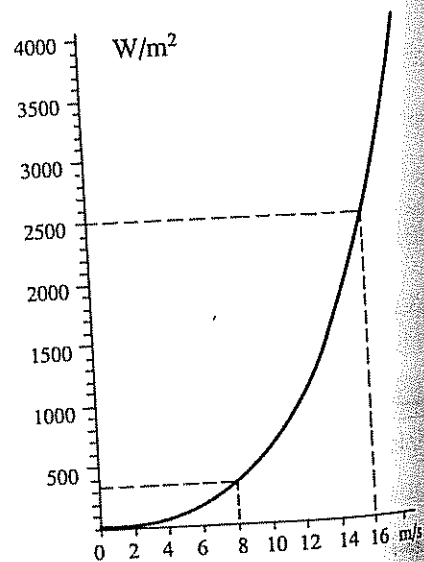
Mérés helye	Mérési magasság <i>m</i>	<i>V</i> m/s	<i>V</i> <sub>30</sub> m/s	<i>V</i> <sub>50</sub> m/s
Lébénymiklós	41	6,6	6,3	6,8
Környe	30	6,3	6,3	6,7
Mór	26	5,5	5,6	6,0
Balatonszabadi	30	5,6	5,6	6,0
Gerjen	30	5,1	5,1	5,5
Gyöngyöshalász	32	5,9	5,8	6,2
Szentlőrincváta	32	4,5	4,5	4,8
Sándorfalva	41	5,0	4,8	5,2
Tornyospálca	34	4,5	4,5	4,8
Kondoros	50	5,3	4,9	5,3
Kulcs**	35	6,1	6,0	6,4
<i>10 m magasságban végzett mérések és átszámítások (OMSZ mérések alapján)*</i>				
Budapest	10	1,8	2,2	2,4
Debrecen	10	2,5	3,1	3,3
Keszthely	10	3,0	3,7	4,0
Szeged	10	2,7	3,4	3,7
Mosonmagyaróvár	10	2,9	3,6	3,9
Győr	10	2,8	3,5	3,8
Sopron	10	3,6	4,5	4,8

\* Megjegyzés: A 10 m magasságban végzett szélérések igen eltérőek, amint az az átszámításokból ki is tűnik, összehasonlítva a nagyobb magasságokban végzett mérések eredményeivel

\*\*2000. évi mérés (MSZTE)

### 3.4. Szélenergia-potenciál meghatározása modellezéssel

Az előzőekben láttuk, hogy egyes telephelyeken a jellemző széljárás vizsgálata igen hasznos információkat szolgáltat a tervező számára. Ha azonban egyidejűleg több telephelyre, vagy egy nagy használható területre vonatkozó elemzésre van szükség pl. kiterjedtebb szélterőmű park, akkor a minden helyszínen történő mérésorozat helyett sokkal gyorsabb és kevésbé költséges eljárás a modellezés és előnyösebb is. Vagyis nem kell minden turbina jövőbeli helyén méréseket végezni. Összetett területeken a szélesebesség jelentősen változhat az egyes turbinák között, és így a mérések alapján gyakran alul-, vagy túlbecsült energia-hozamok adódhatnak az egész farmra vonatkozóan, ekkor a nagyobb hiba elkerülése miatt néhány kontrolmérés lehet indokolt. Ne



3.37. ábra. A fajlagos szélenergia a szélesebesség függvényében

feleljük, hogy kétszer akkora szélesség 7–8-szoros fajlagos energiatermelés növekménynek felel meg (3.37. ábra). A modellezés egy újabb eszköz a tervező kezében.

### 3.4.1. Fizikai modellezés

A fizikai modellezés a turbina-telephely kismintájának szélcsatornába helyezésével, és a kialakuló szélesség mérésével lehetséges. A terület összetettségének mértéke jól meghatározható a telephely környékére vonatkozóan, illetve a felszín egyenetlenségének mértéke, a szélfelőli oldalon, szintén meghatározható. Az áramlás különféle akadályok során áthaladva épül fel a szélcsatorna áramláskép kialakító szakaszában. A turbulencia, és az atmoszféra struktúrája legalább a semleges állapotra vonatkozóan jól modellezhető különféle áramlásterelő elemek alkalmazásával [74.].

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

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

### 3.4.2. Numerikus modellezés

A nagy teljesítményű számítógépek megjelenése lehetővé tette, hogy matematikai modellek segítségével elemezzük az áramlást a leendő szélfarmokon. A numerikus modellek nagy előnye, hogy a számítások elvégezhetők a bármikor elérhető alap meteorológiai adatok, vagy rövid, helyi mérési adatsorok alapján. Számos lehetőség kipróbálható, a helyi mérések időtartamának töredéke alatt. Ez különösen akkor nagyon praktikus, ha potenciális telephelyek egész sorozatából kell kiválasztani azt az egy-két helyet, melyeknél további vizsgálatok végzése indokolt. Ezek a matematikai modellek jelenleg nem pótolhatják a konkrét méréseket. [75.]

Mindegyik modellnek megvannak a maga korlátai. Néhány modell kimondottan alacsony felbontással (1–2 kilométeres), és különböző, a felszínre és az atmoszférára vonatkozó feltételezések mellett működik. A számos feltételezés többnyire elfogadható, amíg a modellt saját keretein belül használjuk. Így, ha a modell nincs felkészítve a hőmérsékletváltozás hatásainak figyelembevételére, akkor azt érdemben nem lehet használni erősen felmelegedő, majd lehűlő területekre. A modellek



nem működhetnek megbízhatóan, ha a fizikai jelenségek matematikai leírása hibás, vagy éppen a felbontás mértéke nem megfelelő, esetleg egyéb olyan kezdeti feltételeket is figyelembe kellene venni, amelyek a vizsgált jelenséggel nincsenek szoros összefüggésben. Ezért a modellek használata nagy körültekintést igényel. Emellett azonban ez igen hatásos eszköz, amelynek a jelentősége a számítástechnika fejlődésével párhuzamosan növekedni fog. [82.]

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

A primitív egyenletmodellek az atmoszféra folyamatainak, lehetőségekhez képest, a legjobb leírására szolgálnak. A leíró egyenletek háromdimenziósak és az időben változnak. A bemenő adatok és a peremfeltételek a meteorológiai mérések eredményeiből származtathatók [81.].

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

Az objektív elemző modellek sokkal egyszerűbb és hatékonyabb az adatok interpolálása az egész területre. A bemeneti adatok (egy vagy több) a területen található mérőállomásról származnak.

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

### 3.4.3. NOABL

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

A bemenő adatok digitalizált térképet tartalmaznak a vizsgált területről, valamint meteorológiai adatokat az ott található mérőállomásokról. Igen nagy jelentőségű, hogy a mérési eredmények a vizsgált helyhez minél közelebből származzanak, mert csak így biztosítható a feltételek hasonlósága a két helyen. Az adott helyen mért széljárás adatokat terjesztik ki az egész vizsgált területre. Amennyiben egynél több állomáson történt mérés, akkor a terület pontjaira ezeknek a mérési eredményeknek súlyozott átlagát veszik figyelembe. A távolabbi mérési pont eredményének kisebb a súlyszáma. A szélsébség változását, függőleges irányban, a felszín egyenetlenségének mértéke határozza meg. A modell nem teszi lehetővé, hogy figyelembe vegyék a felszín egyenetlenségi fokának változásait.

A számításokat a területre gondolatban kiterített háló csomópontjaira kell elvégezni (sűrűbb háló = nagyobb felbontás). A felhasználó bemeneti paraméterként meghatározza az áramlás típusát, úgy, hogy a vizsgált terület domborzata felett, és

körül „forrásokot” azonosít. A számításokat a modell a kiindulási adatok alapján a rácspontokra iteratív módszerrel végzi. Az áramlási képet főként vízszintesen vizsgálja, az áramlás módosításai is javarészt a vízszintes szélesség változásával lehetségesek. Ez gyakorlatilag az atmoszféra stabil rétegződésének feltételezését teszi lehetővé a határreteg felett, ami a hegyvidéki területeken túlegyszerűsítést eredményez, hiszen ott a domborzat hatása a troposzféráig kiterjedhet.

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

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

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

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

### 3.4.4. WAsP

A WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) az Európai Szélatlasz megszerkesztéséhez került kifejlesztésre (*Troen and Petersen, 1989*). Az egyes szél-turbina telephelyek széljárás adatait más, referencia mérőállomások adatai alapján határozták meg. A referencia adatokat általában a meteorológiai állomások hosszú távú adatsorai jelentették [62.].

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

Ezek a széljárás adatai kerülnek felhasználásra a turbina helyén, a helyi felszíni egyenetlenség mértékének, domborzatnak és a szélárnyékoló hatásoknak a figyelembevételével a tengelymagasságában várható széljárás meghatározására.

A WAsP számítási eljárásainak sajátossága, hogy polárkoordinátákat használ, s a középpontban a vizsgált helyszín van. Ennek eredményeképpen, a vizsgált hely felbontása igen jó, a csomópontok kb. 2 m-es távolságban vannak egymástól. Ez lehetővé teszi, hogy a hibák mértéke kisebb legyen. A program részben az atmoszféra fizikájának modelljével, részben a széljárás statisztikai leírásával dolgozik [77.].

A fizikai modell a következőket tartalmazza:

- felszíni-réteg hasonlóság – a logaritmikus szabály érvényesülésének feltételezésével,
- geosztrofikus ellenállás törvény – a felszíni szél meghatározására, a Rossby-szám hasonlósága alapján,

- stabilitási korrekciók – lehetővé teszi a semleges stabilitástól való eltérést,
- felszíni egyenetlenség változási modell – lehetővé teszi a változások figyelembevételét,

– árnyékolási modell – a helyi áramlást akadályozó tényezők figyelembevételére,  
 – domborzati modell – a domborzati elemek gyorsító hatásának modellezéséhez.

A széljárás statisztikai leírásához a referencia adatokból származtatott Weibull-eloszlást használja fel. Ezt az eloszlást a nagyobb szélesebességekhez való illesztéshez alakították ki, hiszen az alacsonyabb szélesebességek esetén az energiatermés is lényegesen alacsonyabb szintű, a kisebb hibák hatása elenyésző. A turbina tengelymagasságában levő szélesebesség eloszlását lehet illeszteni az egyes turbina jelleggörbékhez, és a várható teljesítmény valószínűségi görbéje számítható.

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

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

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

A WAsP alapvetően két fő részre bontható, elemzési és alkalmazási szakaszra. Ezek a következő számítási blokkokat tartalmazzák:

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

### 3.5. Magyarországi modellezések

A modellezés egyik helyszíne a Budapesttől ötvenkilenc kilométerre, délre lévő községben, Kulcsón (Koordinátái: EOv-x: 640275, EOv-y: 189933) található Öreg Debella domb. A terület mezőgazdasági gyümölcsöskert. A tervezett építési helyszín tengerszint feletti magassága 168 m, átlagosan 25–40 méterrel magasabban, mint a környező területek [90.].

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

A domborzati adatok digitális formában elérhetők több formátumban is. A szélméréséhez az Ammonit cég Windsiter 420-as jelű műszere került felhasználásra. Ez a készülék lehetőséget biztosított két anemométer és egy szélirányjelző által nyert ada-

tok statisztikai feldolgozására. Ennek megfelelően a szélességmérések két magasságon történtek, 15 illetve 35 méteren, a széliránymérő 35 méteres magasságban lett elhelyezve. A szélmérési adatok feldolgozása megegyezett a korábbi ábrákon bemutatottakkal.

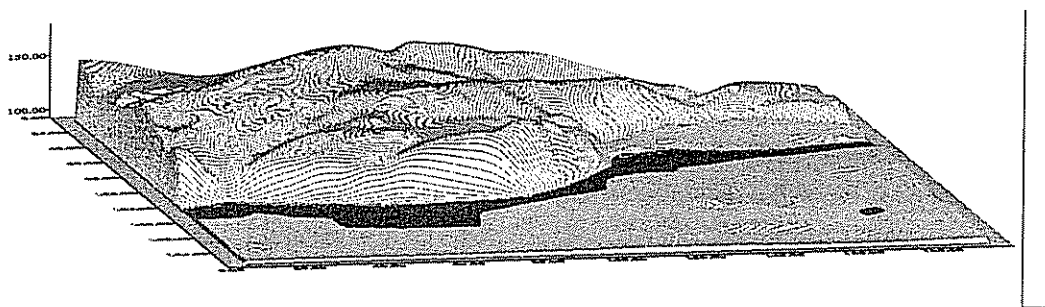
A vizsgált területen rendelkezésre álló szélenergia mértékének meghatározásához az Európai Szélatlasz kidolgozásánál bevált, az előzőekben röviden ismertetett WAsP-ot használtuk.

A WAsP által kiszámított eredmények alapján a *Surfer32 for Windows* program segítségével készíthetők el a jól áttekinthető háromdimenziós térképek. Látható a kiindulási domborzati adatok szintvonalas, illetve térbeli rajza (3.38. ábra); a pontok, melyre a WAsP elvégezte a számításait, a nyers széljárás térkép; az izovent széljárás térkép; valamint annak térbeli rajza (3.39. ábra).

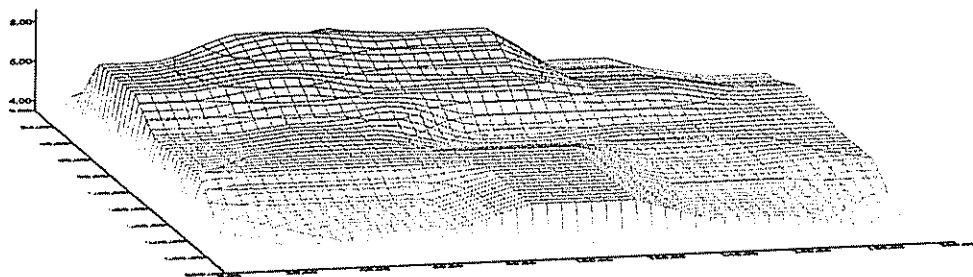
A terület széljárásának meghatározásán túl, négy különböző típusú szélturbina éves hozamát is kiszámítottam a WAsP segítségével.

A mérési eredményekből kiszámított széljárás értékek alapján az Öreg Debella domb alkalmas szélgenerátorok telepítésére. Az eredmények azonban rámutatnak arra, hogy Kulcs környékén nem ennek a dombnak a legkedvezőbb a széljárása, hanem attól Ny-DNy irányba, körülbelül 4 km távolságba eső másik dombnak, melynek magassága közel megegyezik a mérési hely magasságával, de kedvező alakja és a környékének kevésbé összetett domborzata jelentős szélességbeli különbséget eredményez (a mérési hely kb. 6,4 m/s-os átlagos szélessége helyett 6,6 m/s-os átlag várható) [94.].

A példától elvonatkoztatva e modellszámítás a mérési pont körüli területekre pontosan számol, de a távolibbi területekre messzemenő következtetéseket nem szabad



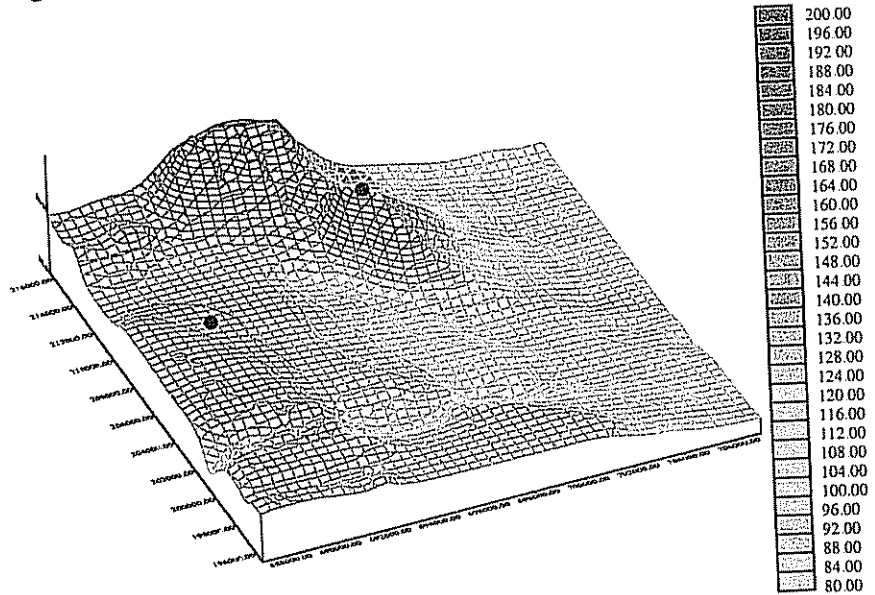
3.38. ábra. Domborzati modell Kulcsnál a Dunaparton, m



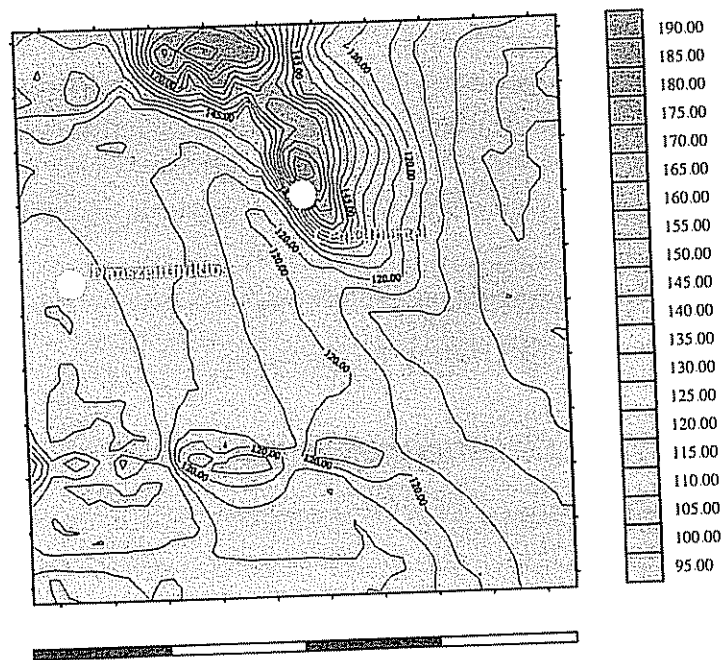
3.39. ábra. Szélességviszony az adott térségben, m/s

levonni. Ha kedvezőek az eredmények, akkor arra kell törekedni, hogy az egyébként optimális területre is felállítsunk egy mérőállomást. Amennyiben az ottani mérési eredmények is alátámasztják a számított eredmények helyességét, akkor a szélérőmű felállítását azon a területen célszerű elvégezni [96.].

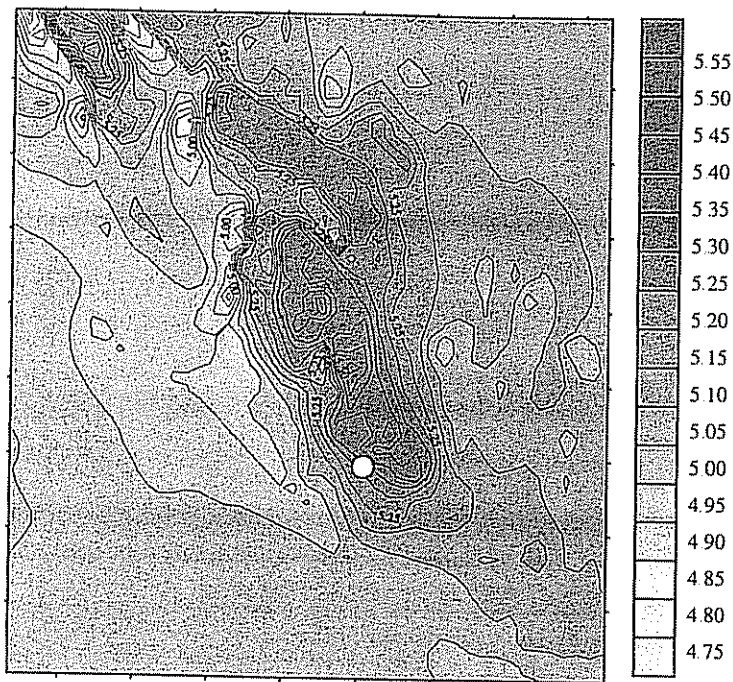
A másik példát (méréseink alapján) a gödöllői dombság déli végének lankáira mutatjuk be (Ceglédbercel térségéről) (3.40.–3.42. ábrák).



3.40. ábra. A háromdimenziós domborzati térkép a bejelölt, a két szélmérési bázisponttal



3.41. ábra. A terület kétdimenziós rétegvasalás domborzati térképe, a két szélmérési bázispont bejelölve



3.42. ábra. A terület kétdimenziós szintvonalas széltérképe, a kedvezőbb szélmérési bázispont környezetében (nagyobb felbontásban, a kedvezőbb helyek sötétebbek)

Az ábrán körbezárvra jeleztük azt a területet, amely szélerőműpark telepítésére leginkább alkalmas. A körbezárt területen 80–100 m magas tornyokon 25–30 db 1,0–1,5 MW teljesítmény turbina helyezhető el, azok kihasználási 23–26%-ra várható.

### A 3. fejezetben alkalmazott jelölések

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
$\rho$	sűrűség	$\text{kg/m}^3$
$\omega$	a Föld szögsebessége	1/s
$\phi$	földrajzi szélesség	o
$\kappa$	von Karman állandó	–
$A$	felület	$\text{m}^2$
$c$	mérettényező	m/s
$c_p$	hőkapacitás állandó nyomáson	J/K
$D$	helyettesítő magasság	m
$f$	Coriolis-paraméter	–
$f(v)$	a v sebességű szél relatív gyakorisága	%
$F_c$	Coriolis-erő	N
$F_p$	nyomásból származó erő	N
$g$	gravitációs gyorsulás	$\text{m/s}^2$
$h$	magasság	m
$H_0$	hőáram	W



$k$	alaktényező	-
$L$	hosszúság	m
$L_{MO}$	Monon-Obukov magasság	m
$m^*$	tömegáram	kg/s
$p$	légnomás	Pa
$P$	teljesítmény	W
$P_{max}$	maximális teljesítmény	W
$T$	időtartam	s
$T_0$	a felszín hőmérséklete	K
$v$	szélsébség	m/s
$v_\alpha$	zavartalan szélsébség	m/s
$v(t)$	pillanatnyi szélsébség	m/s
$v^*$	súrlódási sebesség	m/s
$v'(t)$	pill. szélsébség változó komponense	m/s
$v_a$	átlagos szélsébség	m/s
$v_R$	referencia szélsébség	m/s
$z$	felszín feletti magasság	m
$z_0$	felszíni egyenetlenség mértéke	m
$z_R$	referencia magasság	m

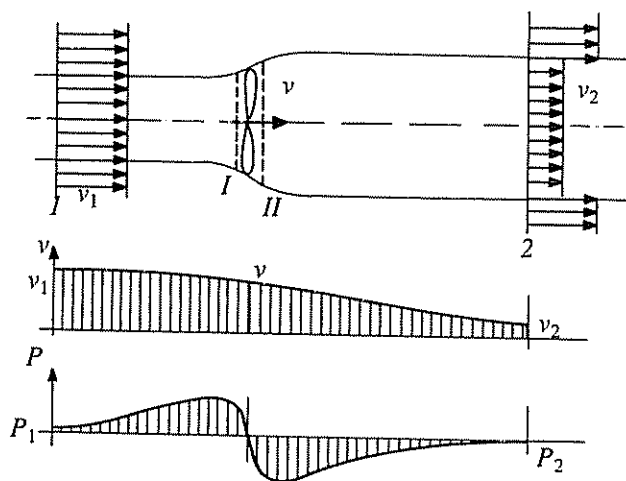
## 4. Szélerőgépek működésének elméleti alapjai

A szélerőgépekkel tudományos igénnyel először FAUSTUS VERANTIUS foglalkozott. 1595-ben írt „Machinale Novae” című könyve óta kísérhetjük nyomon a szélerőgép-elmélet fejlődését a szakirodalomban. A szélerőgépek fejlődéséhez PRANDTL és BETZ áramlástechnikai kísérletei szolgáltattak alapot és tették lehetővé a korszerű szélerőgépek kifejlesztését. A következőkben a szélerőgépek működésének elméleti alapjaiba vezetjük be az Olvasót.

### 4.1. Sugárelmélet

A klasszikus sugárelméletet most a vízszintes tengelyű szélerőgépek esetére tárgyaljuk, és feltételezzük, hogy a vizsgált áramlási térben az áramlás lamináris, a levegő sűrűsége állandó.

Helyezzünk az áramlási térbe egy tetszőleges konstrukciójú rotort úgy, hogy tengelye egyezzen meg az áramlás irányával, keresztmetszete pedig legyen  $A$  (4.1. ábra). Messze a rotor előtt (1. keresztmetszet) az áramlás sebessége legyen  $v_1$ . Ha a rotor tengelyét terheljük, azaz energiát veszünk le, a levegő sebessége lecsökken, hiszen mozgási energiájából veszített. Így a szélkerék mögött elég nagy távolságban (2. keresztmetszet) a levegő sebessége  $v_2$ .



4.1. ábra. Rotoron átáramló szél áramlási viszonyai

A rotoron átáramló levegő áramcsövet alkot, amelyre érvényes Bernoulli törvénye, esetünkben:

$$p + \frac{\rho}{2} v^2 = \text{konstans} \quad (4.1.)$$

Azonban az áramlás a rotor keresztmetszetében nem stacionárius, a forgó lapátok/szárnyak szaggatják az áramvonalakat. A rotor közvetlen környezetében (I. és II. keresztmetszetek között) ezért nem érvényes a Bernoulli-tétel, a nyomásfüggvénynek a rotor keresztmetszetében zérushelye van. (Közvetlenül a rotor előtt torlónyomás, a rotor után depresszió alakul ki.)

A rotoron történő átáramlás közepes sebessége legyen  $v$ . Biztos, hogy  $v_1 > v > v_2$ ,  $v$  értékét határozzuk meg. Írjuk fel a Bernoulli-egyenletet az I–I és II–2 pontok között:

$$p_I + \frac{\rho}{2} v_I^2 = p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2,$$

$$p_{II} + \frac{\rho}{2} v_{II}^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2$$

Jó közelítéssel vehetjük, hogy  $v_I \cong v_{II}$  és  $p_I \cong p_2$ , ezért a két egyenlet összeadva és rendezve azt kapjuk, hogy:

$$p_I \pm p_{II} = \frac{\rho}{2} (v_1^2 \pm v_2^2) \quad (4.2.)$$

A rotorkeresztmetszetben bekövetkező mozgásmennyiség megváltozásával a nyomáskülönbségből adódó erő tart egyensúlyt. Így:

$$\rho \cdot A \cdot v (v_1 \pm v_2) = A (p_I \pm p_{II})$$

A-val egyszerűsítve és a (4.2.) egyenlet szerinti azonossággal:

$$\rho \cdot v (v_1 \pm v_2) = \frac{\rho}{2} (v_1^2 \pm v_2^2), \text{ azaz}$$

$$v (v_1 \pm v_2) = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) (v_1 \pm v_2), \text{ ahonnan:}$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}, \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (4.3.)$$

Most vizsgáljuk meg azt, hogy mekkora a maximális teljesítmény, amely a rotor tengelyén levehető. Az A keresztmetszetű rotor teljesítménye:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} \cdot (v_1^2 \pm v_2^2) \quad (4.4.)$$

Rendezve és a műveleteket elvégezve:

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^3 + v_2 v_1^2 \pm v_1 v_2^2 \pm v_2^3)$$

Emeljük ki  $v_1^3$ -öt:

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \left( 1 + \frac{v_2}{v_1} \pm \frac{v_2^2}{v_1^2} \pm \frac{v_2^3}{v_1^3} \right).$$

Most alkalmazzuk az  $x = \frac{v_2}{v_1}$  jelölést. Ezzel a teljesítményfüggvény:

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 (1 + x \pm x^2 \pm x^3) \quad (4.5.)$$

Az elérhető teljesítménymaximum ott van, ahol a teljesítményfüggvény első deriváltja = 0, azaz:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 (1 \pm 2x \pm 3x^2) = 0$$

Mivel csak a zárójeles tag lehet zérus, keressük  $x$  gyökeit. A másodfokú egyenletek megoldóképletével azt kapjuk, hogy  $x = -1$  és  $x = \frac{1}{3}$ . Az  $x = -1$  gyök nem lehet valós, mert ennek fizikai tartalma az lenne, hogy megfordítjuk a szél irányát. A helyes gyök így az  $x = \frac{1}{3}$  azaz:

$$v_2 = \frac{1}{3} v_1, \text{ m / s} \quad (4.6.)$$

A kapott eredmény azt jelenti, hogy a maximális teljesítményt a rotor tengelyén akkor kapjuk, ha a szél rotor előtti sebességét egyharmadára csökkentjük. A teljesítmény maximuma tehát:

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \rho \cdot A \cdot v_1^3 \left( 1 + \frac{1}{3} \pm \frac{1}{9} \pm \frac{1}{27} \right) = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v_1^3 \quad (4.7.)$$

A  $16/27$  tényező tehát a rotor ideális (vagy maximális) teljesítménytényezője, értéke  $c_{W\max} \approx 0,5926$ , ami azt jelenti, hogy bármely rotorral a szél mozgási energiájának maximum 60%-át lehet kihasználni. Ez az ideális határ, nem készíthető olyan rotor, amely ezt az értéket elérné.

## 4.2. A teljesítménytényező

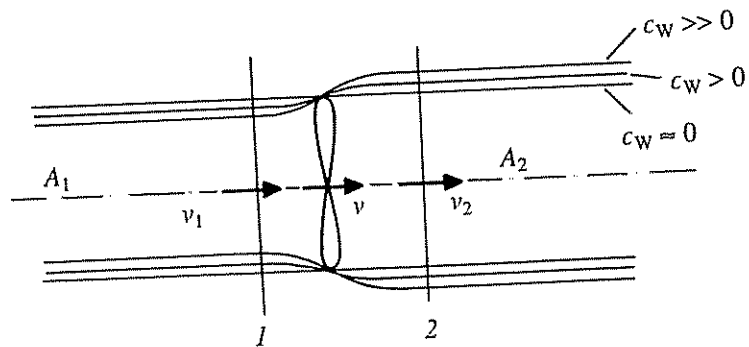
A teljesítménytényező a rotor energetikai hatásfoka, amely megmutatja, hogy a rotor – adott terhelés mellett – milyen mértékben használja ki a szél mozgási energiáját. Nevezhetnénk hatásfoknak is, azonban a szélenergia szakirodalma évtizedek óta a teljesítménytényezőt használja, úgyhogy maradjunk ennél a megnevezésnél.

A széláramba helyezett rotor tehát megváltoztatja az áramlási viszonyokat az áramlási térben, feltéve, hogy tengelye szabadon elfordulhat, és nyomatékkal terheljük. A terheletlen, szabadon forgó rotornak (üresjárat) nincs számottevő hatása a légáramra.

Most vizsgáljuk meg, hogyan befolyásolja a teljesítménytényező az áramlási viszonyokat.

Először írjuk fel a teljesítménytényező definíció szerinti összefüggését. Ha a terhelés kicsi, a rotor csak alig észrevehetően változtatja meg az áramlási teret (4.2. ábra). Jó közelítéssel írhatjuk tehát, hogy a teljesítménytényező:

$$c_w = \frac{P_1 \pm P_2}{P_1}, \text{ vagy mivel } P_1 = \frac{\rho}{2} v_1^3 A_1; P_2 = \frac{\rho}{2} v_2^3 A_2.$$



4.2. ábra. Az áramcső változása a terhelés hatására

A kontinuitási törvény szerint  $v_1 A_1 = v_2 A_2$ .

$$c_w = \frac{\left(\frac{\rho}{2} v_1^2 \pm \frac{\rho}{2} v_2^2\right) A_1 v_1}{\frac{\rho}{2} v_1^3 \cdot A_1} = 1 \pm \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2. \quad (4.8.)$$

A (4.8.) egyenlet igen fontos elméleti összefüggés, amely lehetővé teszi az áramlási tér leírását a rotor által meghatározott áramcsőre. Ha az egyenletet a sebességviszonyra rendezzük:

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{1 \pm c_w} \quad (4.9.)$$

Ha a terhelést növeljük, a rotor keresztmetszetén átmenő áramcső alakja megváltozik. Mivel  $\rho = \text{konstans}$ , írhatjuk, hogy:

$$A_1 \cdot v_1 = A \cdot v = A_2 \cdot v_2.$$

A (4.3.) egyenlet alkalmazásával ebből

$$A_1 \cdot v_1 = A \cdot \frac{v_1 + v_2}{2}, \text{ ahonnan}$$

$$A_1 = \frac{A}{2} \left( 1 + \frac{v_2}{v_1} \right), \text{ vagy a (4.9.) egyenlet behelyettesítésével:}$$

$$A_1 = \frac{A}{2} \left( 1 + \sqrt{1 \pm c_w} \right), m^2 \quad (4.10.)$$

Mivel a gyök alatti kifejezés mindig kisebb, mint 1, ebből következően  $A_1 < A$ . (Emlékezzünk, hogy  $A$  a rotor keresztmetszete!)

Úgy is fogalmazhatunk, hogy a rotoron áthaladó áramcső a rotor előtt kontrahál (szűkül), a teljesítmény növekedésével a rotorra egyre kevesebb levegő jut. Mivel a teljesítménytényező limitált, a kontrakciónak is van egy elméleti maximális értéke:

$$\kappa_{\max} = \frac{A_{1\min}}{A} = \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 \pm c_{w\max}} \right) \cong 0,81.$$

Végeredményben tehát azt állapíthatjuk meg, hogy a terhelt rotoroknál a terheléssel arányosan az input energia csökken. Ezt a teljesítménytényező számításakor érdemes figyelembe venni, különben nem a valós eredményt kapjuk.

Hasonlóképpen járhatunk el az  $A_2$  keresztmetszet meghatározásánál is. A rotor után az áramvonalak szóródnak, a rotor hatásának eredményeként az áramcső a rotor környezetében egy fal nélküli diffúzorba megy át. A kontinuitási törvényből az  $A_2$  keresztmetszetre a következő (elméleti) összefüggést kapjuk:

$$A_2 = \frac{A}{2} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{1 \pm c_w}} \right), m^2 \quad (4.11.)$$

Kiszámíthatjuk a diffúziót is, amelynek maximális értéke:

$$\delta_{\max} = \frac{A_{2\max}}{A} \cong 1,29$$

Az áramcső teljes keresztmetszet-változására pedig azt kapjuk, hogy:

$$\Delta A_{2,1} = A_2 \pm A_1 = \frac{A}{2} \left( \frac{1 \pm \sqrt{(1 \pm c_w)^2}}{\sqrt{1 \pm c_w}} \right) = \frac{A}{2} \frac{c_w}{\sqrt{1 \pm c_w}}, m^2. \quad (4.12.)$$

Hangsúlyozzuk, hogy a levegőnek rotoron történő átáramlása ennél lényegesen bonyolultabb, nem is vizsgáltuk, hogy mi történik a rotor keresztmetszetében a szél-



lel. Enélkül is sikerült azért megmagyarázni az áramlási viszonyokat a rotor előtt és után, és megmutatni, hogy az áramlási tér torzulása a kivett energiától, azaz az aktuális teljesítménytényezőtől függ döntő mértékben.

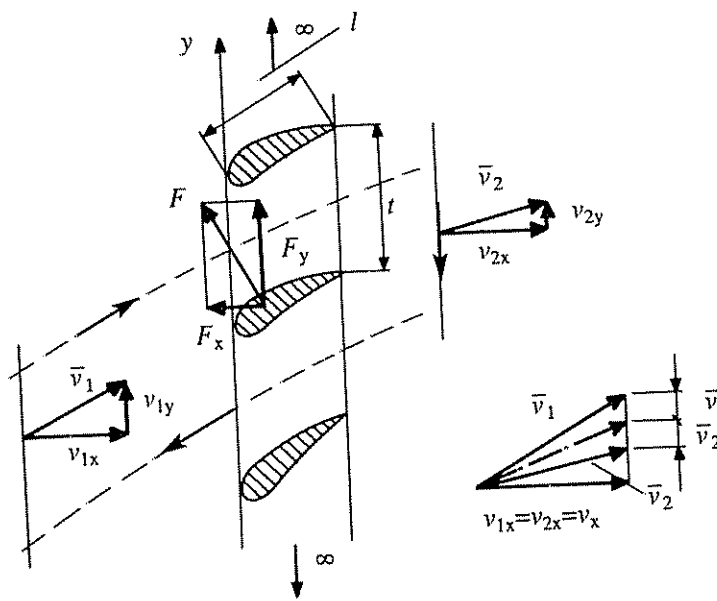
### 4.3. Szárnyrács-elmélet

Az előzőekben közömbös volt számunkra, hogy milyen az áramlás útjába helyezett rotor és mi történik a rotorban, hogyan megy végbe az energiaátalakulás. Most ezt vizsgáljuk.

A rotor nagyon sokféle kialakítású lehet, azonban ha áramlástechnikai szempontból vizsgáljuk a különféle rotorokat J. VAN BRIEL nyomán a rotorelemek kialakítása alapján két fő kategóriát állíthatunk fel: a rotorok vagy szárnytípusúak, vagy turbina-típusúak lehetnek. A kategorizálás két szempont alapján történik: milyen a rotorelem keresztmetszete és milyen sűrűn helyezkednek el a rotorelemek a rotoron. (Ez utóbbi fogalmat később pontosan megmagyarázzuk.)

A szárnytípusú rotoroknál a rotorelem keresztmetszete a repülőgépeknél használatos sajátos szárnyprofil, ill. ahhoz hasonló, és viszonylag kevés számú elem alkotja a rotort. Elsőként egy ilyen, szárnytípusú rotor működését tanulmányozzuk.

Vegyünk egy több lapából álló rotort, amelynek  $r$  sugaránál  $dr$  vastagságú körmetszetet képezzünk és azt síkba terítjük (4.3. ábra). Így áramlástechnikai szempontból egy szárnyrácsot kapunk. Feltételezzük, hogy a metszet ismétlésével a szárnyrács mindkét irányban végtelen hosszúságúvá tehető.



4.3. ábra. Szárnyrács származtatása és áramlási viszonyai

A szárnyrács tulajdonságait a szárnyprofil és a rács sűrűsége határozza meg. A profiltól most tekintsünk el, és legyen a rács ritka, azaz a profilhossz ( $l$ ) és osztás ( $t$ )

$$\text{viszonya } \frac{l}{t} \gg 1.$$

Ebben az esetben egy-egy elem egyedülálló szárnynak tekinthető, az elemek kölcsönhatását elhanyagolhatjuk.

Megfűjva (szélbe helyezve) a szárnyelemet, rá  $F$  nagyságú erő hat, amelyet praktikusán axiális ( $F_x$ ) és tangenciális ( $F_y$ ) komponensekre bonthatunk. Az  $F_y$  erő a felhajtóerő, amely a szárnyat „emelve”  $y$  irányban igyekszik mozgatni, míg az  $F_x$  a szárny ellenállása, amelyet a légárammal szemben kifejt. Határozzuk meg  $F_x$  és  $F_y$  értékét egyetlen szárny esetére a 4.3. ábra jelöléseinek felhasználásával.

Az impulzustétel szerint:  $F_y = m \cdot \Delta v_y$ , ahol  $m$  az áramlási sík tömegárama, esetünkben:

$$m = \rho \cdot t \cdot v_{1x}, \text{ a tangenciális sebességkülönbség pedig:}$$

$$\Delta v_y = v_{1y} - v_{2y}.$$

Ezzel

$$F_y = \rho \cdot t \cdot v_{1x}(v_{1y} - v_{2y}) = \rho \cdot v_{1x} \cdot \Gamma \quad (4.13.)$$

ahol  $\Gamma = t(v_{1y} - v_{2y})$  a szárny körüli cirkuláció, a szaggatott zárt görbén.

Az  $F_x$  erő meghatározásához írjuk fel a Bernoulli-egyenletet az 1 és 2 keresztmetzetekre:

$$p_2 \pm p_1 = \frac{\rho}{2}(v_1^2 \pm v_2^2) = \frac{\rho}{2}(v_{1x}^2 + v_{1y}^2 \pm v_{2x}^2 \pm v_{2y}^2) = \frac{\rho}{2}(v_{1y}^2 \pm v_{2y}^2).$$

Az  $F_x$  erő ebből a nyomáskülönbségből származik:

$$F_x = t(p_2 \pm p_1) = t \cdot \frac{\rho}{2}(v_{1y}^2 \pm v_{2y}^2) \quad (4.14.)$$

A nevezetes szorzat szabályát alkalmazva végül  $F_x$ -re a következő összefüggést kapjuk:

$$F_x = \frac{\rho}{2}(v_{1y} + v_{2y})\Gamma. \quad (4.15.)$$

A szárnyra ható erők eredője:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \rho \cdot \Gamma \sqrt{v_x^2 + \left(\frac{v_{1y} + v_{2y}}{2}\right)^2}.$$

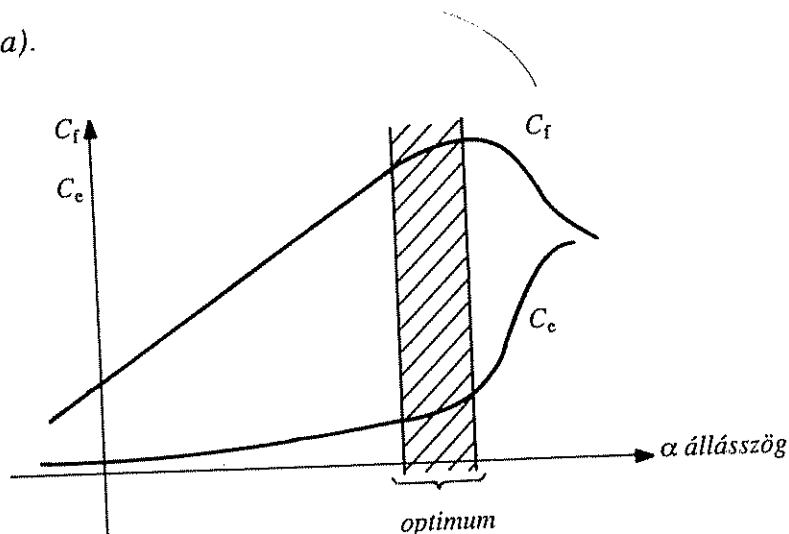
A gyökjel alatti kifejezés a szárny rácstól távol lévő, zavartalan megfűvási sebessége ( $v$ ), kísérletileg bizonyítható.

$$F = \rho \cdot \Gamma \cdot v \quad (4.16.)$$

Mint láttuk, a szárnyra ható erőket a cirkuláció lényegesen befolyásolja. A cirkuláció viszont a tangenciális sebességek függvénye, amelyeket két tényező, a szárnyprofil alakja és állásszöge ( $\alpha$ ) határoz meg. Mivel  $F$  merőleges  $v$  irányára, írhatjuk, hogy:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_x}{F_y} = \frac{v_{1y} + v_{2y}}{2v_{1x}} \quad (4.17.)$$

Energetikai szempontból nyilván az az előnyös, ha  $F_x \rightarrow 0$ , azaz  $F_y$  minél nagyobb. Egy szárny esetén létezik egy optimális megfúvási szög, ahol a  $\frac{c_f}{c_e}$  hányados a legnagyobb (4.4. ábra).



4.4. ábra. A  $c_f$  és  $c_e$  változása az állásszög függvényében

A szárnyprofilokat általában kísérleti úton állítják elő, és szélcsatornában vizsgálják tulajdonságaikat. Jellemzésükre a felhajtóerő-tényező, az ellenállás-tényező és a siklószám használatos.

A felhajtóerő-tényező (az eddig alkalmazott jelöléseinkkel):

$$c_f = \frac{F_y}{\frac{\rho}{2} v^2 \cdot A} \quad (4.18.)$$

Az ellenállás-tényező:

$$c_e = \frac{F_x}{\frac{\rho}{2} v^2 \cdot A} \quad (4.19.)$$

(Itt  $A$  egy lapát vetülete. A lapát ábrára merőleges hosszából egységnyi hosszt ki választva  $A = 1l$ , ahol  $l$  a lapát húrhossza.)

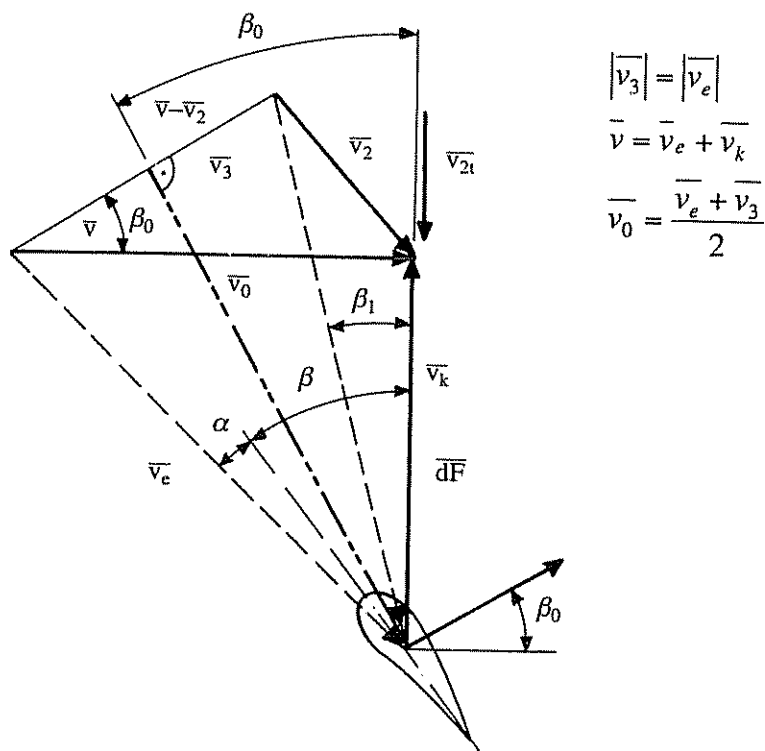
Mindkét tényező függvénye a profilalaknak és az állásszögnek. A fejlesztések célja általában az azonos állásszöghöz tartozó minél nagyobb  $c_f$  és ugyanakkor minél kisebb  $c_e$  elérése. A 4.4. ábra a felhajtóerő és az ellenállási tényező változásának tendenciáját ábrázolja az állásszög függvényében.

A siklószám a szárnyprofil jóságára jellemző mutató:

$$\varepsilon = \frac{F_y}{F_x} = \frac{c_f}{c_e} \quad (4.20.)$$

A szárnytípusú szélérőgépeken alkalmazott profilkok általában konvex, ívelt jellegűek, síklószámuk 80–120 között változik. Ez igen kedvező felhajtóerő-ellenállás viszonyt jelez, és az elméleti határértékhez közeli teljesítménytényező elérését teszi lehetővé.

Most vizsgáljuk a 4.3. ábra szerinti szárnyrácsot „működés” közben, azaz tegyük lehetővé a rácselemek  $y$  irányú elmozdulását. A rotorra vonatkoztatva ez azt jelenti, hogy a rotor a tangenciális felhajtóerő hatására forog, forgómozgását a tengely terhelésének változtatásával szabályozzuk. A 4.5. ábra szemlélteti egy kiemelt rácselem sebességviszonyait lényegesen leegyszerűsítve. (Ahhoz, hogy tipikus üzemi helyzetet tanulmányozhassunk, a rotorelemet tengelye körül a 4.3. ábrán látottakhoz képest jelentősen elforgattuk.)



4.5. ábra. Mozgó rácselem sebességviszonyai

A szél az elmozdulás (forgási sík) irányára merőlegesen érkezik ( $\bar{v}$ ). A  $\bar{v}_k$  (kerületi) sebességgel mozgó rácselemre a látszólagos áramlási irány a két sebességvektor különbsége:  $\bar{v}_l = \bar{v} \pm \bar{v}_k$ . A megfúvás szöge  $\alpha$ , a lapátszög (a profilirány szaggatott vonala és az elmozdulás iránya közötti szög)  $\beta$ . Az áramlás szöge e két szög összege:  $\phi = \alpha + \beta$ . A rácson történő átáramlás eredményeként a kilépő szélnek tangenciális komponense ( $\bar{v}_{2t}$ ) is van, azaz a rotor „megcsavarja” a szelet.

A  $\bar{v}_e$  a lapáttal együtt mozgó rendszerben a lapátra rálépő levegő relatív sebessége,  $\bar{v}_3$  a lapátról lelépő levegő relatív sebessége,  $\bar{v}_0$  pedig a szélssebesség vektori átlaga. Ez a szárny megfúvási sebessége. Erre az irányra merőleges a keletkező erő,  $d\bar{F}$ .

A  $\bar{v}_3$  kerületi sebességgel bezárt szöge  $\beta_1$ , a  $\bar{v}_0$  kerületi sebességgel bezárt szöge  $\beta_0$ . (itt feltételezzük, hogy sugárirányú áramlás is fellép, tehát a lapátról lelépő közeg átlagos tengelyirányú sebessége csökken.)

Írjuk fel most az impulzustételt a tangenciális sebességkomponenssel a rotorból  $r$  sugáron kimetszett  $dr$  hosszúságú szárnyrácsra, ha a rotorelemek száma  $N$ . A mozgásmennyiség megváltozása tangenciális irányban eredményezi a felhajtóerő tangenciális komponensét egy lapátra:

$$dF \cdot \sin \beta_0 = \rho \cdot \frac{2r\pi}{N} \cdot dr \cdot v \cdot v_{2t} \quad (4.21.)$$

Ugyanakkor a felhajtóerőre írhatjuk szintén egy lapátra

$$dF = c_f \cdot \frac{\rho}{2} v_0^2 \cdot l \cdot dr \quad (4.22.)$$

A  $v = v_0 \sin \beta_0$ , a  $t = \frac{2r\pi}{N}$  (a rácselemek helyi osztásértéke) azonosságokkal (4.21.) és (4.22.) egyenleteket egymással egyenlővé téve, egyszerűsítésekkel és átrendezve:

$$\frac{l}{t} \cdot c_f = 2 \cdot \frac{v_{2t}}{v_0} \cdot \frac{v_c}{v_0 \sin \beta_0} \quad (4.23.)$$

Bizonyos esetekben a  $\frac{v_c}{v_0 \sin \beta_0}$  értéket közelítőleg egynek választják. Láttuk, hogy a szél energiáját akkor tudjuk kihasználni maximálisan, ha sebesség axiális komponense egyharmadára csökken. Ez a  $v_3 \sin \beta_1 = v/3$  feltételt jelenti.

Ezért:

$$v_3 \sin \beta_1 = v_e \frac{1}{3} \cdot \sin \phi = v_e \frac{1}{3} \sin(\alpha + \beta), \text{ ahol } |\bar{v}_e| = |\bar{v}_3|, \text{ így } \sin \beta_1 = \frac{1}{3} \sin(\alpha + \beta)$$

További azonosságok a sebességháromszögekből:

$$v_{2t} = \frac{2}{3} v \cdot \operatorname{tg} \beta_0, \text{ és } v_0 = \frac{2}{3} \cdot v$$

Ezeket behelyettesítve a 4.23. egyenletbe, és egyszerűsítésekkel végül az

$$\frac{l}{t} \cdot c_f = 3 \cdot \operatorname{tg} \beta_0 \cdot \sin \beta_1 \quad (4.24.)$$

egyenletet kapjuk. A rotor sugara mentén az osztás ( $t$ ) változik. Emellett minden profilnak meghatározható egy optimális beállítási szöge ( $\beta$ ). A legjobb hatásfok úgy érhető el, ha a rotorelem minden sugármetszetében azonos az áramlás szöge ( $\phi$ ). Szük-

séges tehát a szárny sugárirányú elcsavarása és a szárnymetszet hosszának sugármenti változtatása.

Mielőtt a rotorméretezés módszerét fentiek alapján összefoglalnánk, még egy fontos rotorjellemzőt kell bevezetnünk. A különféle szélerőgép-rotorokat alapvetően az ún. gyorsjárású tényezővel különböztetjük meg egymástól. A gyorsjárású tényező (a teljes rotorra vonatkoztatva):

$$\lambda = \frac{v_k}{v} \quad (4.25.)$$

azaz a rotor legkülső pontján (esetünkben a szárnyvégen) mérhető kerületi sebesség és a szélesebbég viszonyozsáma. Eszerint ha  $\lambda < 4$  lassújárású, ha  $\lambda > 4$  akkor gyorsjárású rotorról (szélerőgépről) beszélünk. A  $\lambda$  a rotorsugár függvényében változik, és a helyi gyorsjárású tényezővel fejezzük ki:

$$\lambda_r = \frac{r \cdot \omega}{v} = \operatorname{tg} \phi \quad (4.26.)$$

ahol:  $\omega$  a rotor szögsebessége, [rad/s]

A szárnytípusú rotorok aerodinamikai méretezését ezek után a következők szerint végezzük el.

Kiindulási alapadat a szélerőgép (rotor) névleges teljesítménye ( $P_n$ ), amelyet egy meghatározott, még viszonylag nagy relatív gyakoriságú szélesebbégnél (nevezzük ezt méretezési szélesebbégnek,  $v_m$ ) és meghatározott teljesítménytényezővel ( $c_w$ ) kívánunk elérni. A névleges teljesítmény ezekkel az adatokkal:

$$P_n = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_m^3, \text{ W} \quad (4.27.)$$

ahonnan a rotor sugara:

$$R = \sqrt{\frac{2P_n}{\pi \cdot \rho \cdot c_w \cdot v_m^3}}, \text{ m} \quad (4.28.)$$

Ezt követően megválasztjuk a rotorszárnyak számát ( $N$ ), amely gyorsjárású rotoroknál 1–4, tipikusan 3. A gyorsjárású tényező a rotorelemek számával szoros összefüggésben van, pl.  $N = 3$  esetén  $\lambda = 6–8$ .

Kiválasztunk egy szárnyprofil, amelynek alakja a szárny mentén nem változik, viszont mérete és beállítási szöge igen. A profil egyúttal meghatározza az optimális állásszöget ( $\alpha$ ), amely általában 4–8° között változik. (A különféle szárnyprofilok  $c_f = f(\alpha)$ ,  $c_e = f(\alpha)$ ,  $\varepsilon = f(\alpha)$  függvényeit táblázatban összefoglalva adják közre, ezekből  $\alpha$  kikereshető.)

A rotorszárny hossza (a rotor sugara) mentén csavart felület, az egyes, lehetőleg minél sűrűbb osztással vett keresztmetszetekre az alábbi számításokat kell elvégezni.

Elsőként meghatározzuk a helyi ( $r$  sugárhoz tartozó) gyorsjárású tényezőt:

$$\lambda_r = \lambda \cdot \frac{r}{R} \quad (4.29.)$$



Ezt követi az áramlási szög számítása:

$$\phi_r = \frac{2}{3} \cdot \operatorname{arctg} \frac{1}{\lambda_r}, \text{ } ^\circ \quad (4.30.)$$

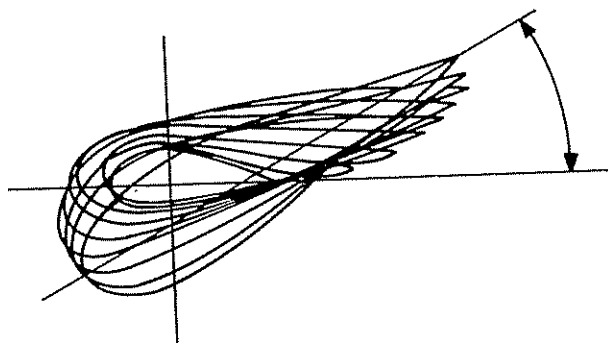
A helyi beállítási szög:

$$\beta_r = \phi_r \pm \alpha, \text{ } ^\circ \quad (4.31.)$$

És végül a szárnymetszet helyi hossza:

$$l = \frac{8 \cdot \pi \cdot r}{N} (1 \pm \cos \phi_r), \text{ m} \quad (4.32.)$$

A szárnymetszetek fent számolt adatai és a profil megadja a rotorszárny burkoló felületét, amelyre a 4.6. ábra mutat példát.



4.6. ábra. Rotorszárny metszetei (HORVÁTH, 1998)

A további méretezési feladatokhoz (munkagép-illesztés, hajtómű-tervezés stb.) ismernünk kell a rotor fordulatszám- és nyomatékviszonyait is. A névleges teljesítményhez tartozó fordulatszám az (4.26.) egyenlet alapján:

$$n_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{v_m \cdot \lambda}{2\pi \cdot R}, \text{ s}^{\pm 1} \quad (4.33.)$$

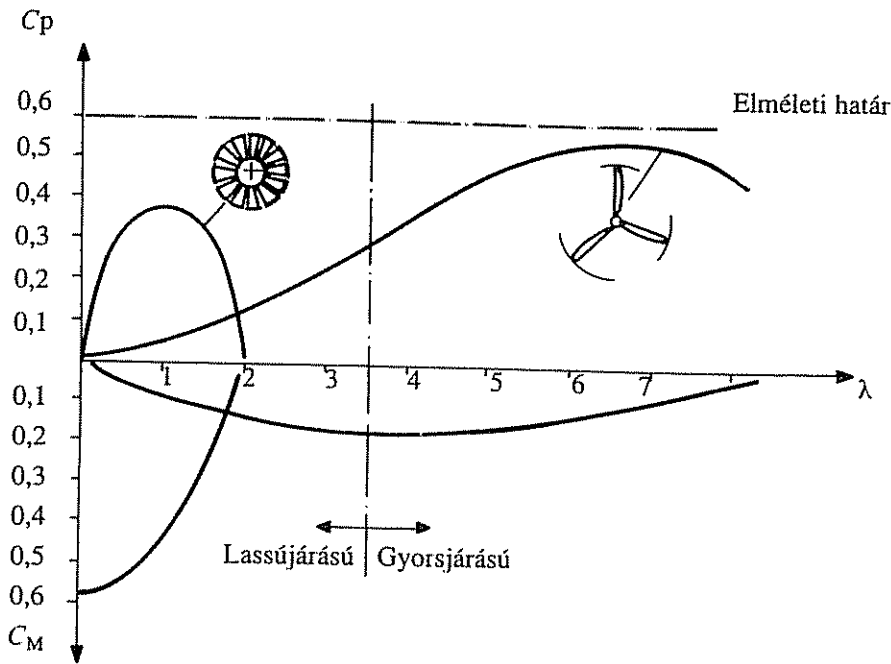
A teljesítménytényezőből következtethetünk a nyomatéktényező ( $c_M$ ) karakterisztikára is, mivel:

$$\lambda = \frac{c_w}{c_M} \quad (4.34.)$$

$c_M$  ismeretében a névleges nyomaték:

$$M_n = c_M \cdot \frac{\rho}{2} \cdot R \cdot A \cdot v_m^2, \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.35.)$$

A  $c_w$  és  $c_M$  jellegzetes függvényeit ábráztuk a 4.7. ábrán a két leggyakoribb rotortípusra: a lassújárású, sokelemes és a gyorsjárású, szárnytípusú rotorokra.



4.7. ábra. A teljesítménytényező és a nyomatéktényező változása a gyorsjárási tényező függvényében

Érdemes megfigyelni, hogy a gyorsjárású rotorokkal lényegesen jobb teljesítménytényező érhető el, míg a lassújárású rotorok nyomatéktényezője igen kedvező.

## 4.4. Turbinaelmélet

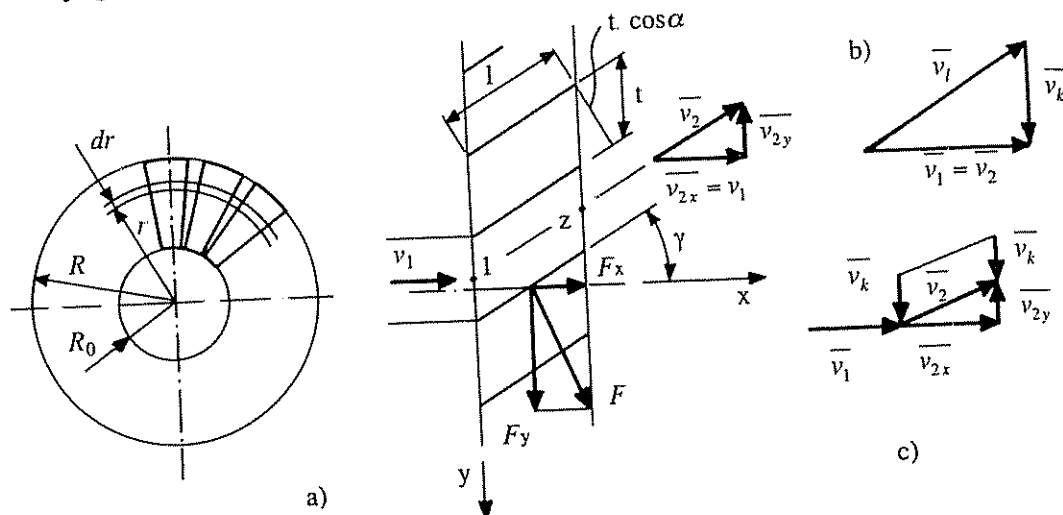
szánytípusú elemekkel szerelt rotorok jó teljesítménytényezőjükkel tűnnek ki, azonban mint láttuk, kialakításuk, gyártásuk bonyolult. Emellett azt is fontos megjegyezni, hogy a teljesítménytényező csak az erősebb szelek ( $v > 6 - 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) tartományokban kedvező, a kis sebességű ( $v = 3 - 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) szeleket nem használják ki jól.

A rotorok természetesen egyszerűsíthetők, ha pl. sík, vagy ívelt elemeket alkalmazunk az energiaátalakításra. A síklap vagy az ívelt elem siklószáma azonban lényegesen kisebb, mint a szárnyprofiloké, így a teljesítménytényező is rosszabb. Mégis vannak olyan alkalmazások, ahol az egyszerűen kialakítható, ívelt, esetleg sík elemekkel szerelt rotorok megfelelnek az igényeknek.

A lassújárású rotorokat a sűrű rotorelem-elrendezés ( $\frac{l}{t} \geq 1$ ) és a kicsi gyorsjárási tényező ( $\lambda < 4$ ) jellemzi. A rotorelemeket ezeknél a szélerőgépeknél praktikusán lapátoknak nevezzük, utalva az alakra és az állandó, vékony keresztmetszetre.

A lassújárású rotorokat hasonlóan a gyorsjárású rotorokhoz, vizsgálhatjuk a rácsmélet segítségével, azonban működésük sokkal jobban hasonlít a turbinák működésére, mint a felhajtóerőt hasznosító szárnyakra (szárny típusú rotorokra). Most vizsgáljuk meg egy – az egyszerűség kedvéért sík lapátokkal szerelt – rotor áramlá-

si viszonyait, úgy, hogy szintén kimetszünk belőle egy  $dr$  vastagságú szeletet és kiterítjük (4.8. ábra). Az így kapott rács sűrű, mivel  $l/t > 1$ , így a lapát körüli cirkulációval nem számolhatunk. Vizsgálódásunkat most is egyszerűsítsük azzal, hogy mind a rács előtt, mind a lapátok között lamináris áramlást és a levegő sűrűségének állandóságát tételezzük fel. Különleges feltételünk még az, hogy a lapátok vastagságát elhanyagoljuk.



4.8. ábra. Lapátrács származtatása és áramlási viszonyai: a lefékezett rács; b üresjárat; c normál üzemállapot. (A 4.5. ábrához képest itt ellentétes a forgásirány)

Itt is a rács  $y$  irányú mozgása lehetséges (a rotorra nézve ez forgás), de először ezt a szabadsági fokot is vegyük el, azaz rögzítsük a rácsot. Ez esetben az áramlás a lapátok között folyamatos, nincs áramvonalmetzés, tehát alkalmazhatjuk a Bernoulli-egyenletet. Az áramlás folytonosságából adódóan:

$$t \cdot dr \cdot v_1 = t \cdot dr \cdot v_2 \cdot \cos \gamma$$

ahol  $\gamma$  a lapát síkjának széliránnyal bezárt szöge, nevezzük lapátszögnek. A rácsból való kilépés sebessége tehát

$$v_2 = \frac{v_1}{\cos \gamma}, m \cdot s^{\pm 1} \quad (4.36)$$

azaz a légáram a lapátok között felgyorsul.  $\rho = \text{konstans}$  miatt  $v_{2x} = v_1$ , a sebesség-háromszögből (4.8. ábra).

$$v_{2y} = v_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma, m \cdot s^{\pm 1} \quad (4.37)$$

Írjuk fel most az impulzustételt az áramcsőre. Tangenciális irányban az impulzus megváltozása  $F_y$  nagyságú erőt eredményez:

$$F_y = m \cdot v_{2y} = \rho \cdot t \cdot dr \cdot v_1 \cdot v_{2y} = \rho \cdot t \cdot dr \cdot v_1^2 \operatorname{tg} \gamma, N \quad (4.38)$$

Ha a levegő a lapátok között felgyorsul, a rács előtti nyomás lecsökken. A Bernoulli tétel alapján:

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 \quad (4.39.)$$

(A helyzeti energiát elhanyagoljuk). Innen:

$$p_1 \pm p_2 = \frac{\rho}{2} (v_2^2 \pm v_1^2) = \frac{\rho}{2} v_1^2 \left( \frac{1}{\cos^2 \gamma} \pm 1 \right), Pa \quad (4.40.)$$

Visszatérve a rotorra, a lapátmetszeteken keletkező  $F_y$  erők nyomatékot fejtenek ki annak tengelyére. Ahhoz, hogy a nyomatékot fel tudjuk írni, meg kell határozni az összes  $y$  irányú erőt. Alkalmazva a helyi osztásra a

$$t = \frac{2r\pi}{N}$$

összefüggést, a (4.38.) egyenlet a metszetre:

$$F_y = \rho \cdot \frac{2r\pi}{N} \cdot dr \cdot v_1^2 \operatorname{tg} \gamma$$

N ez esetben is a rotoelemek száma.

Az egy lapátra ható  $y$  irányú erő:

$$F_y = \rho \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot v_1^2 \operatorname{tg} \gamma \int_{r=R_0}^R r \cdot dr \quad (4.41.)$$

Az integrálást elvégezve és figyelembe véve, hogy  $N$  számú lapát van a rotoron, az eredő erő:

$$F_y = \rho \cdot \pi (R^2 \pm R_0^2) \cdot v_1^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma = \rho \cdot A \cdot v_1^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma, N \quad (4.42.)$$

amelynek nyomatéka a rotortengelyre:

$$M_0 = F_y \cdot R_k = \rho \cdot A \cdot R_k \cdot v_1^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma, Nm \quad (4.43.)$$

ahol  $R_k$  a hasznos rotorkeresztmetszet ( $A$ ) közepes sugara.

Ez a nyomaték a rotor legnagyobb nyomatéka, amelyet adott  $v_1$  szélsősebesség mellett kifejteni képes.

Mivel a rácsot (ill. a rotort) lefékeztük, elmozdulás nincs, tehát a szélből energiát nem vettünk ki. (A forgó mozgással átvitt teljesítményegyenletben  $-P = M \cdot \omega - a$  szögsebesség zérus, ezért  $P = 0$ ). Ez az eset egyébként a szélenergia túlterhelt állapota: a szélből származó rotornyomaték nem elég nagy ahhoz, hogy a fékezőnyomatékot (a súrlódási nyomatékot és a munkagép nyomatékát) legyőzze, tehát nem tud elindulni.

Most szabadítsuk föl a rácsot, és engedjük meg az  $y$  irányú elmozdulását úgy, hogy a mozgással szemben semmiféle ellenállás ne legyen. Ezzel azt tételeztük fel,

hogy a rotor csapágyazása tökéletes, a rotorra nincs munkagép kapcsolva, tehát a terhelő nyomatéka zérus.

Könnyű belátni, hogy ebben az esetben a légáram kitéríti útjából a lapátokat, irányváltozás nélkül halad át a lapátok között. Az irányváltozás nélküli átáramlás feltétele, hogy a lapátmetszet sebessége  $v_k = v_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma$  legyen (4.8. ábra). A rotorra vonatkoztatva:

$$v_k = r \cdot \omega = v_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma, \text{ m} \cdot \text{s}^{\pm 1} \quad (4.44.)$$

ahonnan a rotor szögsebessége:

$$\omega = \frac{v_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma}{r}, \text{ s}^{\pm 1} \quad (4.45.)$$

Ez az állapot a terheletlen, vagy üresjáratú állapot, amikor a rotor forog ugyan, de nyomatékot nem ad le, teljesítménye most ezért zérus. Az (4.45.) egyenlet alapján a rotor üresjáratú fordulatszáma:

$$n_0 = \frac{v_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma}{2R \cdot \pi}, \text{ s}^{\pm 1} \quad (4.46.)$$

Értelmezzük most esetünkre a rotor gyorsjárási tényezőjét. Láttuk, hogy a gyorsjárási tényező a mindenkor kerületi sebesség és a szélesebbesség viszonya:

$$\lambda_0 = \frac{v_k}{v_1} = \frac{v_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{v_1} = \operatorname{tg} \alpha \quad (4.47.)$$

Ez azonnal megmagyarázza a lassújárású rotorok alacsony gyorsjárási tényezőjét, hiszen  $\alpha$  növelésének szigorú energetikai korlátai vannak. Erre a későbbiekben még részletesen kitérünk.

Ideje most a rotor energiatermelő üzemállapotát vizsgálni, bár az előzőekben is fontos fogalmakat tudunk megmagyarázni, annak ellenére, hogy energetikailag meddő állapotokat tanulmányoztunk.

Normális üzemállapotról akkor beszélünk, ha a rotort nyomaték terheli, de ez a nyomaték kisebb, mint az aktuális szélesebbességhez tartozó maximális nyomaték, vagyis  $0 < M < M_0$ .

A rotor ebben az esetben az  $M$  terhelő nyomaték nagyságától függő fordulatszámmal forog és teljesítmény leadására képes. A 4.8. ábra sebességháromszögei alapján a tangenciális erőt szolgáltató sebességkomponens:

$$v_{2y} = v_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma \pm v_k$$

A rotor nyomatékegyenlete tehát általános esetre:

$$M = \rho \cdot A \cdot R_k \cdot v_1 \cdot (v_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma \pm v_k), \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.48.)$$

Zavaró a képletben az  $A \cdot R_k$  szorzat, amely a hasznos keresztmetszet közepes sugarára számított nyomatóka. Ez a szilárdságtanban használatos keresztmetszeti tényezőhöz hasonló fizikai mennyiség, ezért jelöljük  $K$ -val:

$$K = A \cdot R_k = \pi \cdot R_k \cdot (R^2 \pm R_0^2), m^3 \quad (4.49.)$$

$R_k$  a lapátalak függvénye. Csonkított körcikk alakú lapátokra pl. (4.49.) jó közelítéssel:

$$R_k \cong \sqrt{\frac{R^2 \pm R_0^2}{2}}$$

Rendezzük tovább most a nyomatókegyenletünket. Kiemelve a zárójelből  $v_1$ -et:

$$M = \rho \cdot K \cdot v_1^2 \left( \operatorname{tg} \gamma \frac{v_k}{v_1} \right)$$

(4.47.) szerint  $\operatorname{tg} \gamma = \lambda_0$ , azaz a rotor elméleti gyorsjárési tényezője,  $\frac{v_k}{v_1}$  pedig az

aktuális gyorsjárési tényező. Így végül az általános nyomatókegyenlet tetszőleges  $v$  szélességre:

$$M = \rho \cdot K \cdot v^2 (\lambda_0 \pm \lambda), N \cdot m \quad (4.50.)$$

Érdeemes összehasonlítani a gyorsjárású rotorokra kapott (4.35.) nyomatókegyenletet a (4.50.) egyenlettel. (4.35.) szerint a névleges teljesítményhez tartozó nyomatók:

$$M_n = c_M \cdot \frac{\rho}{2} \cdot R \cdot A \cdot v_m^2$$

Ha  $R_k \cong \frac{R}{2}$  (a szárnyelemek alakja szerint ez általában igaz), akkor hasonló alakra hozható az egyenlet, mint (4.50.):

$$M_n = c_M \cdot \rho \cdot K \cdot v_m^2$$

Ebből következően – mindkét esetben – a  $c_M$  nyomatóktényező a gyorsjárési tényezővel kapcsolatos jellemző: azt mutatja meg, hogy a rotor milyen mértékben van leterhelve. A (4.50.) egyenlet ezért úgy is írható, hogy:

$$M = c_M \cdot \rho \cdot K \cdot v^2, N \cdot m \quad (4.51.)$$

ahol  $c_M = \lambda_0 - \lambda$ .

Hasonló a helyzet a fordulatszámviszonyokkal is. Az (4.33.) és (4.46.) egyenletek összehasonlító elemzését azonban az Olvasóra bízunk.



## 4.5. Jelleggörbék

Az előző fejezetben a szárnytípusú és turbinatípusú szélérőgépek energiaátalakítási mechanizmusát tárgyaltuk és alapvető összefüggéseket találtunk a szélesebesség, a geometriai jellemzők és az üzemi paraméterek között. Vizsgálódásaink során tapasztalhattuk, hogy a szélérőmű-üzem egy igen dinamikus üzem, már egy paraméter – a szélesebesség – megváltozása is felboríthatja a rendszer energetikai egyensúlyát. Márpedig a szélesebesség időben szinte folyamatosan változik, ezért a szélérőművek gyakorlatilag állandóan az egyensúlykeresés állapotában vannak.

Az üzemi jellemzők (fordulatszám, nyomaték, teljesítmény) kölcsönös függősége csak bonyolítja a helyzetet. A szélérőművek üzemviszonyainak tanulmányozásához, a rotor és a hajtott munkagép kapcsolatának megismeréséhez most a szélérőgépek jelleggörbéit hívjuk segítségül. A jelleggörbét a felírt egyenleteink alapján fogjuk megrajzolni, és tudjuk, hogy azok a valóságos helyzetet erősen leegyszerűsítve tükrözik, elméleti jellegűek. Így a jelleggörbék is értelemszerűen azok, azonban további fontos következtetések levonására alkalmasak.

### A szélesebesség-fordulatszám jelleggörbe

Az üresjáratú fordulatszámra az állandókat összevonva a következő egyszerű formula adódik:

$$n_0 = a \cdot v, s^{-1} \quad (4.52.)$$

ahol  $a = \frac{tg\gamma}{2R \cdot \pi}, m^{\pm 1}$

Így a  $\gamma$  lapátszöggel és  $R$  sugárral jellemzett rotor  $n = f(v)$  fordulatszám-jelleggörbéje a  $v$ -n koordináta-rendszerben egy, az origóból kiinduló  $tg\gamma$ -a meredekségű egyenes (4.9. ábra), a terheletlen rotor fordulatszáma a szélesebességgel egyenes arányban változik.

A (4.48.) egyenlet alapján most vizsgáljuk a fordulatszám-nyomaték viszonyokat. A rotor adott  $v$  szélesebesség esetén a terheléstől függő nyomatékot szolgáltat. A nyomatékhatárok az egyenletből meghatározhatók.

Túlterhelt (lefékezett) rotor esetében  $\omega = 0$ , következésképpen  $v_k = 0$ , a rotor  $v$  szélesebességhez tartozó maximális nyomatéka:

$$M_0 = \rho \cdot K \cdot v^2 tg\gamma, Nm \quad (4.53.)$$

Normális üzemállapotban ( $0 < M < M_0$ ) a nyomatékfüggvény a (4.46.) és a  $v_k = 2R \cdot \pi \cdot n$  összefüggések alkalmazásával:

$$M_0 = \rho \cdot K \cdot v(v \cdot tg\gamma \pm 2R\pi \cdot n), Nm \quad (4.54.)$$

Elvégezve a szorzást, könnyű felismerni, hogy az első tag éppen  $M_0$ -val egyenlő, így a nyomatékegyenlet a következőképpen módosul:

$$M = M_0 \pm 2R\pi \cdot \rho \cdot K \cdot v \cdot n, Nm \quad (4.55.)$$

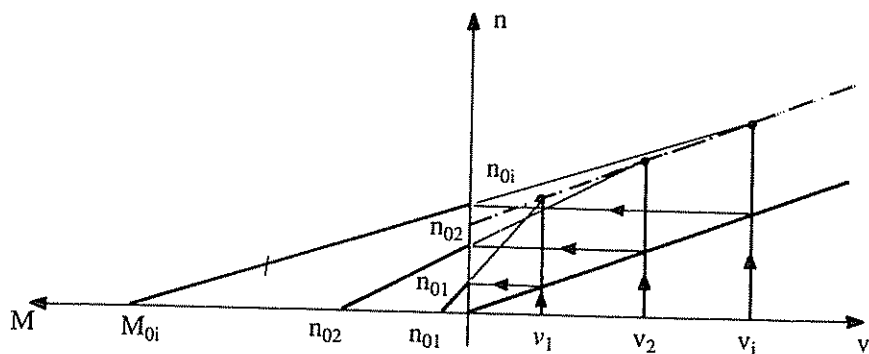
Az egyenletből kitűnik, hogy az  $M = f(n)$  függvény képe olyan egyenes, amely az  $M$ -tengelyt az  $M_0$  értéknél metszi, meredekségét pedig az  $n$  szorzótényezője határozza meg:

$$\operatorname{tg} \delta = -2R\pi \cdot \rho \cdot K \cdot v$$

A 4.9. ábrán megrajzoltuk a nyomatékábrát is, amelyből látszik, hogy  $\operatorname{tg} \delta = \frac{M_0}{N_0}$ , így az (4.54.) nyomatékfüggvényt a következő egyszerű alakra hozhatjuk:

$$M = M_0 \pm \frac{M_0}{n_0} \cdot n = M_0 \left( 1 \pm \frac{n}{n_0} \right), \text{ Nm} \quad (4.56.)$$

Mivel minden szélességértékhez meghatározott  $n_0$  és  $M_0$  értékek tartoznak és ezeknek arányai is meghatározottak, a rotor nyomaték-jelleggörbéje olyan, változó meredekségű egyenesek halmaza, amelyek a fordulatszám-szélesség mezőben ak irányzögű ún. vezéregyenest éppen az  $M = f(n)$  függvényhez tartozó  $v$  szélességnél metszik.

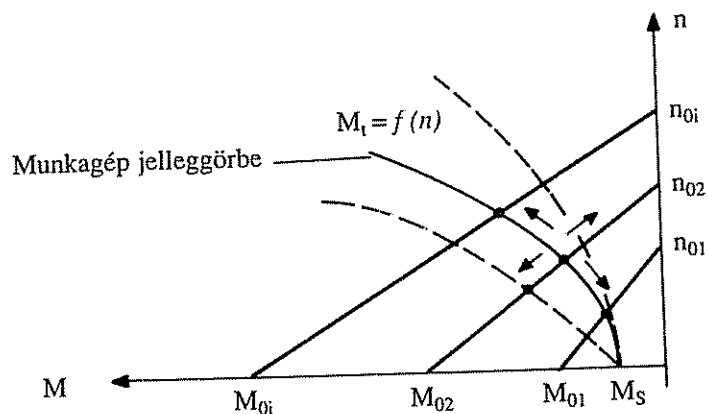


4.9. ábra. A szélesség-fordulatszám és a fordulatszám-nyomaték jelleggörbék és szerkesztési szabályaik

A szélérőmű üzemviszonyait igazán akkor érthetjük meg tisztán, ha a rotort a hajtott munkagéppel (pl. szivattyú, generátor) együtt vizsgáljuk. A munkagépet – energetikai szempontból – a fordulatszám-nyomaték jelleggörbéje determinálja. Most vegyünk egy tipikus munkagép jelleggörbét és rajzoljuk be az  $M$ - $n$  mezőbe (4.10. ábra). Látjuk, hogy a munkagép elindításához egy statikus nyomaték ( $M_s$ ) szükséges, majd a fordulatszám növekedésével a nyomatékigény dinamikusan nő. A szélérőgép munkapontját a rotor aktuális szélességéhez tartozó nyomatékgörbéje és a munkagép nyomatékgörbéjének metszéspontjában kapjuk.

Ha a szélesség megváltozik, a munkapont a megváltozott szélességhez tartozó nyomatékgörbére vándorol, azaz a munkapont a munkagép jelleggörbéje mentén mozog.

Ha a munkagép nyomatékigénye változik meg, állandó szélességet feltételezve a munkapont a rotorgörbe mentén mozdul el. A valóságban a szélesség-változás időben igen gyakori, a munkapont így állandóan vándorol. A munkagép terhelésének



4.10. ábra. Rotor és munkagép kapcsolata, munkapont

tudatos változtatása viszont a szélérőgépek szabályozásának fontos eszköze, mint ahogy később látni fogjuk.

A rotor és a kapcsolt munkagép jelleggörbéinek segítségével meghatározhatjuk a szélérőgép működési feltételeit és határait is. Ezek:

- az indulási szélsősebesség ( $v_i$ );
- a maximális fordulatszám ( $n_{max}$ );
- a maximális terhelés ( $M_{max}$ ), és
- az üzemi szélsősebesség-tartomány.

Az indulási szélsősebességet a munkagép indítási (statikus) nyomatékigénye határozza meg: a gépcsoport mindaddig nem indul be, amíg az álló rotoron ébredő nyomaték meg nem haladja a munkagép indítási nyomatékigényét ( $M_s$ ). Ennek megfelelően az indulási szélsősebességet úgy kapjuk meg, hogy a 4.10. ábra szerinti szerkesztéssel megkeressük azt a szélsősebességet, amelynek  $M_0$  (statikus) nyomatéka éppen  $M_s$ .

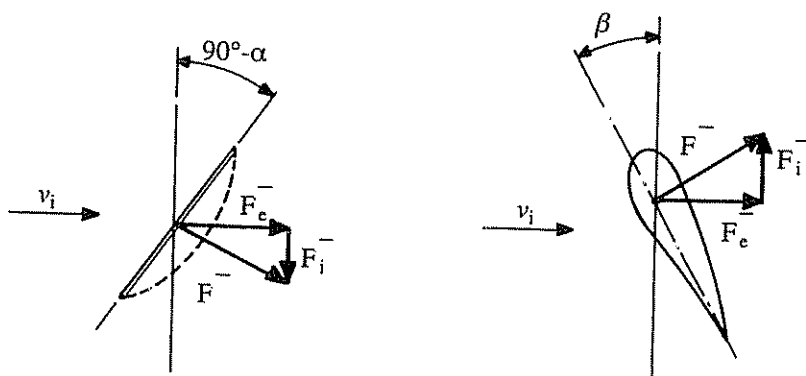
Az indulási szélsősebesség számításával is meghatározható. Az (4.53.) egyenletben  $M_0 = M_s$  és  $v = v_i$  helyettesítéssel:

$$M_s = \rho \cdot K \cdot v_i^2 \cdot \text{tg} \alpha, \text{ ahonnan}$$

$$v_i = \sqrt{\frac{M_s}{\rho \cdot K \cdot \text{tg} \alpha}}, \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.57.)$$

Az egyenlet rávilágít a szélérőgépek indulási problémáira. Adott rotorkeresztmetszeti tényező ( $K$ ) és indítási nyomaték esetén az indulási szélsősebességet a lapátszöggyorsjárású rotoroknál az állásszög határozza meg. Az indulási szélsősebesség a lapátszög növelésével csökkenthető, azonban ezzel arányosan nő a rotor ellenállása, ami nem kedvező (4.11. ábra).

Látjuk, mindkét esetben kicsi az indítóerő ( $F_i$ ) és nagy az ellenállás ( $F_e$ ). Az indulás megkönnyítésére azért vannak lehetőségeink. Szárnytípusú rotoroknál a kis lapátszám ( $N=2-3$ ) miatt viszonylag egyszerű és érdemes más okból is megoldani az állásszög-változtatást. A másik lehetőség (mindkét típusú rotor esetében) a terhelés nélküli indítás: a munkagépet csak a rotor beindulását követően, fokozatosan kapcsoljuk a rotorra. Mindkét lehetőség automatikus szabályozó-berendezést feltételez, amely természetszerűleg bonyolítja és drágítja a szélérőgép szerkezetét.



4.11. ábra. Az indulás erőviszonyai a rotorelemekken

A szélerőgép maximális fordulatszámát ( $n_{\max}$ ) és a maximális terhelőnyomatékot ( $M_{\max}$ ) a maximális, vagy kikapcsolási szélesebségnél ( $v_{ki}$ ) kapjuk. Biztonsági, berendezésvédelmi okokból ugyanis a szélerőgépet viharos szelek esetén ki kell kapcsolni a légáramból, azaz valamilyen módszerrel le kell állítani. (Később a viharvédelem kérdésével részletesen foglalkozunk.) A ( $v_{ki}$ ) tehát az a legnagyobb szélesebség, amely mellett a berendezés még éppen üzemel (4.12. ábra).

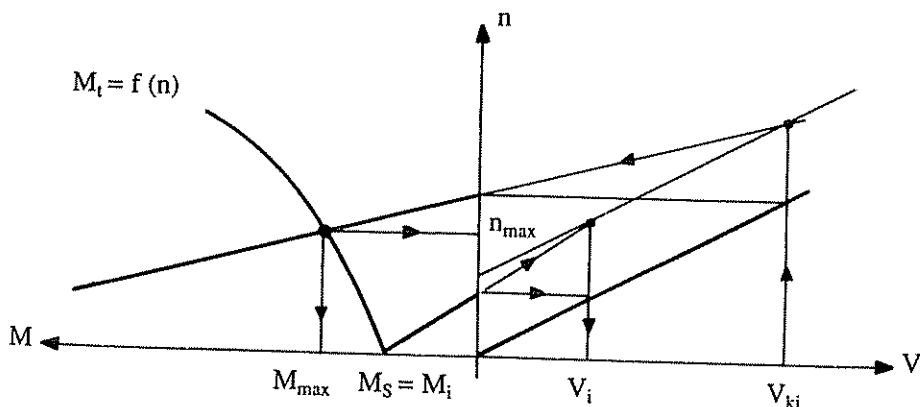
Az üzemi szélesebség-tartomány tehát a  $v_i$ - $v_{ki}$  közötti tartomány, amelyen belül a szélerőgép energiát termel.

Az üzemi fordulatszám-tartomány ennek megfelelően  $0 < n < n_{\max}$ , az üzemi nyomatéktartomány pedig  $M_s < M < M_{\max}$ .

Az üzemi jellemzők határértékeinek ismerete nemcsak a gépcsoport energetikai illesztése miatt fontos, hanem a rotorok méretezésének is nélkülözhetetlen alapadataiként szolgálnak.

A következőkben a teljesítményviszonyokat vizsgáljuk abból a célból, hogy megadhassuk a szélerőgép teljesítmény-jelleggörbéit. Ismeretes, hogy forgó mozgással tengelyen átadott teljesítményt a

$$P = M \cdot \omega = 2\pi \cdot n \cdot M, W$$



4.12. ábra. Szélerőgép működési feltételei és határai

egyenlettel írhatjuk le. Ha ismert az  $M = f(n)$  nyomatékfüggvény, akkor a  $P = f(M, n)$  teljesítményfüggvény minden nehézség nélkül előállítható. Felhasználva az (4.56.) egyenletet, a szélérőgép teljesítményére általános esetben a következőt írhatjuk:

$$P = 2\pi \cdot M_0 \left( n \pm \frac{n^2}{n_0} \right), W \quad (4.58.)$$

A 4.13. ábrán egy tetszőleges felvett  $M = f(n)$  egyenes pontjaihoz tartozó  $M, n$  értékpárok összeszorozásával kapott téglalap alakú területek nyilvánvalóan a szélérőgép pillanatnyi teljesítményeivel arányosak. A teljesítményegyenlet alapján azt is könnyű belátni, hogy a teljesítményfüggvény egy adott szélességnél parabola, amelynek értelmezési tartománya  $M = 0 \rightarrow M = M_0$ .

Keressük meg most az adott  $v$  szélességhez tartozó maximális teljesítményt ( $P_{\max}$ ). Az elemi függvényvizsgálat szabályai szerint a teljesítmény maximuma ott van, ahol a  $P = f(n)$  függvény  $n$  szerinti első deriváltja zérus.

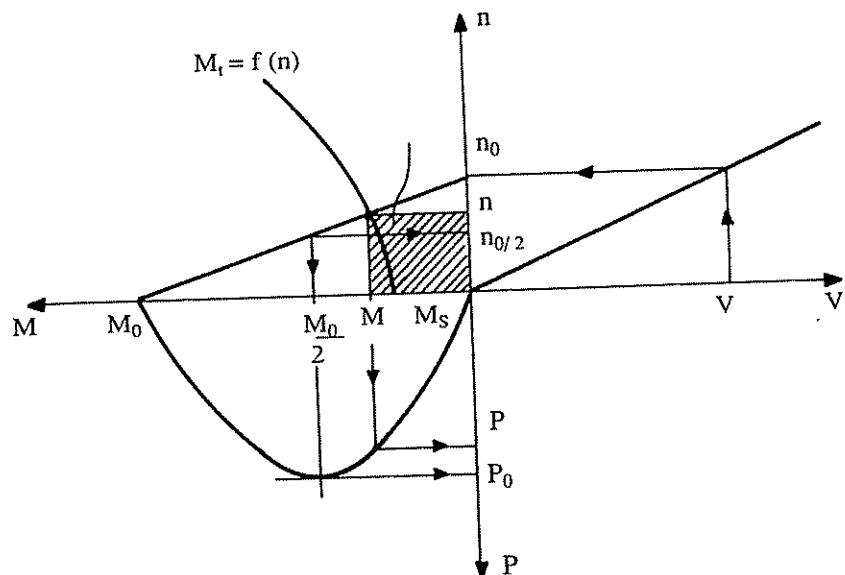
Az (4.58.) egyenletből nyilvánvaló, hogy  $\frac{dP}{dn} = 2\pi \cdot M_0 \left( 1 \pm \frac{2n}{n_0} \right) = 0$ , amelyből a

maximális teljesítményhez tartozó fordulatszám:

$$n_{P_0} = \frac{n_0}{2}, W \quad (4.59.)$$

Könnyű belátni, hogy a maximális teljesítményt adó nyomaték:

$$M_{P_0} = \frac{M_0}{2}, N \cdot m \quad (4.60.)$$



4.13. ábra. Szélérőgép teljesítmény-jelleggörbéjének származtatása

(4.59.) és (4.60.) egyenletek felhasználásával a teljesítménymaximum:

$$P_0(v) = \frac{\pi}{2} \cdot M_0(v) \cdot n_0(v), \quad W \quad (4.61.)$$

Felírhatjuk természetesen a maximális teljesítmény-szélsőesség függvényt is, amely kiválóan alkalmas a rotor fő paramétereinek méretezéséhez. Behelyettesítve (4.46.)-ot és (4.53.)-at az (4.61.) egyenletbe, a következő összefüggést kapjuk:

$$P_0(v) = \frac{1}{4R} \cdot \rho \cdot K \cdot v^3 \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma, \quad W \quad (4.62.)$$

Mivel a szélérőgép tényleges teljesítményét a munkapont helye határozza meg, nyilvánvaló, hogy a szélenergia kihasználása szempontjából az a kedvező, ha a munkapont egybeesik az adott szélsőességhez tartozó optimális munkaponttal. A rotor és a munkagép energetikai illesztésének, valamint a gépcsoport szabályozásának éppen az a célja, hogy a munkagép nyomatékigényét úgy állítsuk be, hogy az a mindenkori szélsőességhez tartozó maximális nyomaték felével terhelje a rotort. Nyilvánvaló, hogy ez az igény a lehető legnagyobb teljesítménytényező elérését jelenti.

A teljesítménytényezőt az 4.2. pontban már definiáltuk, most határozzuk meg a függvényét az üzemi jellemzők elméleti összefüggéseinek segítségével, és vizsgáljuk azt is, hogy melyek azok a konstrukciós jellemzők, amelyek befolyásolják a teljesítménytényezőt.

A teljesítménytényező egyenletét írjuk fel általános alakban:

$$c_w = \frac{P}{P_{sz}},$$

ahol  $P_{sz}$  a szél hasznos rotorkeresztmetszetben ( $A$ ) mért teljesítménye:

$$P_{sz} = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3, \quad W \quad (4.63.)$$

$P$  a rotor hasznos teljesítménye az (4.58.) egyenlet szerint.

Mivel  $0 \leq P \leq P_0$ , következésképpen a teljesítménytényező is egy  $0 \leq c_w \leq c_{w0}$  tartományban mozog, ahol  $c_{w0}$  az elérhető legnagyobb teljesítménytényező:

$$c_{w0} = \frac{P_0}{P_{sz}} = \frac{\pi \cdot M_0 \cdot n_0}{\rho \cdot A \cdot v^3} \quad (4.64.)$$

Most helyettesítsük be  $M_0$ -at az (4.53.) és  $n_0$ -at a (4.52.) egyenletek szerint:

$$c_{w0} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot K \cdot v^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot v \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\rho \cdot A \cdot v^3 \cdot 2R \cdot \pi} = \frac{K \cdot \operatorname{tg} \gamma}{2 \cdot A \cdot R}$$

De  $K = A \cdot R_k$ , ezért összefüggésünk tovább egyszerűsödik:

$$c_{w0} = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{R_k}{R} \quad (4.65.)$$

Igen érdekes és figyelemre méltó összefüggést kaptunk a turbina típusú rotorok elméleti maximális teljesítménytényezőjére. Az (4.65.) egyenlet szerint  $c_{w0}$  két konstans jellemző függvénye: a lapátszög és a lapátalaké. Az  $R_k / R$  viszony ugyanis a lapátalakkkal van szoros kapcsolatban: a közepes sugár növelése azonos  $R$ -nél javítja a rotor hatásfokát.  $R_k$  növelése azonban a hasznos keresztmetszetet, így a rotor teljesítményét csökkenti, ezért a lapátalak tervezésénél kompromisszumot kell keresni.

Az  $\frac{R_k}{R}$  arányra azért az elmélet mond valamit. A különböző lapátalakoknál  $R_k$

csak kismértékben változik egy középérték, az  $R_k = \frac{R + R_0}{2}$  körül. (Ez egyébként éppen a téglalap alakú lapátok közepes sugara.)

Határozzuk meg, hogy ezen  $R_k$  értéknél mekkora  $R_0$  adja a legnagyobb teljesítményt, mert végül is ez az egyik alapvető konstrukciós cél. A (4.64.) egyenletből:

$$P_0 = P_{sz} \cdot c_{w0} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (R^2 \pm R_0^2) \pi \cdot v^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{R + R_0}{2R}$$

Az állandókat összevonva egy  $C$  konstansba, a következő egyenletet kapjuk:

$$P_0 = C \cdot (R^2 \pm R_0^2) (R + R_0) = C (R^3 \pm R_0^2 R + R^2 R_0 \pm R_0^3).$$

A  $P_0 = f(R_0)$  függvény maximumát keressük, tehát:

$$\frac{dP_0}{dR} = (\pm 3R_0^2 \pm 2R_0 R + R^2) = 0.$$

A másodfokú egyenletet megoldva két gyököt kapunk:  $R_0 = -R$  és  $R_0 = R/3$ . Nyilvánvalóan az utóbbi a helyes, tehát a legnagyobb teljesítményt biztosító közepes sugár:

$$R_k \approx \frac{R}{2} + \frac{R}{6} = \frac{2}{3} R.$$

A lapátszög ( $\gamma$ ) sem növelhető tetszés szerint. Nagy lapátszögeknél megnőnek az áramlási veszteségek (turbulencia, leválás) és a teljesítménytényező csökkenni fog. Az áramlási veszteségek a lapátok ívelésével csökkenthetők, ívelt lapátprofil alkalmazásával a lapátszög valamelyest növelhető. Mindezek az összefüggések azonban tisztán elméleti úton már nem tisztázhatók, konkrét kísérletek szükségesek tanulmányozásukhoz.

Visszatérve a teljesítménytényezőhöz, az általános formula az (4.58.) és (4.63) egyenletek segítségével:





áramlás jellege nagy valószínűséggel megváltozik. Hogy milyen lapátszögtartományban érvényes az (4.46.) egyenlet, csak kísérletekkel állapítható meg.

A következőkben szélcsatornás modellvizsgálatok eredményei alapján igazoljuk az elméleti összefüggések helyességét ill. állapítjuk meg érvényességük határait.

Láttuk, hogy az üzemi jellemzőkre (fordulatszámra, nyomatékra, az ezekből számított teljesítményre és teljesítménytényezőre) a szerkezeti paraméterek szűk köre van hatással – legalábbis elméletileg. Ezek a lapátszög és a  $K$ -val jelölt keresztmetszeti tényező, amelyben a közepes sugár az érdekes, hiszen a lapátalakkal van kapcsolatban. Tehát azt kell megvizsgálni, hogy a lapátszög és a lapátalak (pontosabban az  $R_k / R$  viszony) hogyan és milyen mértékben befolyásolja az üzemi jellemzők alakulását.

Vizsgáljuk először azt, hogy hogyan változnak az üzemi jellemzők ténylegesen a lapátszög függvényében. A vizsgált modell jellemzői:  $R = 135$  mm,  $R_0 = 35$  mm, a lapátszög függvényében. A vizsgált modell jellemzői:  $R = 135$  mm,  $R_0 = 35$  mm, a csonkított körccikkalakú lapátok nyílásszöge  $\gamma = 24^\circ$ , lapátszám  $N = 16$  (bár a lapátszám ez esetben közömbös, csak jelezni kívánjuk, hogy tényleg sűrűlapátos rotorról van szó.) Fontos számított adatok viszont a hasznos keresztmetszet ( $A = 0,053$  m<sup>2</sup>), a közepes sugár ( $R_k = 0,092$  m) és a keresztmetszeti tényező  $K = 0,005$  m<sup>3</sup>.

Írjuk fel ezekkel az adatokkal a rotorfüggvényeket. Az üresjárat fordulatszámra (4.46. egyenlet) azt kapjuk, hogy:

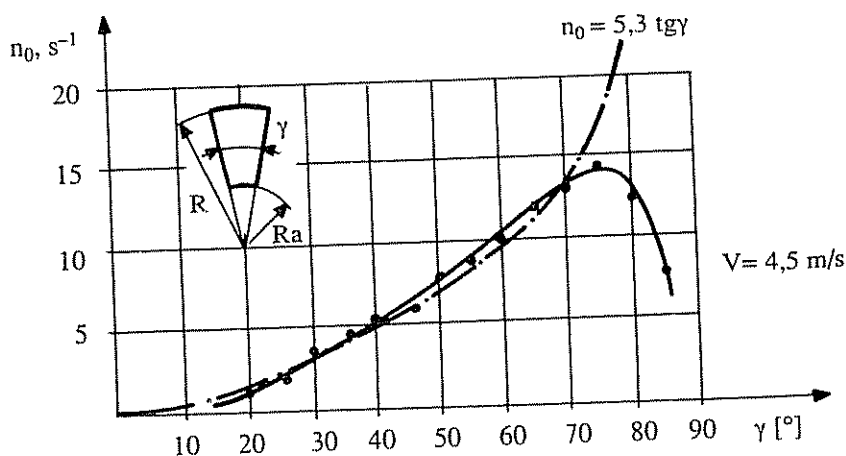
$$n_0 = \frac{v \cdot \operatorname{tg} \gamma}{0,848}, \text{ s}^{-1}$$

Ha pl. az üresjárat fordulatszám egyenlete:

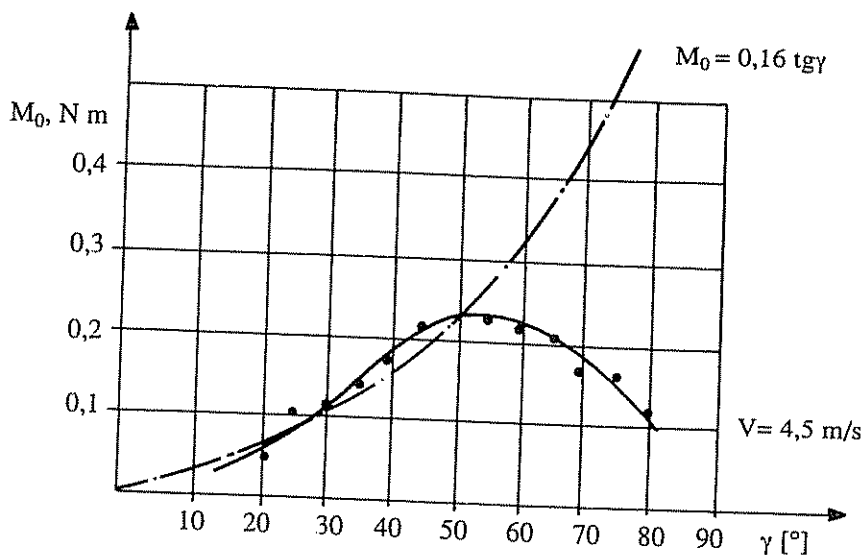
$$n_0 = 5,3 \cdot \operatorname{tg} \gamma$$

Ábrázoljuk most ezt a függvényt és rajzoljuk be a diagramba a szóban forgó rotor mérési pontjait is (4.15. ábra).

Az ábrából jól látszik, hogy széles tartományban jól egyeznek a számított és mért értékek, az eltérés  $\gamma > 70^\circ$ -nál kezd szignifikánsan nőni. Azt mondhatjuk tehát, hogy az (4.46.) egyenlet a  $0 < \alpha < \approx 70^\circ$  tartományban megfelelő pontossággal írja le az üresjárat fordulatszámot.



4.15. ábra. Az üresjárat fordulatszám elméleti és mért függvénye



4.16. ábra. Ásók

Most nézzük meg, hogyan egyeznek a nyomatékfüggvény számított és mért értékei,  $v$  legyen ismét  $4,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , és  $\rho = 1,297 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , ez esetben:

$$M_0 = \rho \cdot K \cdot v^2 \cdot \text{tg} \gamma \approx 0,16 \cdot \text{tg} \gamma$$

Vessük össze ismét a számított és mért adatokat (4.16. ábra).

A diagram tanúsága szerint a mért nyomatékfüggvény már az  $\gamma = 50^\circ$  körüli lapátszög-tartományban kezd elhajlani a számított függvénytől, amely azzal magyarázható, hogy a lapátok közötti áramlás nem lamináris még kis szélességeknél sem. (Itt kell megjegyezni, hogy a mérési eredmények nem egészen korrektek, mivel nem vettük figyelembe az áramlások hasonlóságainak betartandó szabályait. De a jelleggörbék tendenciái helyesek, és most elsősorban erre szeretnénk a figyelmet ráirányítani.)

Ha ismerjük az adott lapátszöghöz és szélességhez tartozó  $n_0$  és  $M_0$  értékeket, akkor az (4.62.) egyenlet szerint  $P_0 = f(\gamma, v)$  függvény előállítható. Az elméleti függvényünk a modell esetére, ha  $v = 4,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ :

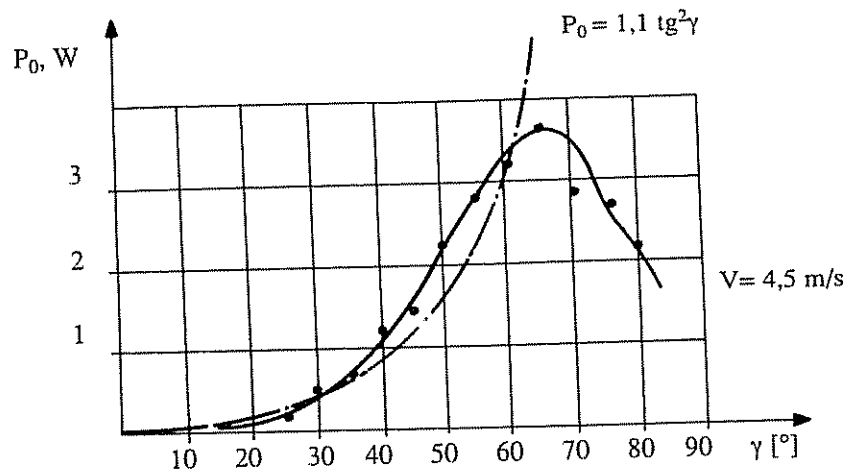
$$P_0 = \frac{1}{4R} \cdot \rho \cdot K \cdot v^3 \cdot \text{tg}^2 \gamma \approx 1,1 \cdot \text{tg}^2 \gamma, \text{ W}$$

A 4.17. ábra szemlélteti az elméleti és mérési eredményekből számított  $P_0 = f(\gamma)$  görbéket.

Mint látjuk, a maximális teljesítmény-karakterisztika maximumpontja a  $\gamma = 60-70^\circ$  közötti tartományba esik, ahogy ez várható is volt az  $n_0$  és  $M_0$  jelleggörbék-ből. Az eredmények alapján azt állapíthatjuk meg, hogy a teljesítmény-kihasználás szempontjából – a vizsgált rotorhoz hasonló esetekben – az optimális lapátszög  $60-70^\circ$  között vehető fel.

A rotor elméleti teljesítménytényezője (4.65.) alapján:

$$c_{p0} = \frac{1}{2} \text{tg} \alpha \cdot \frac{R_k}{R} \approx 0,34 \text{tg} \gamma$$



4.17. ábra. Elméleti és mért maximális teljesítményfüggvények

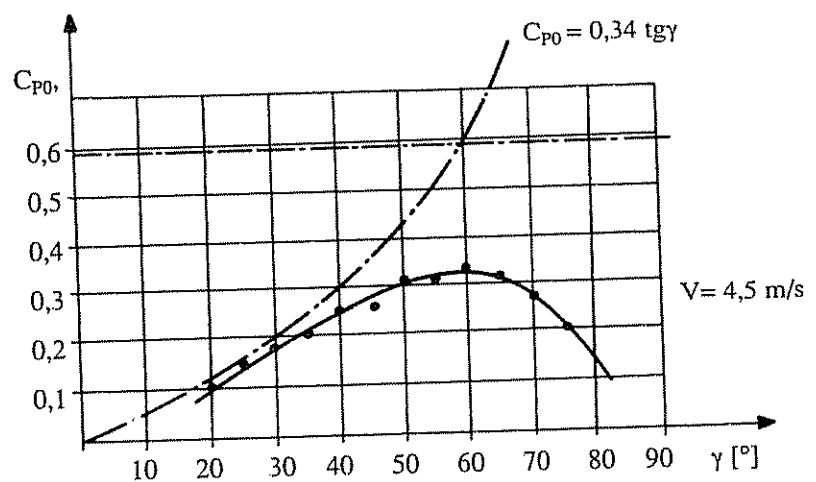
Betz tételéből tudjuk, hogy a teljesítménytényező elméleti maximuma  $c_{we} = 0,5926$ . Ezt az értéket a mi modellünknek  $\gamma \approx 60^\circ$ -nál kellene elérni. Nézzük meg, hogyan alakul a számított és mért (mérési adatokból számított) teljesítménytényező – karakterisztika (4.18. ábra).

Mivel a tényleges teljesítménytényezőt a  $P_0 / P_{sz}$  hányadosa adja, ahol  $P_{sz} = \text{konstans}$ , nyilván a teljesítményhez hasonló alakú görbét kaptunk, a  $\gamma \approx 65^\circ$  körüli maximumponttal.

A 4.18. ábrából az is kiolvasható, hogy a lassújárású rotorok teljesítménytényezője viszonylag alacsony, maximális értéke a gyakorlatban 0,3 körüli. Ha bevezetjük a rotorokra a jósági tényező fogalmát, amely azt fejezi ki, hogy mennyire sikerült az adott konstrukcióval megközelíteni az ideális gépet, akkor a következő formulával írhatjuk le azt:

$$c_j = \frac{c_{W \max}}{c_{we}} \quad (5.67.)$$

Az így módon értelmezett jósági tényező értéke a lassújárású rotorokra  $c_j \approx 0,5$ , míg a gyorsjárású rotorokra, amelyeknél  $c_w$  maximális értéke 0,45–0,5 között is lehet (szélérőművek)  $c_j = 0,75$ –0,8.

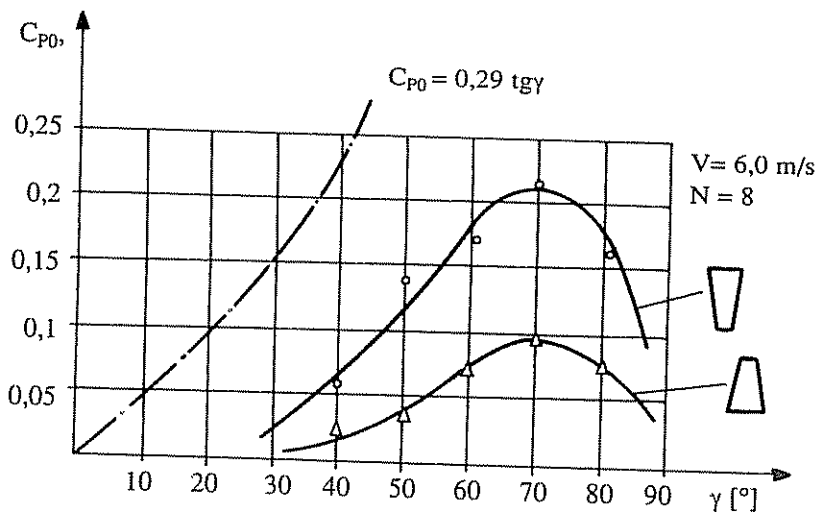


4.18. ábra. A teljesítménytényező a lapátszög függvényében

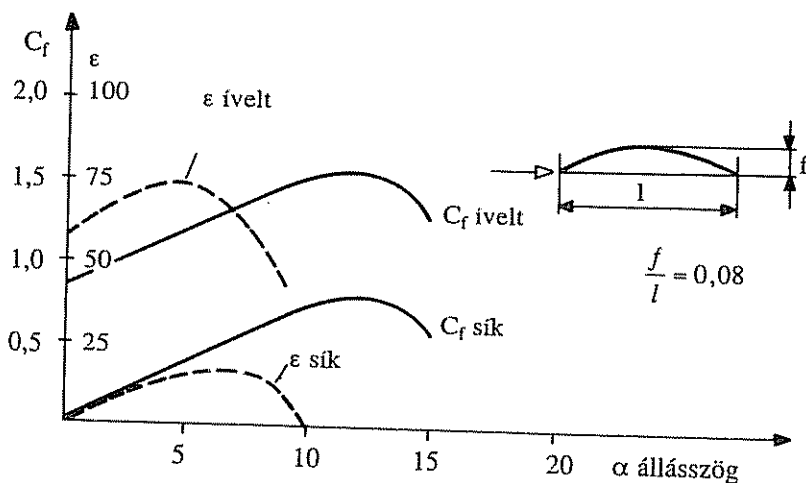
Most nézzük meg, hogy a lapátalaknak milyen hatása van a teljesítménytényezőre. A lapátalakot, mint láttuk az (4.64.) egyenletben az elmélet a közepes sugárral veszi figyelembe. Az  $R_k$ -t változtassuk meg úgy, hogy a rotort fordított trapéz alakú lapátokkal látjuk el, azaz a lapát profilhossza a sugár mentén csökken. A rotor egyéb méreteit ( $R, R_0$ ) nem változtattuk meg. A vizsgálatok eredményeit  $N = 8$  lapátszámra a 4.18. ábra szemlélteti.

A közepes sugár ebben az esetben  $R_k = 0,08$  m, így az elméleti teljesítménytényező egyenlete  $c_{w0} \approx 0,29 \cdot t g \gamma$ .

Még egy összefüggést mindenképpen fontos megvizsgálni. A 4.19. ábrából is látjuk, hogy ha csökkentjük a lapátok számát, a teljesítménytényező rohamosan csökken. Ennek az a kézenfekvő magyarázata, hogy csökkenő lapátszámnál nem a lapátok körüli áramlási viszonyok szabják meg a rotorok energetikai tulajdonságait. Emlékezzünk vissza, a turbina-elvénél feltételünk volt, hogy  $l/t < 1$ . A lapátszám csökkentésével  $t$  nő, így  $l/t > 1$  lesz, összefüggéseink érvényüket veszítik. Ebben az esetben a rotorok tulajdonságait a szárnyrács-elmélet alapján kell tárgyalni. Régóta tudjuk viszont, hogy a sík, vagy ívelt lapok siklószáma alacsony (4.20. ábra), lényegesen rosszabb teljesítménytényezőt eredményeznek, mint a szárnyprofilok.



4.19. ábra. A lapátalak hatása a teljesítménytényezőre



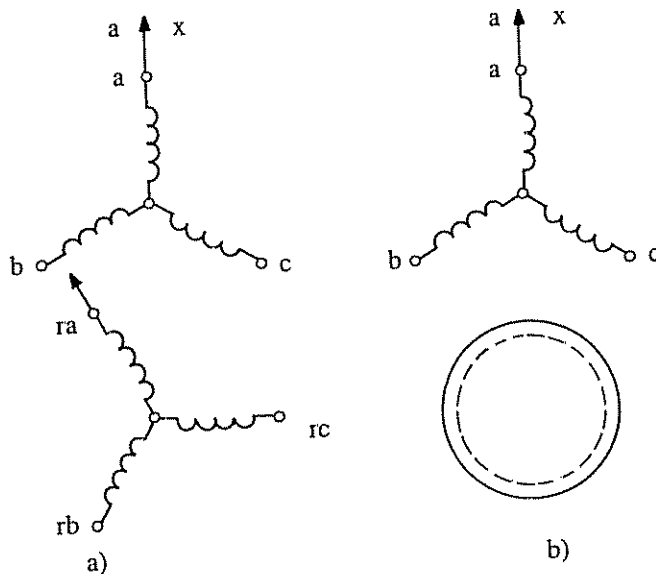
4.20. ábra.

## 4.7. A szélerőművekben alkalmazott generátorok és frekvenciaváltók

### 4.7.1. Aszinkron generátorok és a fordulatszám-változtatás lehetőségei

Az aszinkron gép állórésze háromfázisú, szimmetrikus tekercselésű. Egy póluspár esetén ez térben egymástól  $120^\circ$ -ra levő fázis tekercseket jelent.

Csúszógyűrűs gépnél a forgórészen is ilyen tekercselés van, kalickás gépnél a forgórész rövidrezárt kalicka (4.21. ábra).



4. 21 ábra. Háromfázisú aszinkron gép. a) Csúszógyűrűs; b) Kalickás

Ha  $\omega_1$  a tápkörfrekvencia, és  $f_1$  a tápfrekvencia, akkor a gépben létrejövő forgó mágneses mező az állórészhez képest  $n_1 = f_1/p$  fordulatszámmal ( $W_1 = \omega_1/p$  szögsebességgel), az  $n$  fordulatszámú ( $W$  szögsebességű) forgórészhez képest  $n_1 - n$  fordulatszámmal ( $W_1 - W$  szögsebességgel) forog. A relatív fordulatszámok, vagy szögsebességek aránya a szlip:

$$s = (n_1 - n)/n_1 = (W_1 - W)/W_1. \quad (4.7.1)$$

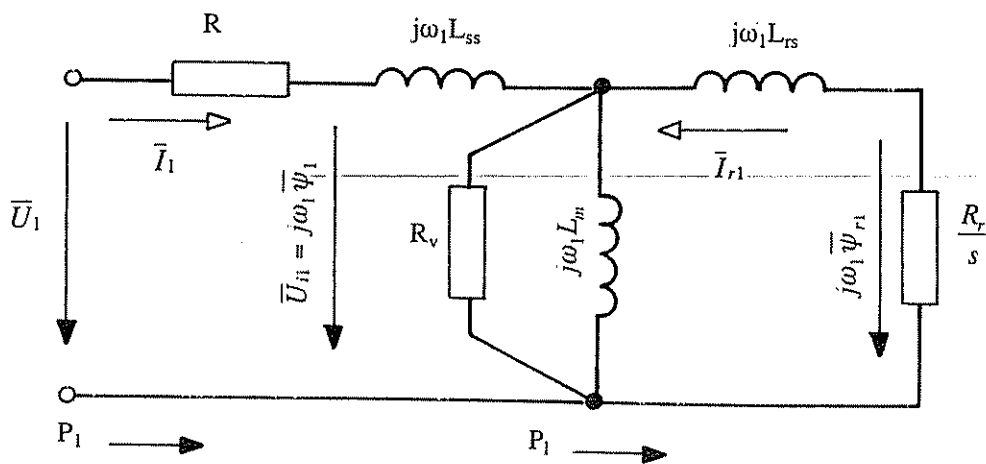
A forgórészben indukálódó feszültségeknek, az ott folyó áramoknak a frekvenciája és körfrekvenciája

$$f_r = sf_1, \quad \omega_r = 2\pi f_r = s\omega_1. \quad (4.7.2.a, b)$$

Rövidrezárt forgórészű aszinkron gép egyfázisú helyettesítő vázlatát mutatja a 4.22. ábra.

Az aszinkron gép állórésze  $P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$  hatásos teljesítményt vesz fel a szinuszos táphálózathól, amelyből a  $W_1$  szögsebességgel forgó mező légrésteljesítményt átvisz az  $M$  nyomatékot kifejtő  $W$  szögsebességű forgórészre:

$$P_1 = MW_1 = P_m + P_r \quad (4.7.3)$$



4.22. ábra. Rövidrezárt forgórészű aszinkron gép helyettesítő vázlata

Ez fedezi a tengely  $P_m$  mechanikai teljesítményét és a  $P_r$  forgórészkeri teljesítményt:

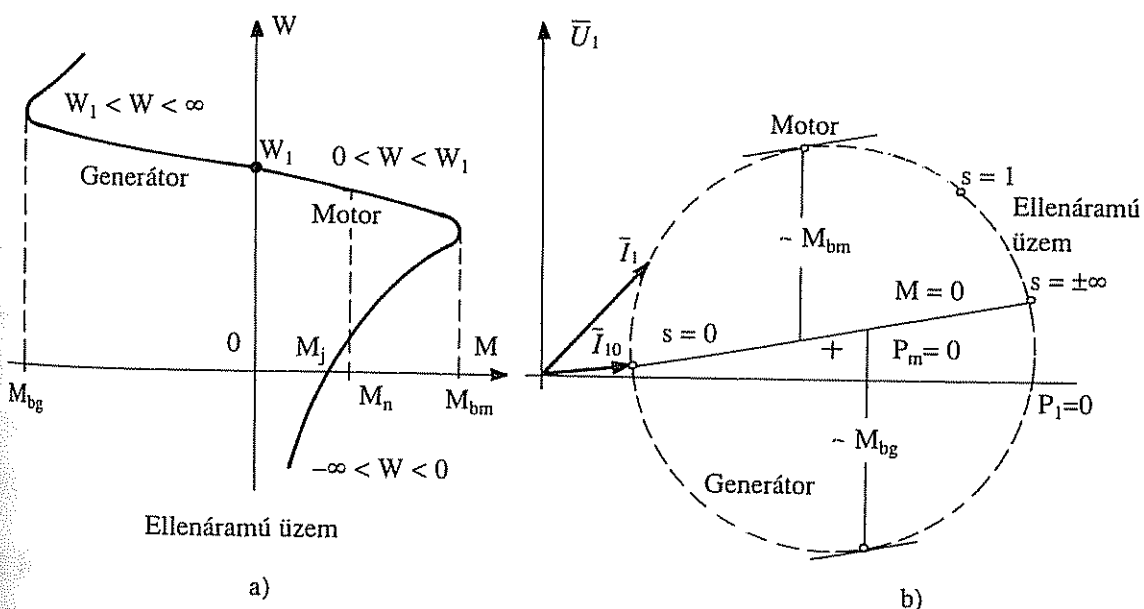
$$P_m = MW = (1-s)P_1, P_r = MW_r = sP_1 \quad (4.7.4.a,b)$$

Itt  $W_r = W_1 - W = sW_1$  a szögsebesség eltérés. Rövidrezárt forgórészű gépnél  $P_r = P_{tr}$  a forgórész tekercsveszteség. A légrésteljesítmény az állórész  $P_1$  felvett teljesítményével,  $P_{ts}$  tekercsveszteségével és  $P_{fe}$  vasvesztésével is kifejezhető:

$$P_1 = P_1 - P_{ts} - P_{fe} \quad (4.7.5)$$

A légrésteljesítmény a helyettesítő vázlatból is felírható:

$$P_1 = MW_1 = 3I_{r1}^2 R_r / s = 3I_{r1}^2 R_r W_1 / W_r \quad (4.7.6)$$



4.23. ábra. Aszinkron motor mechanikai jelleggörbéje és áramvektor diagramja  
 $f_1 = \text{const.}, U_1 = \text{const.}$  mellett



Ez alapján  $f_1 = \text{const.}$  és  $U_1 = \text{const.}$  esetben számítható a nyomaték a helyettesítő vázlatból. A 4.23. ábra mutatja az így kapott  $W(M)$  mechanikai jelleggörbét és az áramvektor diagramot. A  $W(M)$  jelleggörbe három szakaszát különböztetjük meg:

- |    |                     |                   |                                |
|----|---------------------|-------------------|--------------------------------|
| a. | $W_1 < W < \infty,$ | $s < 0,$          | $P_m < 0:$ generátoros üzem,   |
| b. | $0 < W < W_1,$      | $0 < s < 1,$      | $P_m > 0:$ motoros hajtóüzem,  |
| c. | $-\infty < W < 0,$  | $1 < s < \infty,$ | $P_m < 0:$ ellenáramú féküzem. |

A  $W = W_1, s = 0, M = 0$  határpontban üresjárásban szinkron forog, a  $W = 0, s = 1, M = M_i$  határpontban áll a gép. Az  $M(W)$  helyett az  $M(s)$  jelleggörbe  $-R = 0$  általában megengedhető közelítéssel – egyszerűen megadható a Kloss képlettel:

$$M = \frac{2M_b}{s/s_b + s_b/s} = \frac{2M_b}{W_r/W_{rb} + W_{rb}/W_r} \quad (4.7.7)$$

Itt  $M_b$  a (maximális) billenőnyomaték,  $s_b$  a billenőszlip,  $W_{rb}$  a billenő szögsebesség eltérés.

A valóságban  $R \neq 0$  miatt a generátoros billenőnyomaték nagyobb a motorosnál a 4.22. ábrának megfelelően:  $|M_{bg}| > M_{bm}$

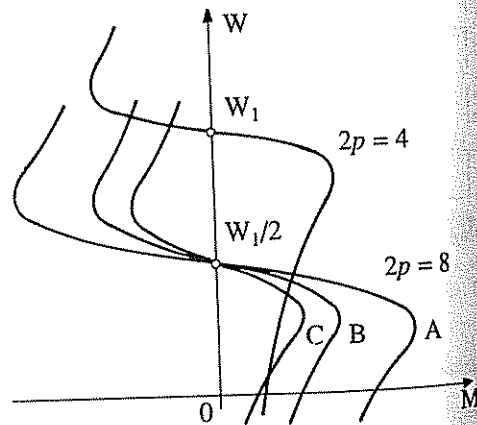
A forgórész fordulatszámja és szögsebessége (4.7.1) alapján:

$$n = (f_1/p)(1-s), \quad W = (\omega_1/p)(1-s) \quad (4.7.8)$$

A fordulatszám e képletek alapján az  $f_1$  frekvenciával, a  $p$  póluspárral és az  $s$  szlipvel változtatható.

#### 4.7.1.1. Pólusszám változtatása

A pólusszámmal a  $W_1 = \omega_1/p$  szinkron szögsebesség változtatható. Leggyakrabban az ún. Dahlander kapcsolást alkalmazzák, amikor ugyanazt a tekercselést lehet megcsapolások segítségével két 1:2 arányú pólusszámra átkapcsolni. Csak kalickás gépeknél használják, mert ekkor nincs szükség átkapcsolásra a forgórészen, mivel ott magától kialakul a kétféle pólusszám. Pl. a  $2p = 4$  és 8 pólusú  $W(M)$  görbék jellegét a 4.24. ábra mutatja. Mindkét pólusszámhoz tartozik egy-egy névleges pont. Megfelelő csillag, delta, soros és párhuzamos kapcsolásokkal teljesítménytartó (A), nyomatéktartó (B) és csökkenő nyomatékú (C) jelleggörbét lehet megvalósítani. Két független tekercseléssel 1:2-től eltérő pólusszám arány is beállítható. Általában az egyik pólusszámon a szokásosnál rosszabbak a gép jellemzői (pl. hatásfok,  $\cos \varphi$ ).

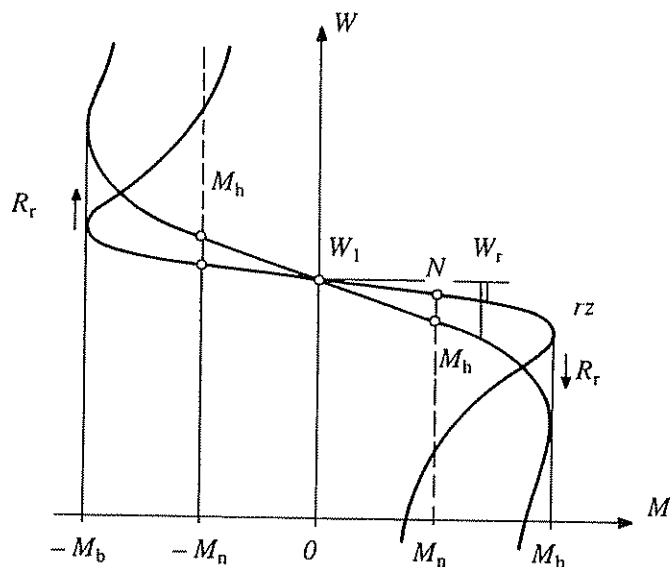


4.24. ábra. Pólusátkapcsolós gépek  $W(M)$  jelleggörbéi

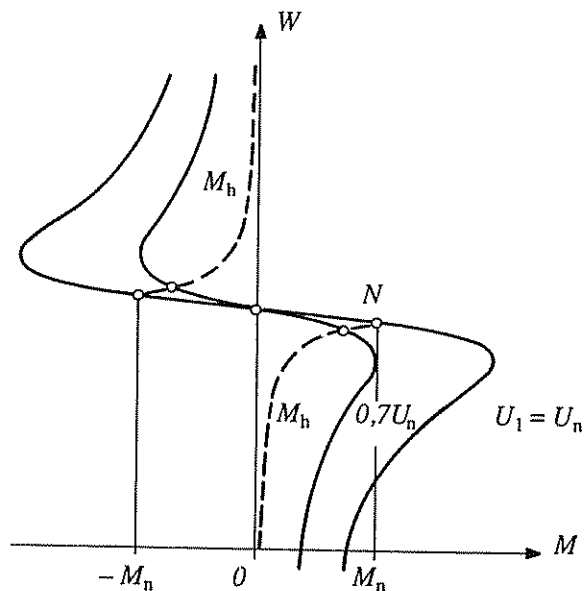
### 4.7.1.2. Szlip változtatása

#### Ellenállás-változtatás

Csúszógyűrűs gépnél külső ellenállás beiktatásával növelhető az  $R_r$  forgórész körüli ellenállás, és ezáltal pl. motoros üzemben csökkenthető az  $r_z$  rövidrezárt  $W(M)$  jellegző görbéhez tartozó szögsebesség. A 4.25. ábrának megfelelően pl. adott,  $M > 0$  nyomatéknál  $R_r$  arányában megnő a  $W_r = W_1 - W$  szögsebességesezés, illetve a  $W_r/W_1 = s$  szlip. Veszteséges fordulatszám változtatási módszer. A tartósan megengedhető nyomaték  $M_h = M_n$  állandó (külső szellőzést feltételezve), mert a többlet veszteség a gépen kívül, a beiktatott ellenálláson keletkezik.



4.25. ábra. Szlipváltoztatás forgórész körüli ellenállás növelésével



4.26. ábra. Szlipváltoztatás állórész feszültség csökkentésével

## Feszültségváltoztatás

Mind kalickás, mind csúszógyűrűs gépnél lehetséges az  $U_1$  tápfeszültség változtatása az  $U_1 \leq U_n$  tartományban. Adott fordulatszámon a nyomaték  $U_1^2$ -tel arányos (4.26. ábra). Kalickás gépnél a tartós terhelhetőségi határ  $M_h = (W_m / W_r) M_n$  szerint csökken motoros és generátoros üzemben a fordulatszám változásakor ( $W_m = W_1 - W_n$ ).

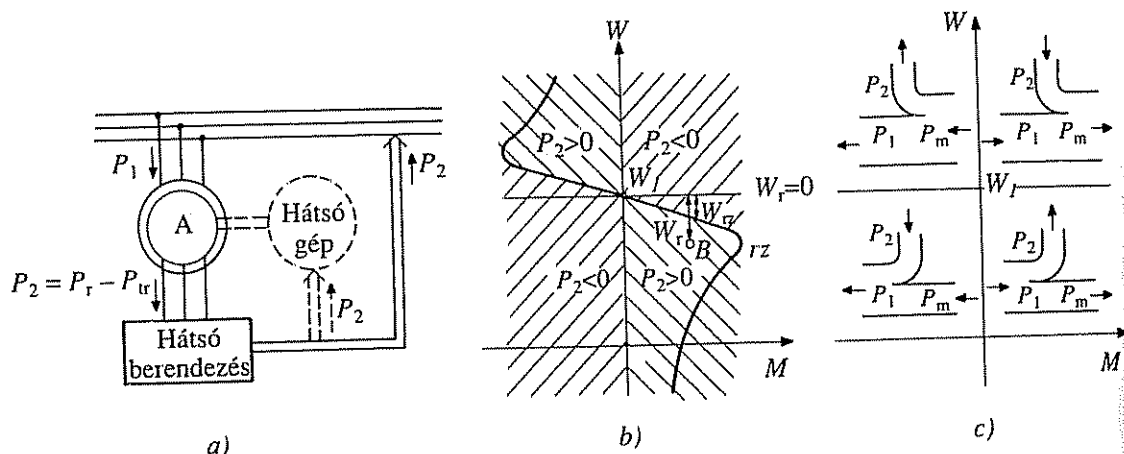
## Kétoldalú táplálás

Csúszógyűrűs gépnél a forgórész is táplálható kívülről. A 4.27. ábrában a hátsó berendezéssel a forgórészből (4.7.4.b) alapján

$$P_2 = P_r - P_{tr} = MW_r - MW_{rz} = M(W_r - W_{rz}) \quad (4.7.9)$$

teljesítményt veszünk ki, illetve adunk be. A szögsebességeket a 4.27.b. ábra mutatja a B pontban. Idealizált esetben ezt a teljesítményt vagy visszatápláljuk a hálózatba, vagy az A aszinkron gép tengelyére adjuk egy ún. hátsógép segítségével. A 4.27.b. ábrából leolvasható, hogy  $P_2 > 0$  teljesítmény kivételével az  $rz$  rövidrezárt jelleggörbe alatti hajtás és az  $rz$  feletti generátoros üzem,  $P_2 < 0$  teljesítmény bevitellel az  $rz$  jelleggörbe alatti generátoros üzem és az  $rz$  feletti hajtás lehetséges. A 4.27.c. ábra veszteségmentes ( $P_1 = P_1, P_2 = P_r$ ) esetre mutatja a teljesítményáramlási viszonyokat. Napjainkban elsősorban kaszkád kapcsolásokat használnak hátsó berendezésként.

Kaszkád kapcsolat ma használatos megoldásait mutatja a 4.28.a. és b. ábra. Ezekben mind az ÁH hálózati, mind az ÁM motoroldali áramirányító hídkapcsolású a „c” ábrának megfelelően. Az ÁH áramirányító tirisztoros kapcsolású, az ÁM áramirányító diódás, vagy szimmetrikus vezérlésű tirisztoros kapcsolás.

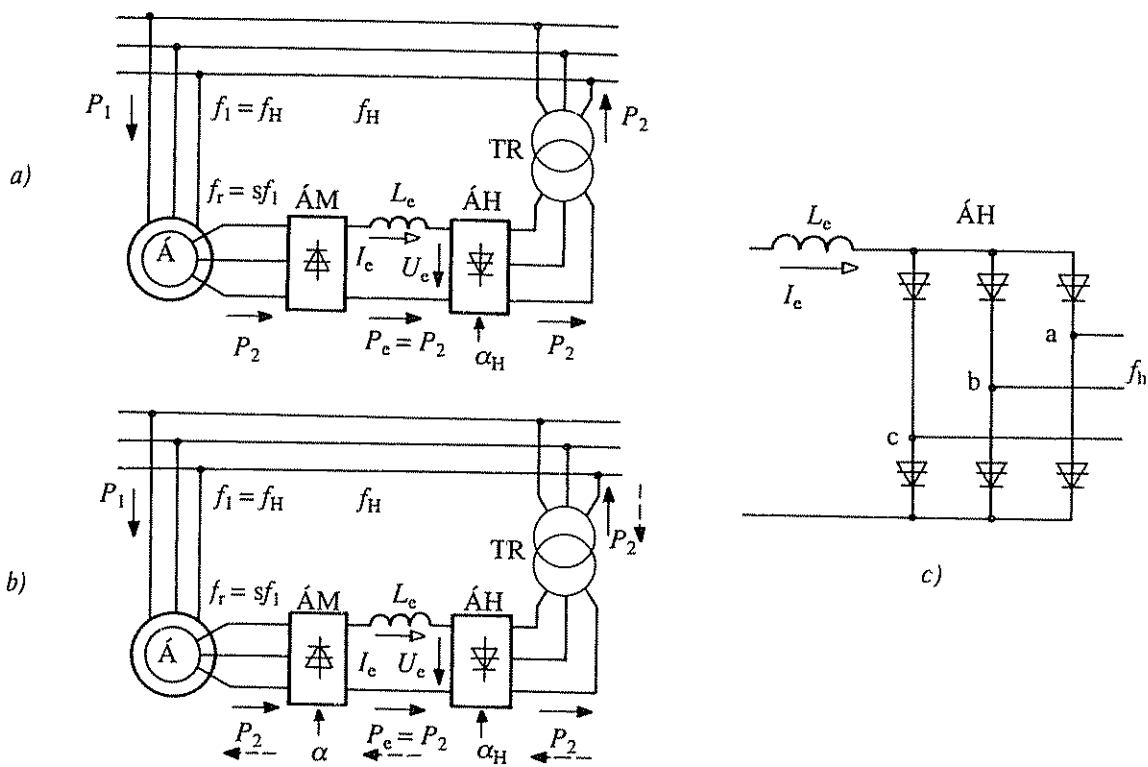


4.27. ábra Kétoldalról táplált aszinkron gép: a) Kapcsolási elrendezés; b), c) teljesítményviszonyok

Szinkron alatti kaszkád (SZAK) hajtásban (4.28.a. ábra) az ÁM motoroldali áramirányító diódás híd, így a forgórészből csak  $P_2 > 0$  teljesítmény kivétel, azaz a 4.27.b. ábrának megfelelően szinkron alatti hajtás és szinkron feletti generátoros üzem lehetséges. Veszteségmentes ÁM és  $L_e$  esetén

$$P_2 = M(W_r - W_{rz}) = P_e = U_e I_e \quad (4.7.10)$$

Szinkron feletti kaszkád (SZFK) hajtásban (4.28.b. ábra) a forgórészhez is tirisztoros ÁM áramirányító kapcsolódik, amelyik speciális hálózati kommutációval, ún. gépi kommutációval üzemel. A  $P_2 = P_e > 0$  folytonos vonalú teljesítményáramláskor



4.28. ábra. Áramirányítós aszinkron gépes kaszkád hajtás:  
 a) szinkron alatti kaszkád; b) szinkron feletti kaszkád; c) tirisztoros hídkapcsolás

(szinkron alatti hajtásnál és szinkron feletti fékezésnél) ÁM egyenirányító (EI), ÁH inverter (INV) üzemben dolgozik. A  $P_2 = P_e < 0$  szaggatott vonalú teljesítményáramlás (szinkron feletti hajtásnál és szinkron alatti generátoros üzemnél) ÁM INV, ÁH EI üzemben van.

### 4.7.1.3. Frekvencia változtatása

A frekvenciaváltoztatást általában kalickás gépek veszteségmentes fordulatszám szabályozására használják.

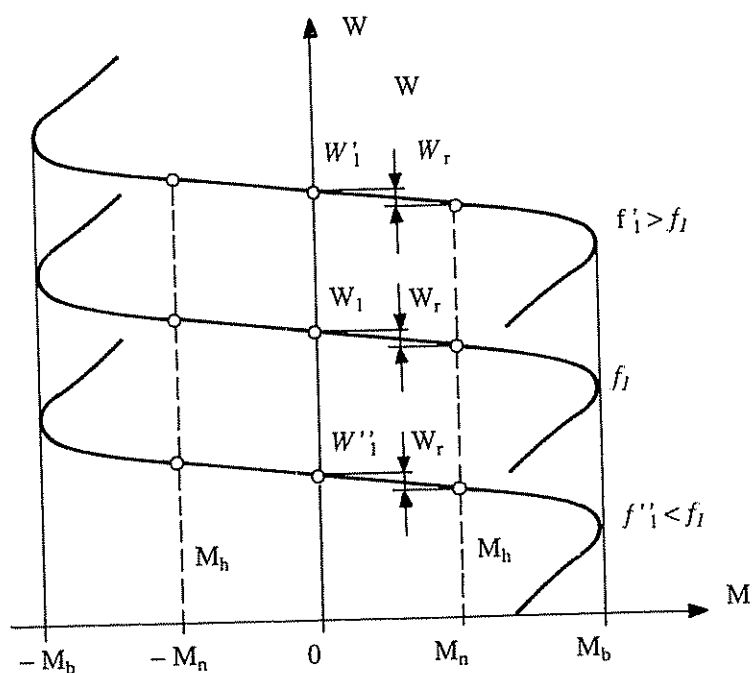
A frekvenciával az  $n_1 = f_1 / p$  szinkron fordulatszám változtatható folyamatosan. Ha a frekvenciával arányosan változtatjuk az  $U_{H1}$  indukált feszültség (4.23. ábra)

$$U_{H1} = |\bar{U}_1 \pm R\bar{I}_1| = \omega_1 \Psi_1 \quad (4.7.11)$$

amplitúdóját, akkor a  $\Psi_1$  állórész fluxus állandó marad. Az  $f_1$  frekvenciától függetlenül állandó az  $M_b$  billenő nyomaték és a  $W_{rb}$  billenő szögsebesség eltérés és a  $W(M)$  jelleggörbék a frekvenciát változtatva a 4.29. ábra szerint önmagukkal párhuzamosan eltolódnak.

A 4.29. ábra  $W(M)$  jelleggörbéi pozitív a, b, c sorrendű tápláláshoz tartoznak, fázis-sorrendet váltva (a, c, b) a  $W(M)$  görbék origóra vett tükörképeit kapjuk.

A frekvencia változtatására csaknem kizárólagosan közbülső egyenáramú körös frekvenciaváltókat alkalmaznak. Ezek feszültséginverteres és áraminverteres megoldásúak lehetnek. Az aszinkron gép viselkedését alapvetően az alapharmonikusok szabják meg.



4.29. ábra.  $W(M)$  jelleggörbék frekvenciaváltoztatáskor  $\Psi_1 = \text{const.}$  mellett

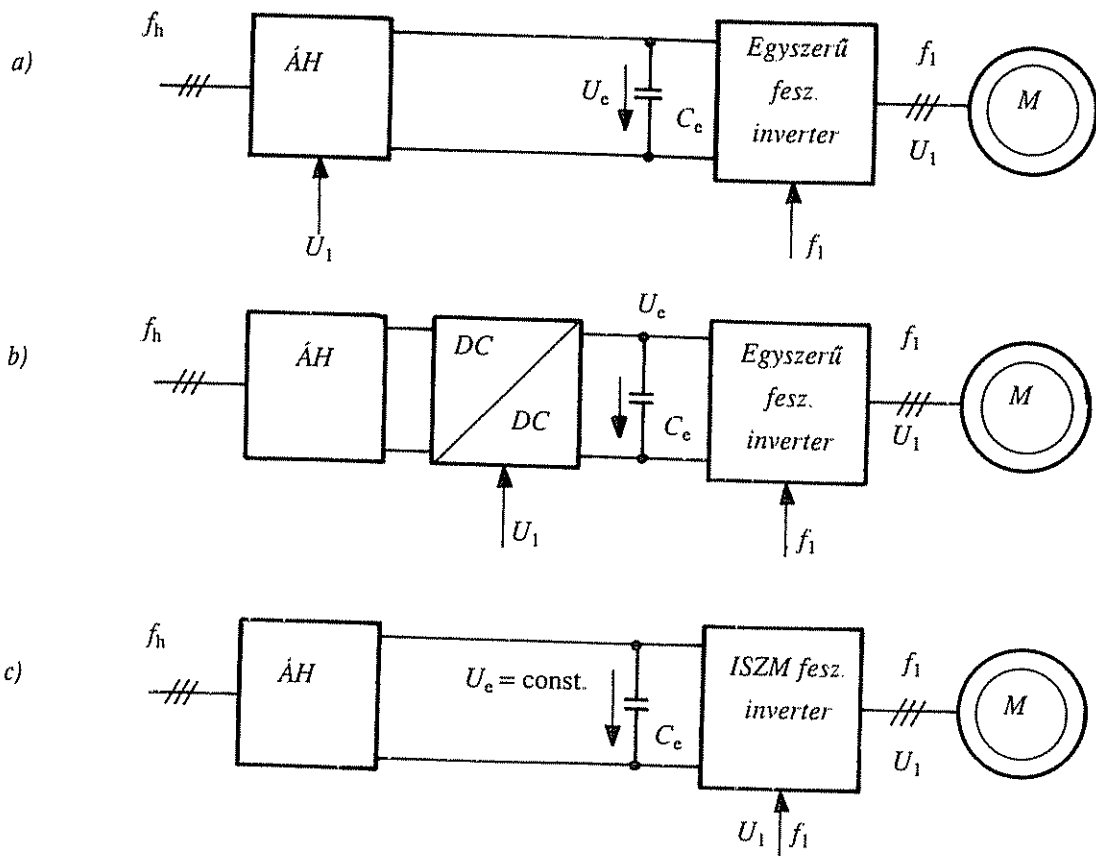
Feszültséginverteres alapmegoldásokat mutat a 4.30. ábra. A közbülső egyenáramú körökben a feszültséginverterek kapcsain  $C_e$  kondenzátor van, ami rövid időre feszültségkényszerít eredményez. Az a. és b. esetben az  $U_1$  feszültséget az  $U_e$  egyenfeszültséggel változtatják, az ún. egyszerű feszültséginverter csak az  $f_1$  frekvenciát változtatja. Az  $U_e$  egyenfeszültséget az a. megoldásban az ÁH hálózati áramirányító, a b.-ben a DC/DC soros egyenáramú szaggató szabályozza. A c. változatban  $U_e = \text{const.}$ , és az impulzusszélesség modulációs (ISZM) feszültséginverter változtatja mind az  $U_1$  feszültséget, mind az  $f_1$  frekvenciát. Az a., illetve c. változatot mutatja tranzistoros feszültséginverter feltételezésével a 4.31.a. ábra. Veszteségmentes viszonyokat feltételezve

$$P_e = U_e \cdot I_e = P_m = MW \quad (4.7.12)$$

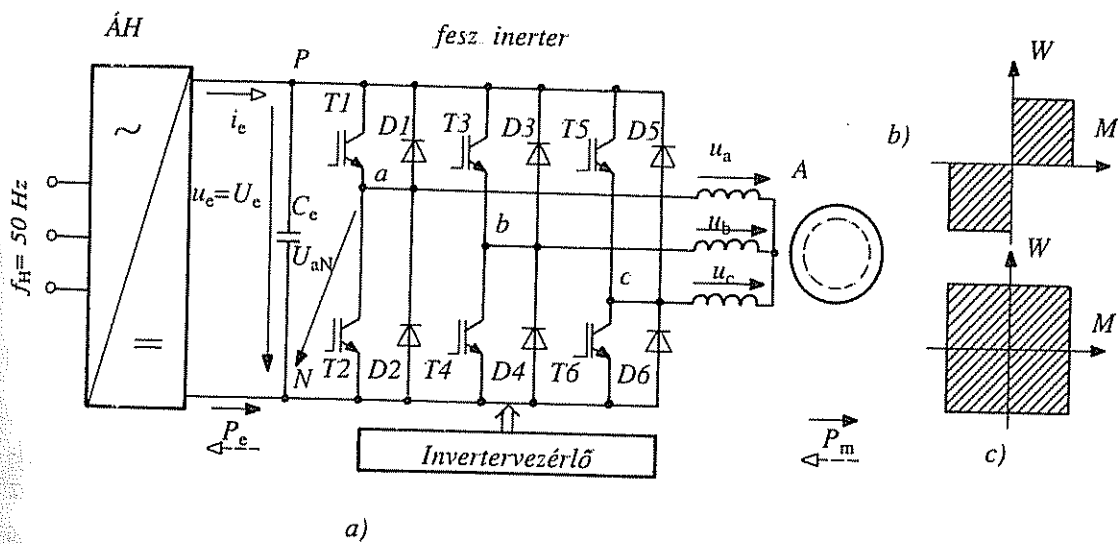
Mivel  $U_e > 0$ , így  $P_m > 0$  hajtáshoz  $I_e > 0$  egyenáram középérték,  $P_m < 0$  generátoros üzemhez  $I_e < 0$  tartozik. Egy tirisztoros hídkapcsolású ÁH-val csak  $I_e > 0$  biztosítható. Két áramirányítóból álló ÁH-val, illetve feszültséggenerátoros ISZM vezérlésű hálózati áramirányítóval  $I_e > 0$  és  $I_e < 0$  is lehet. (Itt a diódák és a tranzisztorok ellentétes irányú áram vezetésére képesek). A feszültséginverteres hajtással átfogható  $W$ - $M$  térnegyedeket a 4.31.b.,c. ábrák szemléltetik.

Az  $u_a$  fázisfeszültséget és annak  $u_{a1}$  alapharmonikusát egy ISZM vezérlésre a 4.32.b. ábra mutatja. Az a. ábra az  $a$  fázis  $N$  negatív sínhez képesti  $u_{aN}$  feszültséget mutatja.

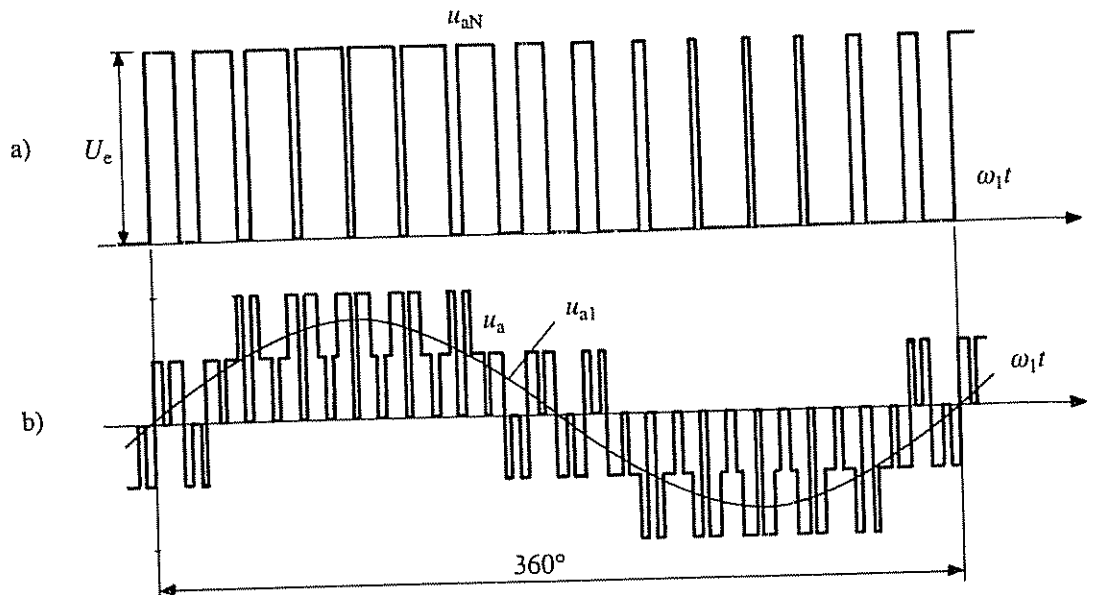
Áraminverteres megoldást mutat a 4.33.a. ábra. A közbülső egyenáramú kör az áraminverterhez minden esetben  $L_e$  induktivitással kapcsolódik, amely rövid időre áramkényszerít jelent. Az egyenáram  $I_e$  középértékét az ÁH hálózati áramirányító állítja be. Veszteségmentes viszonyokat feltételezve itt is érvényes a (4.7.12.) összefüggés. Mivel  $I_e > 0$ , így  $P_m > 0$  hajtáshoz  $U_e > 0$  egyenfeszültség középérték,  $P_m < 0$  fé-



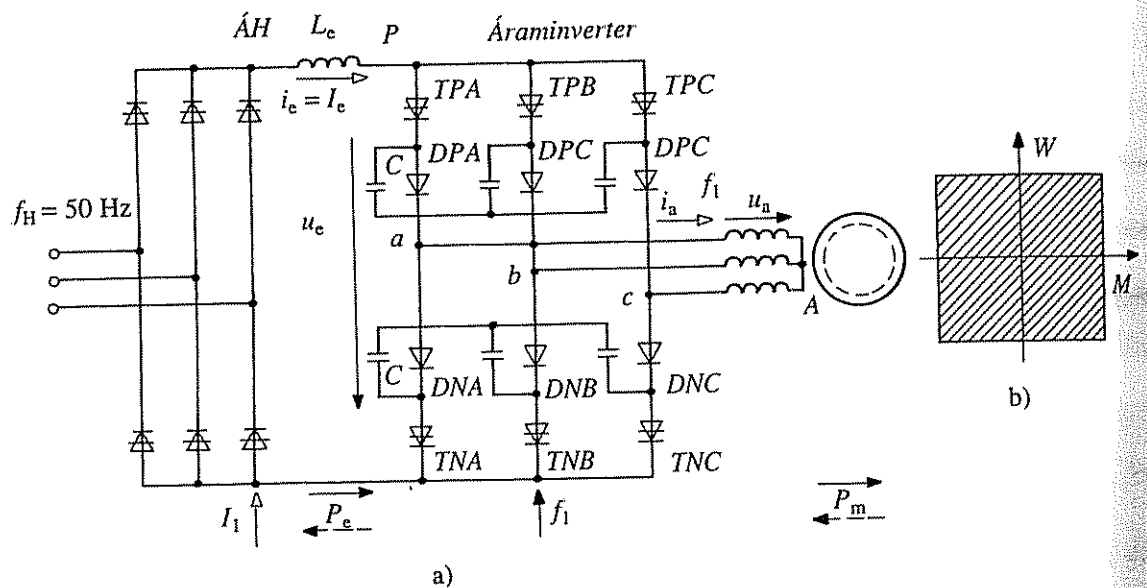
4.30. ábra. Feszültséginverteres megoldások: a), b) egyszerű feszültséginverteres frekvenciaváltó; c) ISZM feszültséginverteres frekvenciaváltó



4.31. ábra. Feszültséginverteres aszinkron gépes hajtás: a) kapcsolási vázlat; b) üzemi térmegyedek ( $I_c > 0$ ); c) üzemi térmegyedek ( $I_c > 0$  és  $I_c < 0$ )



4.32. ábra. ISZM feszültséginverter: a) fázisfeszültség az N sínhez képest; b) fázisfeszültség a csillagponthoz képest

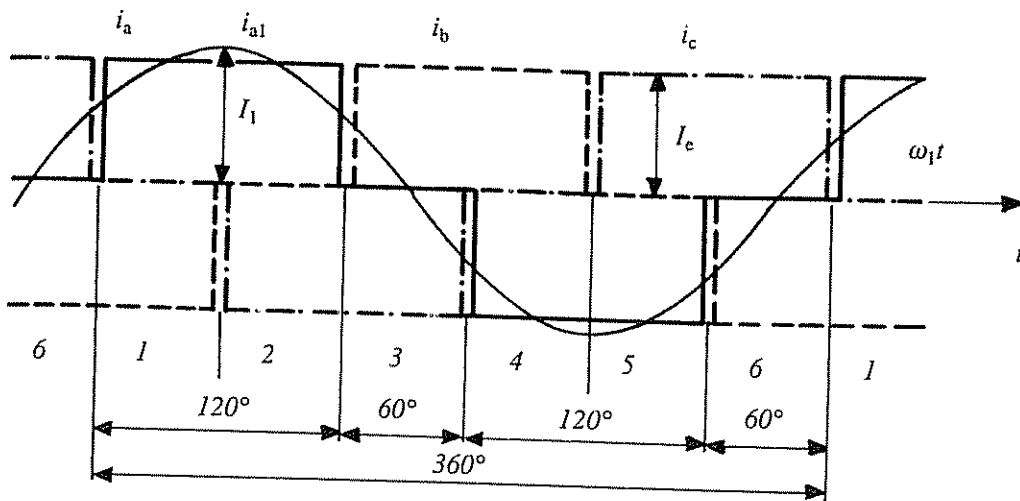


4.33. ábra. Áraminverteres aszinkron gépes hajtás: a) tirisztoros áraminverteres hajtás kapcsolása; b) üzemi térnegyedek; c.) tranzisztoros ISZM vezérlésű áraminverteres hajtás

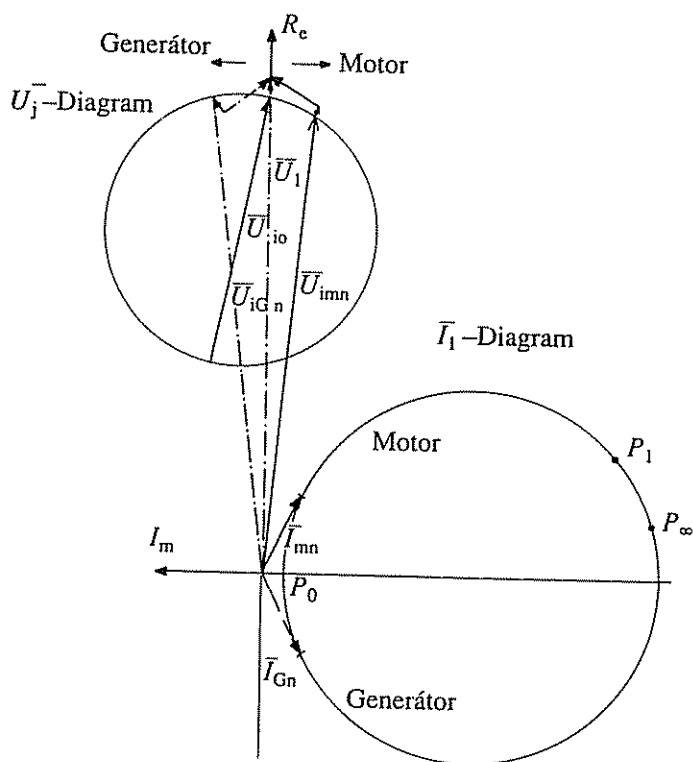
kezéshez  $U_e < 0$  tartozik. Ez szimmetrikusan vezérelt tirisztoros hídkapcsolású ÁH-val és áramgenerátoros ISZM hálózati áramirányítóval is biztosítható. Eszerint az áraminverter alapfelépítésében 4/4-es üzemet tesz lehetővé (4.33. b. ábra).

Az egyszerű tirisztoros áraminverternél (egy periódus alatt) a fázisok  $120^\circ/120^\circ$ -ig a P/N sínen,  $2 \times 60^\circ$ -ig szabadon vannak. Az a,b,c fázisok  $120^\circ-120^\circ$  eltolással követik egymást. A gyújtásvezérlés a,b,c vagy a,c,b fázissorrendje megszabja a forrásirányt. A tirisztoros áraminverter idealizált működését mutatja a 4.34. ábra.





4.34. ábra. Tirisztoros áraminverter fázisáramai ideális esetben



4.35. ábra. Egy aszinkron gép áramvektor és indukált feszültség diagramja

Az ÁH-val szabályozzák az  $I_1$  alapharmonikus áramamplitúdót, az áraminverterrel az  $f_1$  frekvenciát.

Szélérőművekben ma a leggyakrabban használt elektromechanikai átalakítók az aszinkron generátorok.

A 4.35. ábrán az állandó gépparaméterekre felrajzolt áramvektor-diagram (kör-diagram) mellett feltüntettük az:

$$\bar{U}_i = U_1 \pm (R + jX_s) \bar{I}_1 \quad (4.7.13)$$

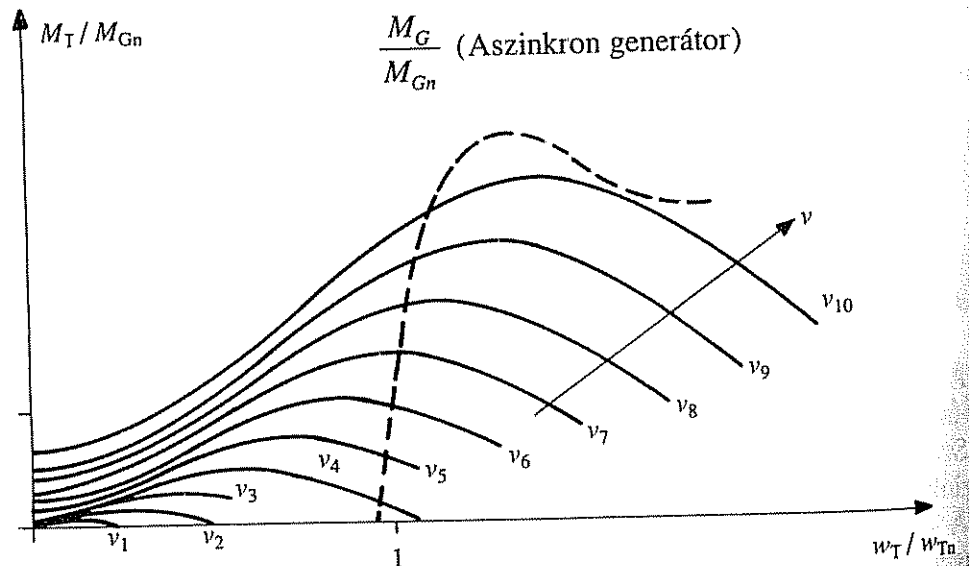
indukált feszültség helygörbéjét is a szlip függvényében. Láthatóan a generátoros üzem minden  $I_0 \leq I_G \leq I_{Gn}$  munkapontjában nagyobb az indukált feszültség (és így a gép főfluxusa is), mint a motoros üzem hasonló terhelésű  $I_0 \leq I_m \leq I_{mn}$  tartományában. A nagyobb indukció és erősebb telítődés jelentősen megnövelheti az aszinkron gép terheléstől független (ún. üresjárási) veszteségeit a nagyobb vasvesztésen és mágnesező áramon keresztül. Ez alacsony szélességeken egy tartomány elvesztését jelenti, mert a turbina hajtó nyomatéka és mechanikai teljesítménye – egy adott szélesség alatt – nem elegendő az üresjárási veszteségek fedezésére sem. A feleslegesen nagy üresjárási veszteségek az egész generátoros tartományban rontják a gép hatásfokát és teljesítménytényezőjét, és a kapcsolási áramlökések is nagyobbak egy telített gép esetében. Az elmondott okok miatt a szélgenerátorként használt aszinkron gépet kevésbé telítődőre kell tervezni, mint ha motorként alkalmaznánk.

A turbina  $M_T-w_T$  jelleggörbéit a  $P_T-w_T$  jelleggörbék ismeretében megszerkeszthetjük különböző szélességekre (lásd 4.36. ábrát).

Hálózathoz közvetlenül csatlakozó aszinkron generátor szinkron szögsebességét a hálózati frekvencia meghatározza, és ezért a turbina fordulatszáma is csak kis mértékben változhat meg terhelés hatására a szlipről függően. Stabil működés generátor üzemben általában csak a szinkron pont és a billenő pont között lehetséges, ahol fennáll:

$$\frac{dM_G}{dw} > \frac{dM_T}{dw} \quad (4.7.14)$$

(Az egyes mennyiségek itt természetesen azonos tengelyre vannak átszámítva). A szűk határok között változó  $w$  értékből következik, hogy a turbina és a generátor közötti áttétel megválasztásával legfeljebb egy munkapontban biztosítható az optimális



4.36. ábra. Szélturbina nyomaték-szögsebesség jelleggörbéi különböző szélességeken. A közös üzem lehetősége aszinkron generátorral

energia kihasználás ( $C_{pmax}; P_{Tmax}$ ) egy adott szélesség esetén. Adott szélesség alatt nem létezik üzem, ez a határ az 4.36. ábrán kb.  $v_4$ .

A jó hatásfok érdekében a motoroknál kis névleges szlipre és így merev M-w jelleggörbére szokás törekedni. A szélrohamok nyomatók és teljesítménylökései merev jelleggörbe esetén átadódnak az aszinkron generátornak és a hálózatnak. Ezek a lökészerű betáplálások nemkívánatosak, mert rontják a megtermelt villamos energia minőségét, ugyanakkor a mechanikai alkatrészek idő előtti kifáradását is okozzák. Ezen alkatrészek méretezését a várható igénybevételek csúcsértékeinek figyelembevételével kell elvégezni. Ilyen hajtásoknál a hármás csúcstényező egy szokásos érték.

Lágyabb jelleggörbéjű aszinkron generátor esetén a széllokések energiájának jelentősebb része a forgó tömegek (elsősorban a turbina) mozgási energiájának megváltoztatására fordítódik ill. abban tárolódik. Ezáltal a generátor tengelyére már csak kisebb nyomatóklökések adódnak át.

A nagyobb névleges szlip valamennyi munkapontban arányosan nagyobb forgórész tekeresvesztést jelent. Ez egyrészt rontja az energiaátalakítás hatásfokát, másrészt nagyobb méretű (drágább) generátort igényel. (Természetesen a kisebb telítődésre méretezett gép ugyancsak a méretek növelését jelenti). Ezért a névleges szlip növelése kb.  $S_n = 10\%$  felett gazdaságilag nem indokolható. A veszteségek növekedésének részben ellene hat az, hogy a lágyabb jelleggörbe miatt az áramok kevésbé követik a szél ingadozását, és így az effektív értékük emiatt kisebb.

#### 4.7.2. Szinkrongenerátorok és frekvenciaváltók

A szinkrongép háromfázisú állórésze gyakorlatilag ugyanolyan mint az aszinkron gépe, a forgórészen egyenárammal táplált gerjesztő tekereselés, vagy állandó mágnes van (4.37. ábra). A gerjesztő tekereselés általában csúszógyűrűkhöz kapcsolódik. Régebben a gerjesztő áramot a szinkrongép tengelyéhez kapcsolt egyenáramú gerjesztőgép szolgáltatta, újabban áramirányítós gerjesztést alkalmaznak. Egyre gyakoribb az ún. kefenélküli gerjesztés, amikor elmarad a csúszógyűrű. Lemezelt forgórésznél gyakran alkalmaznak csillapító (indító) kalickát, ami egy rövidrezárt tekereselés. Tömör vastestű forgórésznél, az örvényáramok átveszik ennek a szerepét. A forgórész kialakításától függően megkülönböztetünk hengeres forgórészű és kiálló pólusú szinkrongépet.

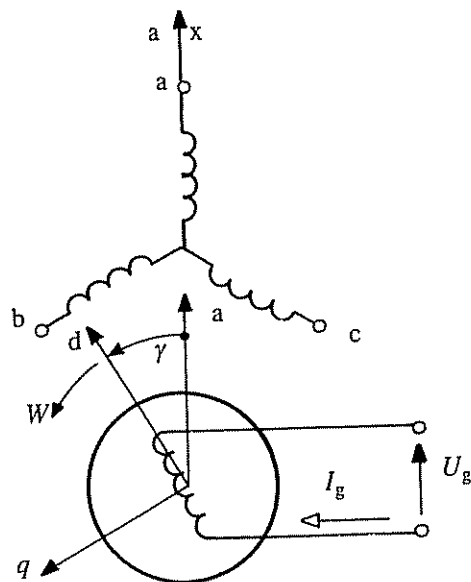
**Szinuszos, szimmetrikus** háromfázisú feszültségről (pl. hálózatról) táplált szinkrongépben forgó mágneses mező jön létre, és állandósult állapotban a forgórész együtt forog a mezővel:

$$n = n_1 = f_1/p, W = W_1 = \omega_1/p \quad (4.7.15)$$

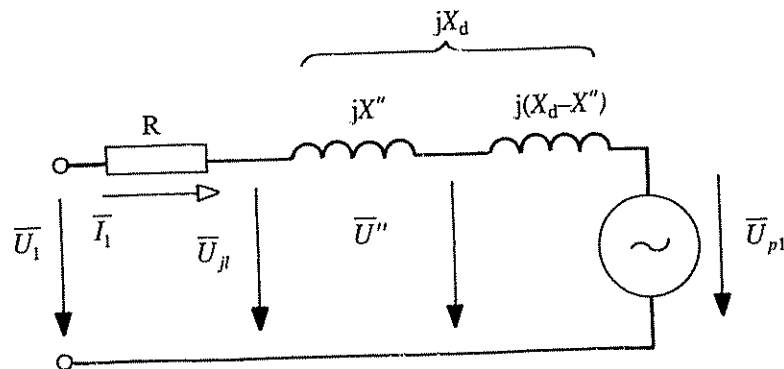
A táphálózatról felvett  $P_1$  teljesítmény fedezi az állórész  $P_{ts}$  tekeres és  $P_{fe}$  vasvesztését és a  $P_1$  légrésteljesítményt. A  $W = W_1$  miatt a légrésteljesítmény megegyezik a mechanikai teljesítménnyel:

$$P_1 - P_{ts} - P_{fe} = P_1 = MW_1 = P_m = MW \quad (4.7.16)$$

A  $P_g = U_g I_g = R_g I_g^2$  gerjesztő teljesítmény a névleges teljesítmény néhány százaléka.



4.37. ábra. Háromfázisú szinkrongép



4.38. ábra. Hengeres forgórészű szinkrongép helyettesítő vázlata

#### 4.7.2.1. Hengeres forgórészű szinkrongép

Ideális esetben a szinkron induktivitások  $d$  hossz és  $q$  keresztirányban megegyeznek:  $L_d = L_q$ . Hengeres forgórészű szinkrongép vasvesztéget elhanyagoló helyettesítő vázlatát mutatja a 4.38. ábra. Az áram  $I_1$  effektív értékével és  $\varphi_1$  szögével számítható a hálózathoz felvett wattos és meddő teljesítmény:

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad Q_1 = 3U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (4.7.17.a,b)$$

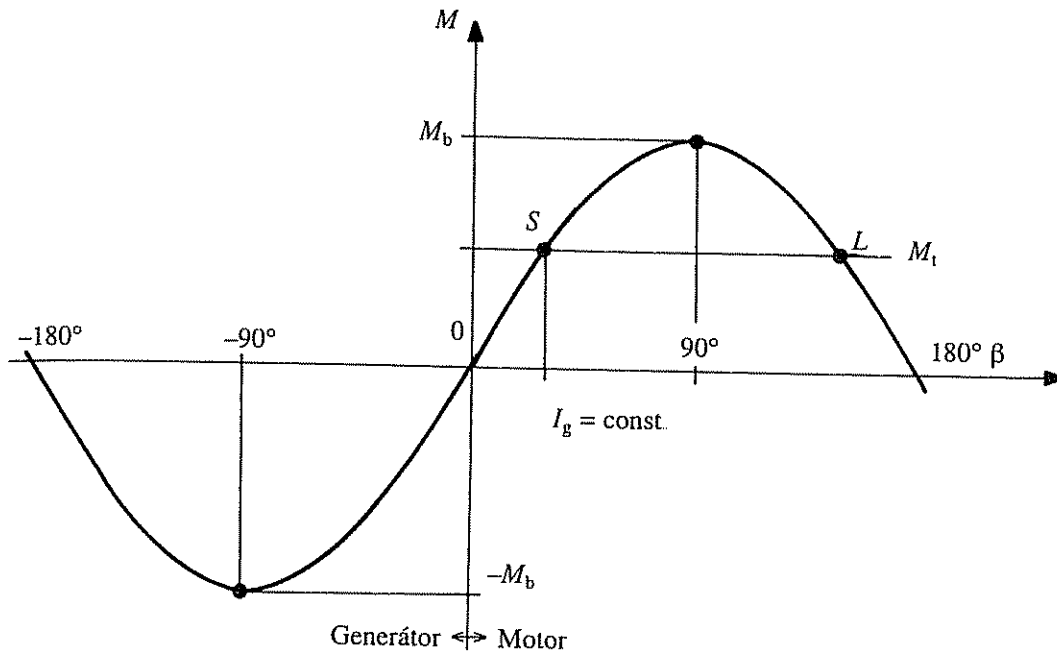
Veszteségeket elhanyagolva a  $P_1 > 0$  motoros üzemet (hajtást), a  $P_1 < 0$  generátoros üzemet (fékezést) jelent. A  $Q_1 > 0$  túlgerjesztett állapotban meddő teljesítményt termel, a  $Q_1 < 0$  alulgerjesztett állapotban meddőt fogyaszt a szinkrongép (az áram siet, ill. késik a feszültséghez képest).

A nyomaték:

$$M = M_b \sin \beta, \quad M_b \approx 3p \frac{U_1 U_{p1}}{\omega_1 X_d} \quad (4.7.18.a,b)$$

ahol a  $\beta$  szög a gépben létrejövő eredő fluxus és a forgórészhez rögzített  $d$  tengely közötti szöget jelenti. (Ez megegyezik az  $\bar{U}_1$  és  $\bar{U}_{p1}$  feszültségek közötti fázisszöggel.)  $U_{p1}$  a forgórész által az állórészben indukált feszültséget jelenti.

Az  $M(\beta)$  jelleggörbét a 4.39. ábra mutatja. A  $\pm M_b$  billenő nyomaték motoros üzemben  $\beta = 90^\circ$ -nál, generátorosan  $-90^\circ$ -nál van. A szinkrongép stabilitását az  $M$ - $\beta$  síkon kell vizsgálni, mivel a nyomaték a  $\beta$ -tól függ. Motoros  $M = M_t > 0$  üzemben az  $S$  pont stabilis, az  $L$  labilis.



4.39 ábra. Hengeres forgórészű szinkrongép nyomatékterhelési szög jelleggörbéje  
 $f_1 = \text{const.}, U_1 = \text{const.}$  mellett

#### 4.7.2.2. Kiálló pólusú szinkrongép

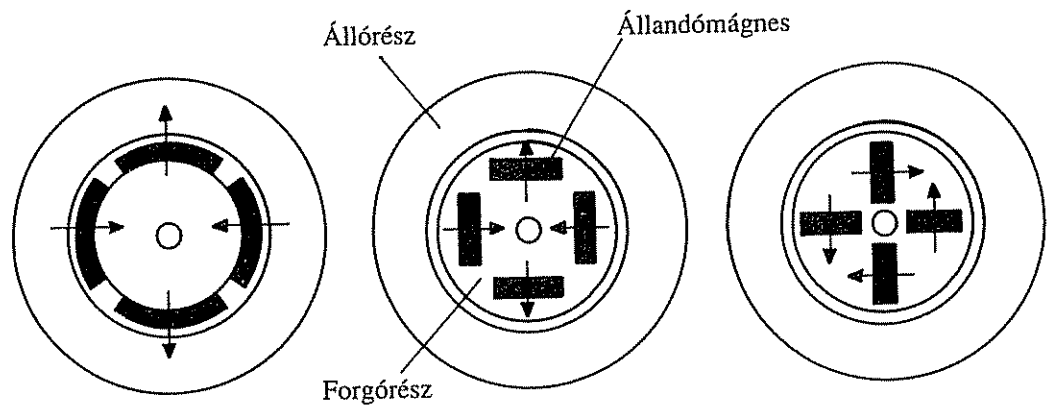
Kiálló pólusú gépnél  $L_d \neq L_q$  részben a mágneses aszimmetria, részben a gerjesztőtekercs  $d$  irányú elrendezése miatt.

A gerjesztett forgórészű szinkrongépek közül a hagyományos kiállópólusú, radiális légrésű konstrukciót alkalmazzák, mivel ez egyszerűen elkészíthető nagy póluszámmal is. Az állandómágneses szinkrongépek egyre szélesebb alkalmazást nyernek és várható, hogy a jövőben egyeduralmuk lesz ezen a területen.

Konstrukciós szempontból a szélgenerátorként alkalmazott állandómágneses szinkrongépek lehetnek:

- radiális,
- axiális és
- transzverzális légrésűek.

Axiális légrésű szinkrongépeket szemléltetnek a 4.40. a., és b. ábrák. Az a. „robantott” ábra szerinti megoldásban a toroid tekercselésű állórészt két állandómág-



4.40. ábra. Radiális légrésű állandómágneses szinkrongépek:  
a) Héjmágneses megoldás; b), c) Belső mágneses megoldások

nessel ellátott forgórész tárcsa fogja közre ( $2p = 8$  a pólusszám) A mágneseket ragasztják a forgórész tárcsákra. A b. egyszerűsített – a tengelyt, a csapágyakat és a házat nem tartalmazó – metszet olyan változatot mutat, amikor két állórész fogja közre az állandómágneses, tárcsa alakú forgórészt. Az állórész tekercs sugárirányú hornyokban helyezkedik el. Az a. ábra szerinti megoldás úgy is működőképes, hogy csak az egyik forgórész tárcsán vannak állandómágnesek, a b. szerinti pedig úgy is, hogy csak az egyik állórész vastestben van tekercs.

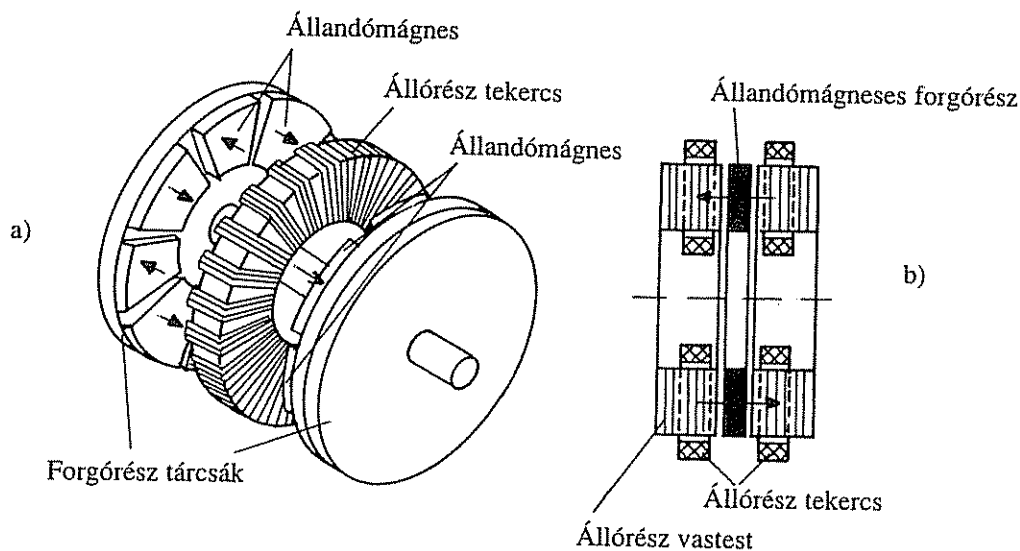
Transzverzális légrésű gép ismertetéséből bonyolultsága miatt eltekintünk. Jelenleg valamennyi fenti változattal folyik kísérlet, illetve gyártás.

Szinkrongépnél a (4.7.15.) fordulatszám gyakorlatilag csak az  $f_1$  frekvenciával változtatható. Szinuszos táplálású üzemben ha a frekvenciával arányosan változtatjuk az  $U_{i1}$  indukált feszültséget (lásd 4.38. ábrát), akkor az állórész fluxus állandó marad.

Ugyanakkor az  $I_g$  gerjesztőáramot állandó értéken tartva a frekvenciától függetlenül állandó az  $M_b$  billenő nyomaték (4.7.18.b) és változatlan az  $M(\beta)$  jelleggörbe (4.39. ábra). A szinkrongépet megfelelően gerjesztve motoros üzemben  $\vartheta_1 = 90^\circ$ , generátorosban  $\vartheta_1 = -90^\circ$ , azaz  $\sin \vartheta_1 = \cos \varphi_1 = \pm 1$  biztosítható (4.42. ábra). Adott  $\Psi_1$  fluxus mellett, adott nyomaték ilyenkor hozható létre a legkisebb  $I_1$  árammal. A  $\vartheta_1 = \pm 90^\circ$ -os üzem a gerjesztés (a  $\Psi_{p1}$  pólusfluxus) szabályozásával biztosítható.

A frekvencia változtatására szinkrongépnél is alkalmazhatók az aszinkron gépnél bemutatott tranzistoros és GTO-s megoldások: a közbülső egyenáramú körös feszültséginverterek (4.31. ábra) és áraminverterek (4.43. ábra). A fenti frekvenciaváltókról táplált szinkrongépet az előbbieket szerint célszerű  $\cos \varphi_1 = \pm 1$ -re gerjeszteni, mert ekkor a legkisebb az alapharmonikus áram, azaz az állórész és a frekvenciaváltó áram igénybevétele. A munkapontot alapvetően az alapharmonikusok szabják meg.

A szinkrongép túlgerjeszthetősége lehetővé teszi hálózati kommutációs áram-irányítók (tirisztoros hídkapcsolás) frekvenciaváltóként való alkalmazását. A tirisztorok ugyanis csak a rajtuk átfolyó áram természetes nullátmeneténél hagyják abba a vezetést és „szigetelnek” a következő gyújtó impulzusig. Túlgerjesztés esetén az áram „siet” a feszültséghez képest, ezért mire egy adott fázis feszültségét meg kell változtatni (nullátmenete van) az áram már kialudt, és az adott fázis-



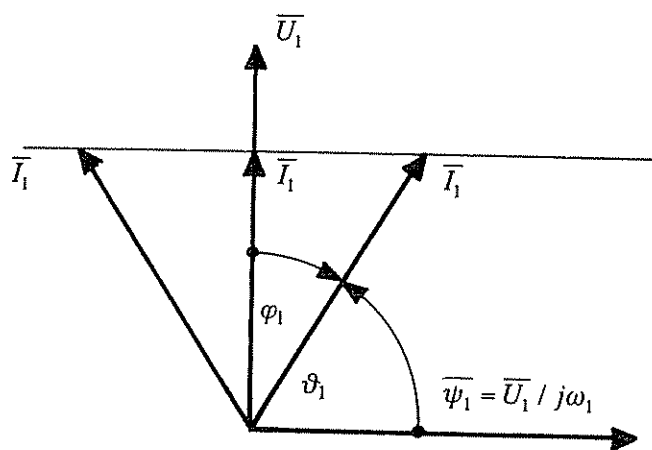
4.41. ábra. Axiális légrésű, állandómágneses szinkrongépek:

a) Toroid tekercselésű gép; b) Kettős állórészi gép

ra a másik tirisztorral ellenkező előjelű feszültség kapcsolható. A 4.43. ábrában az ÁH hálózati és az ÁM motoroldali áramirányítóból álló közbülső egyenáramú körös frekvenciaváltó táplálja a szinkrongépet. Ezt az elrendezést nevezik áramirányítós szinkron gépnek. Az ÁM motoroldali áramirányító a szinkrongép változó  $f_1$  frekvenciájával üzemel, gyújtását önvezérléssel (pl. a tengely szöghelyzetéről vett jellel) oldják meg. Az önvezérlés következtében a szinkronizmusból kiesés nem lehetséges. A fordulatszám és az áramszabályozást az ÁH hálózati áramirányító, a gerjesztés szabályozást az ÁG gerjesztőköri áramirányító látja el. Veszteségmentes esetben

$$-P_e = -U_e J_e = P_m = MW \quad (4.7.19)$$

A negatív előjel a felvett pozitív irányok következménye. Az ÁH és ÁM áramirányítók tirisztorainak vezetési iránya miatt az egyenáram csak  $I_e > 0$  lehet. A  $P_m > 0$  motoros hajtáshoz  $U_e < 0$  egyenfeszültség középérték tartozik, és ÁH egyenirányító



4.42. ábra.  $M = \text{const} > 0$  nyomatékhoz tartozó áramvektorok



(EI), ÁM inverter (INV) üzemben dolgozik. A  $P_m < 0$  generátoros üzemben  $U_e > 0$  és ÁMEI, ÁH INV üzemben van. A 4.43. ábrában folytonos vonal szemlélteti a motoros, szaggatott a generátoros teljesítményáramlást.

Az  $M = 0$ -hoz tartozó üresjárású szögsebesség

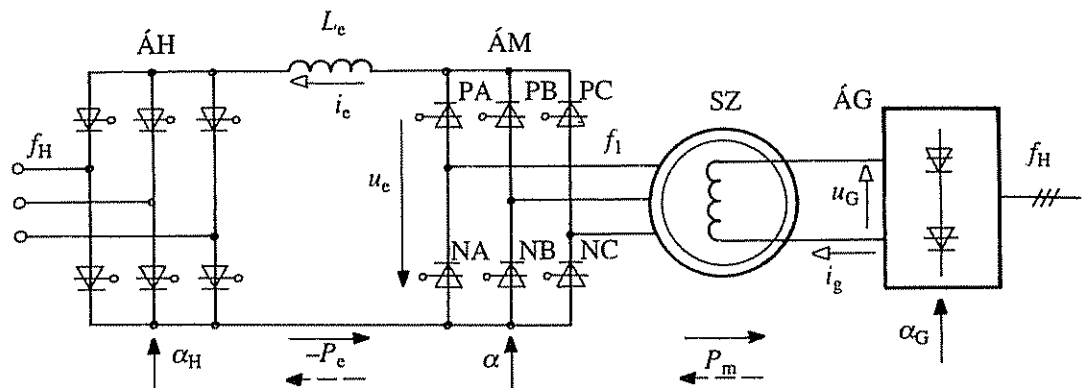
$$W_0 = \frac{\pi}{3\sqrt{3}} \frac{U_e}{p\Psi_p \cos \alpha_p} \quad (4.7.20)$$

Itt  $\Psi_p$  a gerjesztésből származó pólusfluxus és  $\alpha_p$  az  $U_p$ -től mért gyújtásszög. Vagyis állandó  $\Psi_p$  és  $\alpha_p$  esetén a szögsebesség az  $U_e$  feszültséggel arányosan változik.

Generátoros üzemben az  $\alpha_p \approx 0$  begyújtási határon is üzemeltethetünk.

Az ÁM áramirányító gyújtásvezérlésében fázissorrendet cserélve a mechanikai jelleggörbének az origóra vett tükörképeit kapjuk. Ezzel 4/4-es üzem is megvalósítható.

Ha az ÁM áramirányító diódás híd, akkor a diódás szinkrongenerátort kapjuk, ami a begyújtási határon üzemel és csak generátoros üzemre képes.



4.43. ábra. Áramirányítós szinkrongép (kapcsolási vázlat)

### A 4.7., 5.2. és 5.3. fejezetben alkalmazott jelölések

#### Latin nagybetűk

- A aszinkron gép, felület
- ÁH hálózati áramirányító
- ÁM motoroldali áramirányító
- B indukció
- C kapacitás,
- D átmérő,
- E energia
- I áram
- ISZM impulzusszélesség moduláció
- L induktivitás
- L' állórész körüli tranziens induktivitás

$L_r$	forgórész körüli tranziens induktivitás
M	nyomaték, motor
N	negatív
P	hatásos teljesítmény, pozitív, pozícióadó
Q	meddő teljesítmény
R	ellenállás
S	látszólagos teljesítmény, szlip
T	tachogenerátor, tirisztor, tranzisztor, időállandó
TR	transzformátor
U	feszültség
V	veszteség
W	szögsebesség
X	reaktancia

#### *Latin kisbetűk*

a,b,c	fázismennyiségek, fázis tengelyek
d	hosszirány
f	frekvencia
i	áram pillanatérték
i,j,k	pozitív egész számok
j	képzetes egység
m	nyomaték pillanatérték, tömeg
n	fordulatszám
p	póluspárok száma
q	keresztirány
r	sugár
s	szlip, Laplace operátor
t	idő
u	feszültség pillanatérték
x,y	álló tengelyek
v	sebesség
w	szögsebesség pillanatérték
z	lapátszám

#### *Görög betűk*

$\alpha$	gyújtásiszög, forgórész szögelfordulása
$\beta$	mágnes ívének szöge, terhelési szög
$\gamma$	forgórész szögelfordulása
$\Delta$	kis változás
$\eta$	hatásfok
$\vartheta$	nyomatékszög
$\Theta$	tehetetlenségi nyomaték
$\varphi$	fázisszög
$\Psi$	tekercsfluxus amplitúdó
$\omega$	körfrekvencia